

**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ**

**ΓΕΝΙΚΟ ΤΜΗΜΑ  
ΤΟΜΕΑΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ**



**ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ**

**ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗ Χ.Υ.Τ.Α.:  
ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ**

**ZANIA BARBARA**

**Επιβλέπων: ΙΩΑΝΝΗΣ ΤΣΟΜΠΙΑΝΑΚΗΣ**

**ΧΑΝΙΑ, 2009**



# **ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ**

ΓΕΝΙΚΟ ΤΜΗΜΑ  
ΤΟΜΕΑΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

## **ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗ Χ.Υ.Τ.Α. : ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Ζανιά Βαρβάρα  
Χανιά, 2009.

### **Επταμελής εξεταστική επιτροπή**

Ιωάννης Τσομπανάκης  
Επίκουρος Καθηγητής Πολυτεχνείου Κρήτης (Επιβλέπων Καθηγητής)

Γεώργιος Μπουκοβάλας  
Καθηγητής Ε.Μ.Π. (Μέλος της τριμελούς επιτροπής)

Κωνσταντίνος Προβιδάκης  
Καθηγητής Πολυτεχνείου Κρήτης (Μέλος της τριμελούς επιτροπής)

Δημήτριος Σωτηρόπουλος  
Καθηγητής Πολυτεχνείου Κρήτης

Αναστάσιος Σέξτος  
Επίκουρος Καθηγητής Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης

Αχιλλέας Παπαδημητρίου  
Λέκτορας Πανεπιστημίου Θεσσαλίας

Μαρία Σταυρουλάκη  
Λέκτορας Πολυτεχνείου Κρήτης





ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ  
ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ



ΕΥΡΩΠΑΪΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ  
ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ (ΕΚΤ)

Η παρούσα διδακτορική διατριβή αποτελεί υποέργο του: «Πρόγραμμα ενίσχυσης ερευνητικού δυναμικού (ΠΕΝΕΔ) - 2003», το οποίο συγχρηματοδοτείται από Εθνικούς και Κοινοτικούς πόρους. Το Ευρωπαϊκό Κοινοτικό Ταμείο συμμετέχει με ποσοστό 75% ενώ το Ελληνικό Υπουργείο Ανάπτυξης - Γενική Γραμματεία Έρευνας και Τεχνολογίας με ποσοστό 25%.

Τίτλος έργου: «Σεισμική τρωτότητα Χώρων Υγειονομικής Ταφής Απορριμμάτων και βέλτιστος αντισεισμικός σχεδιασμός για τον περιορισμό του περιβαλλοντικού κινδύνου».



ΜΕΤΡΟ 8.3, ΔΡΑΣΗ 8.3.1

This dissertation is part of the 03ED454 research project, implemented within the framework of the "Reinforcement Programme of Human Research Manpower" (PENED) and co-financed by National and Community funds (75% from E.U.- European Social Fund and 25% from the Greek Ministry of Development- General Secretariat of Research and Technology).



## Ευχαριστίες

Η ολοκλήρωση του ερευνητικού έργου που περιλαμβάνει η παρούσα διδακτορική διατριβή δεν θα ήταν εφικτή χωρίς την ουσιαστική συμβολή και στήριξη κάποιων ανθρώπων τους οποίους μέσα από αυτό το σημείωμα θα ήθελα να ευχαριστήσω.

Καίριας σημασίας για την εκπόνηση του ερευνητικού έργου και τη συγγραφή της παρούσας διατριβής υπήρξε η καθοδήγηση και η συμπαράσταση του επιβλέποντος Καθηγητή Ι. Τσομπανάκη, Επίκουρου Καθηγητή του Πολυτεχνείου Κρήτης. Με τις κατευθυντήριες γραμμές που μου παρείχε καθ' όλη τη διάρκεια, αλλά και σε κομβικά σημεία της έρευνας, συνετέλεσε όχι μόνο στην ομαλή πορεία αλλά και στη διαμόρφωση της παρούσας διατριβής. Καθοριστικό ρόλο στην περάτωση του παρόντος έργου έπαιξε επίσης η άψογη συνεργασία μας, καθώς και η εμπιστοσύνη που μου έδειξε καθ' όλη τη διάρκεια των τελευταίων τεσσάρων ετών.

Θα ήθελα ακόμη να ευχαριστήσω τα μέλη της τριμελούς επιτροπής, τον κ. Κ. Προβιδάκη, Καθηγητή του Πολυτεχνείου Κρήτης και τον κ. Γ. Μπουκοβάλα, Καθηγητή του Ε.Μ.Π., για τη βοήθεια και τις εποικοδομητικές παρατηρήσεις κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της διατριβής. Η συμβολή του κ. Γ. Μπουκοβάλα ήταν ουσιαστική στην απόφασή μου να ξεκινήσω αυτή την ερευνητική προσπάθεια, η οποία τελικά υπήρξε πλούσια σε εμπειρίες και γνώσεις. Οι επιστημονικές συζητήσεις μαζί του επί των θεμάτων που πραγματεύεται η παρούσα διατριβή, υπήρξαν ιδιαίτερα εποικοδομητικές. Παράλληλα, οι προτάσεις του για διερεύνηση, οι οποίες υλοποιήθηκαν κατά την εκπόνηση της εργασίας, βοήθησαν στον εμπλουτισμό της.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τα υπόλοιπα μέλη της επιτροπής, τον κ. Δ. Σωτηρόπουλο, Καθηγητή του Πολυτεχνείου Κρήτης, τον κ. Α. Σέξτο, Επίκουρο Καθηγητή του Αριστοτέλειου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης, τον κ. Α. Παπαδημητρίου, Λέκτορα στο Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, και την κα. Μ. Σταυρουλάκη, Λέκτορα του Πολυτεχνείου Κρήτης. Ιδιαίτερη ήταν η συνεισφορά του κ. Α. Παπαδημητρίου, καθώς τα σχόλια του κατά τη συνεργασία μας στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής οδήγησαν στην πληρέστερη αντιμετώπιση κάποιων θεμάτων.

Σε όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της παρούσας διατριβής ο Πρόδρομος Ψαρρόπουλος, μεταδιδακτορικός ερευνητής του Πολυτεχνείου Κρήτης, υποστήριξε με αμέριστη υπομονή την προσπάθειά μου, ακόμη και όταν οι δικές μου αντοχές άγγιζαν

τα όριά τους. Ιδιαίτερα σημαντική υπήρξε η βοήθειά του όλα αυτά τα χρόνια, καθώς ο χρόνος που αφιέρωσε για την καθοδήγησή μου και οι γνώσεις και η εμπειρία που μου μετέδωσε, βοήθησαν σε μεγάλο βαθμό στη διαμόρφωση του τρόπου της ερευνητικής μου σκέψης. Σε αυτό το σημείο θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τη Δανάη και το μικρό Νικόλα, για την κατανόηση και τη συμπαράστασή τους.

Ιδιαίτερα σημαντική υπήρξε επίσης η συνεργασία μου κατά τα τελευταία χρόνια με τον Στέφανο Τσιμπουράκη, οι επιστημονικές συζητήσεις μας πάντα βοηθούσαν να ξεπεραστούν κάποια φαινομενικά αδιέξοδα και οι μη επιστημονικές συζητήσεις πάντα προσέφεραν μία νότα ξεκούρασης μετά από πολλές ώρες εργασίας. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Γιώργο Παπαζαφειρόπουλο γιατί με τη συναναστροφή μαζί του απέκομισα νέες γνώσεις. Η συνεργασία μου, στα πλαίσια της διπλωματικής τους εργασίας, με τους Άρη Νικολακόπουλο, Δημήτρη Κουρμπέτη, και Θωμά Ντεντόπουλο υπήρξε αρκετά διαφωτιστική και ανανεωτική, καθώς μου έδωσε την ευκαιρία να ασχοληθώ με αντικείμενα πέραν της διατριβής και να ξεφύγω από τα όρια της παρούσας έρευνας.

Ακόμη θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Γιώργο Κουρετζή, αρχικά για τις όχι και λίγες φορές που με προέτρεψε να ξεκινήσω την εκπόνηση της διατριβής, αλλά και για την ενθάρρυνσή του στην τελική απόφασή μου.

Η εκπόνηση αυτή της διατριβής δεν θα ήταν εφικτή χωρίς την χρηματοδότηση από την Γενική Γραμματεία Έρευνας και Τεχνολογίας μέσω του Προγράμματος για την Ενίσχυση του Εκπαιδευτικού Δυναμικού (ΠΕΝΕΔ) 2003 με τίτλο «Σεισμική Τρωτότητα Χώρων Υγειονομικής Ταφής Απορριμμάτων και Βέλτιστος Αντισεισμικός Σχεδιασμός για τον Περιορισμό του Περιβαλλοντικού Κινδύνου». Η οικονομική υποστήριξη αυτή κατέστησε δυνατή την πλήρη αφοσίωσή μου στην απαιτούμενη για την ομαλή διεξαγωγή της παρούσας έρευνας.

Τέλος, σίγουρα δεν θα είχα καταφέρει να ολοκληρώσω την παρούσα εργασία χωρίς την αμέριστη συμπαράσταση σε κάθε επίπεδο από την οικογένειά μου και τους φίλους μου.

Θα ήθελα λοιπόν να ευχαριστήσω θερμά την Αγγελική, τη Γεωργία, την Εύη, τη Μυρτώ, τη Νότα, και τη Σταυρούλα (με αλφαβητική σειρά!) που ξεκινήσαμε μαζί πριν από 11 χρόνια τις σπουδές μας στο Ε.Μ.Π. και όλα αυτά τα χρόνια ήταν δίπλα μου. Η υποστήριξή τους και η εμπιστοσύνη τους μου έδωσε κουράγιο αρκετές φορές για να



συνεχίσω, και οι ως επί το πλείστον ευτυχισμένες στιγμές που περάσαμε έκαναν τη διαδρομή αυτή γεμάτη εμπειρίες και ευχάριστες αναμνήσεις.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω στους γονείς μου και την υπόλοιπη οικογένειά μου (και τα νέα μέλη της) για την αφειδώς προσφερόμενη ηθική και ψυχολογική συμπαράσταση καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου. Θα τους είμαι για πάντα ευγνώμων για τα εφόδια που μου παρείχαν, έπειτα από προσωπικό τους κόπο, και κυρίως για τις αξίες τις οποίες μου μετέδωσαν. Σίγουρα ότι κι αν πω θα είναι λίγο, απλά ευχαριστώ....

Βαρβάρα Ζανιά

Χανιά, Ιούλιος 2009



## Περίληψη

Ο αντισεισμικός σχεδιασμός των Χώρων Υγειονομικής Ταφής Απορριμμάτων (Χ.Υ.Τ.Α.) είναι ένα θέμα μείζονος σημασίας, όχι μόνον λόγω των πολλαπλών δυσμενών περιβαλλοντικών και κοινωνικών συνεπειών που συνεπάγεται το ενδεχόμενο αστοχίας τους, αλλά και λόγω των πολλαπλών ιδιαιτεροτήτων που τους χαρακτηρίζουν. Οι ιδιότητες αυτές σχετίζονται με τη γεωμορφολογία της θέσης κατασκευής του Χ.Υ.Τ.Α., την επιφανειακή διαμόρφωση κατά την απόθεση των απορριμμάτων, τις μηχανικές ιδιότητες του απορριμματικού υλικού και την κατασκευή ενός σύνθετου συστήματος στεγάνωσης. Το τελευταίο μάλιστα περιέχει αρκετές διεπιφάνειες γεωσυνθετικών-εδαφικών υλικών, των οποίων η διατμητική αντοχή είναι ένα επιπλέον καίριο ζήτημα κατά τον σχεδιασμό. Για τον λόγο αυτόν στη παρούσα διδακτορική διατριβή εξετάζεται η σεισμική καταπόνηση των Χ.Υ.Τ.Α. τόσο για την περίπτωση των μόνιμων επιβαλλόμενων παραμορφώσεων λόγω τεκτονικής διάρρηξης, όσο και για την περίπτωση μη μόνιμων εδαφικών παραμορφώσεων λόγω διέλευσης σεισμικών κυμάτων.

Αρχικά ερευνάται με τη διεξαγωγή παραμετρικών αριθμητικών αναλύσεων με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, ο μηχανισμός διάδοσης της τεκτονικής διάρρηξης εντός του απορριμματικού υλικού και η καταπόνηση του συστήματος στεγάνωσης. Αφού κατηγοριοποιούνται οι διάφοροι τύποι βλαβών προτείνονται και αναλύονται μέτρα για την προστασία έναντι της εμφάνισής τους. Οι δύο περιπτώσεις ενίσχυσης που εξετάζονται είναι η διαμόρφωση μέτρων προστασίας μέσω της ενίσχυσης του υφιστάμενου συστήματος στεγάνωσης και η κατασκευή ενός γεωσυνθετικά οπλισμένου τεχνητού αναχώματος.

Επιπλέον, ερευνάται η διδιάστατη δυναμική απόκριση των Χ.Υ.Τ.Α. εξετάζοντας την επίδραση των μηχανικών ιδιοτήτων του απορριμματικού υλικού και των χαρακτηριστικών της διέγερσης. Τα αποτελέσματα της εκτεταμένης παραμετρικής διερεύνησης αποτελούν την βάση για την αποτίμηση της σεισμικής ευστάθειας με την εφαρμογή της ασύζευκτης μεθόδου. Η σεισμική ευστάθεια εκτιμάται σε όρους συντελεστή ασφαλείας, κρίσιμης επιτάχυνσης και

σεισμικής μετακίνησης, για την κυκλική επιφάνεια αστοχίας εντός του απορριμματικού όγκου και την επίπεδη επιφάνεια αστοχίας κατά μήκος του συστήματος στεγάνωσης. Εν συνεχεία, συγκρίνεται η απόκριση της γεωκατασκευής έναντι των δύο προαναφερθέντων βασικών μηχανισμών αστοχίας λόγω διέλευσης σεισμικών κυμάτων.

Τέλος, με την εφαρμογή λεπτομερούς αριθμητικής προσομοίωσης της συζευγμένης δυναμικής απόκρισης των Χ.Υ.Τ.Α., εκτιμάται η ευστάθεια κατά μήκος των διεπιφανειών χαμηλής διατμητικής αντοχής του συστήματος στεγάνωσης και η καταπόνηση στη γεωμεμβράνη. Η παραμετρική διερεύνηση της συζευγμένης απόκρισης συντελεί στον προσδιορισμό δύο διαφορετικών μορφών αστοχίας, βάσει των αναπτυσσόμενων σεισμικών μετακινήσεων και των παραμενουσών αξονικών παραμορφώσεων στη γεωμεμβράνη. Αποδεικνύεται ότι τα χαρακτηριστικά ανάπτυξης των μορφών αστοχίας εξαρτώνται από την ιδιοπερίοδο της κατασκευής, την περίοδο της διέγερσης, τη διατμητική αντοχή της διεπιφάνειας και τη μέγιστη επιβαλλόμενη επιτάχυνση.

## **Abstract**

Seismic design of Municipal Solid Waste (MSW) landfills is of extreme importance not only due to the undesirable environmental and socio-economical consequences related to a potential failure, but also due to their special characteristics. These characteristics are related to the geomorphology of the site of placement of the MSW landfill, to the geometry of the typical cross-section of the geostructure, to the mechanical properties of waste material and to the construction of a composite liner system. The composite liner system is constructed in order to successfully isolate leachate from releasing to the environment. Moreover, this composite liner system may contain several soil-geosynthetic, and geosynthetic-geosynthetic interfaces. The shear strength of these interfaces is also a crucial design parameter.

For this purpose, this dissertation investigated the seismic distress of MSW landfills caused not only due to the development of permanent ground deformation resulting from an abrupt fault rupture, but also due to permanent displacements accumulated during the seismic wave propagation. Initially, parametric numerical analyses are performed in order to assess: (a) the propagation of a fault rupture through waste material and (b) the distress of the composite liner system. Furthermore, mitigation measures are proposed and their efficiency in preventing the development of the potential failure modes is examined. More specifically two main categories of mitigation measures are analyzed: (a) alternative configurations based on the two main components of the composite liner system, i.e. clay and geomembrane, and (b) reinforced earth consisting of dense sand and geogrids. The results of the investigation verify that these mitigation measures can efficiently protect the composite liner system from the hazards related to a fault rupture.

Additionally, the two-dimensional dynamic response of MSW landfills is examined, taking also into account the mechanical properties of waste material and the excitation's characteristics. The results of an extended parametric

investigation contribute also to the seismic stability assessment utilizing a decoupled approach. Seismic stability is firstly evaluated in terms of factor of safety, critical acceleration and seismic displacements for two main failure wedges: (a) circular failure surface developed within the waste mass and (b) the entire waste mass where instability is provided along the low-shear-strength interface of the composite liner system. Moreover, the critical mode of instability is examined. However, it is shown that the critical mode of failure is not easily predetermined since it is a factor of the inertia response of the structure and the relative shear strength of the waste mass and the interface of the composite liner system.

Finally, detailed numerical modeling is conducted and the coupled response of MSW landfills is estimated. The advanced finite element models are capable of taking into account the geostatic stress field, the low-shear-strength interface of the composite liner system and the axial stiffness of the geomembrane. It is concluded that two potential failure types may develop at above-ground landfills, related to the seismic displacements along the base and the permanent axial deformation of the geomembrane. The characteristics of these two failure types are strongly influenced by the eigenperiod of the geostructure, the period of the excitation, the shear strength of the interface and the maximum applied acceleration.

## Πίνακας Περιεχομένων

|                                                                     |       |
|---------------------------------------------------------------------|-------|
| Ευχαριστίες .....                                                   | i     |
| Περίληψη.....                                                       | v     |
| Abstract .....                                                      | vii   |
| Πίνακας Περιεχομένων .....                                          | ix    |
| Κατάλογος σχημάτων.....                                             | xiv   |
| Κατάλογος πινάκων .....                                             | xxvii |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1.....                                                     | 1     |
| ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....                                                      | 1     |
| 1.1 Αντικείμενο της έρευνας .....                                   | 1     |
| 1.2 Σκοπός της έρευνας .....                                        | 3     |
| 1.3 Δομή της διατριβής.....                                         | 4     |
| 1.4 Αναφορές κεφαλαίου .....                                        | 8     |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2.....                                                     | 9     |
| ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ.....                                       | 9     |
| 2.1 Κανονιστικό πλαίσιο .....                                       | 9     |
| 2.1.1 Αμερικάνικες οδηγίες (US EPA, 1993) .....                     | 10    |
| Γενικά στοιχεία .....                                               | 10    |
| Αντισεισμικός σχεδιασμός .....                                      | 11    |
| Τεχνικά χαρακτηριστικά σχεδιασμού .....                             | 13    |
| 2.1.2 Ευρωπαϊκές διατάξεις (Council directive 99/31) .....          | 15    |
| Γενικά στοιχεία .....                                               | 15    |
| Τεχνικά χαρακτηριστικά σχεδιασμού .....                             | 16    |
| 2.1.3 Ελληνικό θεσμικό πλαίσιο .....                                | 17    |
| Γενικά στοιχεία .....                                               | 17    |
| Τεχνικά χαρακτηριστικά σχεδιασμού .....                             | 17    |
| 2.1.4 Ελλείψεις και τεχνικά θέματα των κανονιστικών διατάξεων ..... | 18    |
| 2.2 Σεισμική τρωτότητα Χ.Υ.Τ.Α.....                                 | 19    |
| Σεισμός San Fernando (1971).....                                    | 19    |

|                                                                      |           |
|----------------------------------------------------------------------|-----------|
| Σεισμός Whittier Narrows (1987).....                                 | 20        |
| Σεισμός Loma Prieta (1989).....                                      | 20        |
| Σεισμός Landers (1992).....                                          | 20        |
| Σεισμός Northridge (1994).....                                       | 20        |
| Σεισμός Chi-Chi (1999).....                                          | 24        |
| Σεισμός Nisqually (2001).....                                        | 24        |
| 2.2.1 Κατηγοριοποίηση βλαβών και συγκεντρωτική παρουσίασή τους.....  | 25        |
| <b>2.3 Αντισεισμικός σχεδιασμός Χ.Υ.Τ.Α. ....</b>                    | <b>28</b> |
| 2.3.1 Δυναμική απόκριση Χ.Υ.Τ.Α. ....                                | 30        |
| 2.3.2 Δυναμική ευστάθεια Χ.Υ.Τ.Α.....                                | 32        |
| 2.3.3 Σύστημα στεγάνωσης .....                                       | 35        |
| <b>2.4 Μηχανικές ιδιότητες απορριμματικού υλικού.....</b>            | <b>36</b> |
| 2.4.1 Πυκνότητα.....                                                 | 37        |
| 2.4.2 Διατμητική αντοχή.....                                         | 39        |
| Αποτελέσματα ανάστροφων αναλύσεων.....                               | 40        |
| Αποτελέσματα επιτόπου δοκιμών.....                                   | 41        |
| Αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών .....                             | 41        |
| 2.4.3 Δυναμική συμπεριφορά.....                                      | 45        |
| Ταχύτητα διάδοσης διατμητικού κύματος .....                          | 45        |
| Απομείωση του μέτρου διάτμησης – Αύξηση του λόγου απόσβεσης.....     | 47        |
| 2.4.4 Ανασκόπηση των χαρακτηριστικών της μηχανικής συμπεριφοράς..... | 49        |
| <b>2.5 Ιδιότητες συστήματος στεγάνωσης και αποστράγγισης.....</b>    | <b>53</b> |
| 2.5.1 Διεπιφάνειες εδάφους – γεωσυνθετικών.....                      | 54        |
| Άργιλος με γεωμεμβράνη .....                                         | 54        |
| Κοκκώδες έδαφος με γεωμεμβράνη ή γεωύφασμα.....                      | 57        |
| 2.5.2 Διεπιφάνειες γεωσυνθετικών.....                                | 59        |
| Γεωύφασμα με γεωμεμβράνη .....                                       | 60        |
| Γεωδίκτυο / γεωσύνθετο με γεωμεμβράνη .....                          | 65        |
| Γεωδίκτυο με γεωύφασμα.....                                          | 68        |
| GCL με γεωμεμβράνη.....                                              | 69        |
| 2.5.3 Συγκεντρωτικά στοιχεία – Προτάσεις .....                       | 69        |
| <b>2.6 Συμπεράσματα.....</b>                                         | <b>71</b> |
| <b>2.7 Αναφορές κεφαλαίου .....</b>                                  | <b>72</b> |
| <b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3.....</b>                                               | <b>79</b> |



|                                                                             |            |
|-----------------------------------------------------------------------------|------------|
| ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗ Χ.Υ.Τ.Α. ΛΟΓΩ ΕΝΕΡΓΟΠΟΙΗΣΗΣ ΥΠΟΚΕΙΜΕΝΟΥ ΡΗΓΜΑΤΟΣ .....           | 79         |
| <b>3.1 Βιβλιογραφική ανασκόπηση .....</b>                                   | <b>79</b>  |
| <b>3.2 Διάδοση ρήγματος εντός της απορριμματικής μάζας .....</b>            | <b>84</b>  |
| 3.2.1 Επαλήθευση της αριθμητικής προσομοίωσης.....                          | 84         |
| 3.2.2 Επίδραση των χαρακτηριστικών του ρήγματος .....                       | 91         |
| 3.2.3 Επίδραση της θέσης του ίχνους του ρήγματος .....                      | 94         |
| 3.2.4 Συμπεράσματα για τη διάδοση ρήγματος εντός απορριμματικού υλικού..... | 96         |
| <b>3.3 Καταπόνηση του Συστήματος Στεγάνωσης .....</b>                       | <b>96</b>  |
| 3.3.1 Επίδραση των παραδοχών της αριθμητικής προσομοίωσης.....              | 98         |
| 3.3.2 Επίδραση της θέσης του ίχνους του ρήγματος .....                      | 102        |
| 3.3.3 Επίδραση των ιδιοτήτων του συστήματος στεγάνωσης .....                | 103        |
| 3.3.4 Συμπεράσματα .....                                                    | 107        |
| <b>3.4 Μέτρα προστασίας έναντι τεκτονικής διάρρηξης.....</b>                | <b>108</b> |
| 3.4.1 Μέτρα βασιζόμενα στην βελτίωση του συστήματος στεγάνωσης .....        | 109        |
| Ενίσχυση της αργλικής εδαφικής στρώσης .....                                | 111        |
| Ενίσχυση της γεωμεμβράνης στεγάνωσης .....                                  | 114        |
| Αποτελεσματικότητα των εξεταζόμενων μέτρων .....                            | 118        |
| 3.4.2 Οπλισμένο τεχνητό επίχωμα.....                                        | 120        |
| Επίδραση του πάχους της εδαφικής στρώσης .....                              | 121        |
| Επίδραση του υπερκείμενου φορτίου.....                                      | 125        |
| Επίδραση της απόστασης των γεωσυνθετικών οπλισμών .....                     | 127        |
| Επίδραση του μέτρου ελαστικότητας των γεωσυνθετικών οπλισμών.....           | 129        |
| Αποτελεσματικότητα των εξεταζόμενων μέτρων .....                            | 132        |
| <b>3.5 Συμπεράσματα .....</b>                                               | <b>135</b> |
| <b>3.6 Αναφορές κεφαλαίου .....</b>                                         | <b>137</b> |
| <b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4.....</b>                                                      | <b>139</b> |
| <b>ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗ Χ.Υ.Τ.Α. ....</b>                                      | <b>139</b> |
| <b>4.1 Εισαγωγή.....</b>                                                    | <b>139</b> |
| <b>4.2 Μεθοδολογία αριθμητικής ανάλυσης.....</b>                            | <b>142</b> |
| <b>4.3 Γραμμικώς ελαστική συμπεριφορά απορριμματικού υλικού.....</b>        | <b>145</b> |
| 4.3.1 Επίδραση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της τοπικής διατομής.....    | 149        |
| 4.3.2 Επίδραση των δυναμικών ιδιοτήτων του απορριμματικού υλικού.....       | 157        |
| 4.3.3 Επίδραση των χαρακτηριστικών της επιβαλλόμενης διέγερσης .....        | 160        |
| <b>4.4 Ισοδύναμα γραμμική συμπεριφορά απορριμματικού υλικού .....</b>       | <b>162</b> |

|            |                                                                                       |            |
|------------|---------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 4.4.1      | Παραδοχές της παραμετρικής διερεύνησης.....                                           | 164        |
| 4.4.2      | Επίδραση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της τοπικής διατομής.....                    | 165        |
| 4.4.3      | Επίδραση των δυναμικών ιδιοτήτων του απορριμματικού υλικού.....                       | 170        |
| 4.4.4      | Επίδραση των χαρακτηριστικών της διέγερσης.....                                       | 174        |
| 4.4.5      | Συγκεντρωτικά αποτελέσματα.....                                                       | 179        |
| <b>4.5</b> | <b>Δυναμική αλληλεπίδραση Χ.Υ.Τ.Α. και εδάφους θεμελίωσης.....</b>                    | <b>184</b> |
| 4.5.1      | Παραδοχές της παραμετρικής διερεύνησης.....                                           | 185        |
| 4.5.2      | Μελέτη της δυναμικής αλληλεπίδρασης θεμελίωσης – Χ.Υ.Τ.Α.....                         | 187        |
| 4.5.3      | Επίδραση των συχνοτικών χαρακτηριστικών της σεισμικής κίνησης.....                    | 190        |
| 4.5.4      | Επίδραση των ιδιοτήτων του εδάφους θεμελίωσης.....                                    | 192        |
| <b>4.6</b> | <b>Συμπεράσματα.....</b>                                                              | <b>195</b> |
| <b>4.7</b> | <b>Αναφορές κεφαλαίου.....</b>                                                        | <b>196</b> |
|            | ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5.....                                                                       | 199        |
|            | ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΠΡΑΝΩΝ Χ.Υ.Τ.Α.: ΑΠΛΟΠΟΙΗΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΕΣ.....                   | 199        |
| <b>5.1</b> | <b>Εισαγωγή.....</b>                                                                  | <b>199</b> |
| 5.1.1      | Μέθοδος μονίμων παραμορφώσεων.....                                                    | 201        |
|            | Τροποποιήσεις για την ευκαμψία της κατασκευής.....                                    | 203        |
| <b>5.2</b> | <b>Εκτίμηση της ευστάθειας κυκλικών επιφανειών ολίσθησης.....</b>                     | <b>207</b> |
| 5.2.1      | Περιγραφή και παραδοχές της μεθοδολογίας ανάλυσης.....                                | 207        |
| 5.2.2      | Αποτελέσματα αναλύσεων σεισμικής ευστάθειας.....                                      | 210        |
|            | Ισοδύναμη Επιτάχυνση.....                                                             | 210        |
|            | Συντελεστής ασφαλείας.....                                                            | 213        |
|            | Μετακινήσεις.....                                                                     | 216        |
| <b>5.3</b> | <b>Εκτίμηση της ευστάθειας κατά μήκος διεπιφάνειας του συστήματος στεγάνωσης.....</b> | <b>220</b> |
| 5.3.1      | Ασύζευκτη μέθοδος.....                                                                | 222        |
|            | Ισοδύναμη Επιτάχυνση.....                                                             | 222        |
|            | Συντελεστής ασφαλείας.....                                                            | 224        |
|            | Μετακινήσεις.....                                                                     | 225        |
| 5.3.2      | Σύγκριση των δύο μορφών αστοχίας.....                                                 | 226        |
| 5.3.3      | Συζευγμένες μέθοδοι.....                                                              | 231        |
|            | Κρίσιμη επιτάχυνση.....                                                               | 231        |
|            | Μετακινήσεις – Δυναμική απόκριση.....                                                 | 237        |
| <b>5.4</b> | <b>Αλληλεπίδραση δυο επιφανειών αστοχίας.....</b>                                     | <b>252</b> |

|                                                                             |                                                                    |     |
|-----------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|-----|
| 5.4.1                                                                       | Διατόπωση νέου ημι-αναλυτικού προσομοιώματος διπλής ολίσθησης..... | 253 |
| 5.4.2                                                                       | Επαλήθευση των αποτελεσμάτων μέσω αριθμητικής προσομοίωσης .....   | 255 |
| 5.4.3                                                                       | Παραμετρική διερεύνηση.....                                        | 259 |
| 5.4.4                                                                       | Σύγκριση με το κλασσικό προσομοίωμα Newmark.....                   | 264 |
| 5.5                                                                         | Συμπεράσματα .....                                                 | 266 |
| 5.6                                                                         | Αναφορές κεφαλαίου .....                                           | 269 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6.....                                                             |                                                                    | 273 |
| ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΠΡΑΝΩΝ Χ.Υ.Τ.Α.: ΛΕΠΤΟΜΕΡΗΣ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ..... |                                                                    | 273 |
| 6.1                                                                         | Εισαγωγή.....                                                      | 273 |
| 6.2                                                                         | Σεισμική συμπεριφορά του συστήματος στεγάνωσης.....                | 275 |
| 6.3                                                                         | Μεθοδολογία αριθμητικής προσομοίωσης .....                         | 277 |
| 6.4                                                                         | Εκτίμηση σεισμικής ευστάθειας – Μετακινήσεις .....                 | 281 |
| 6.4.1                                                                       | Παραμετρική διερεύνηση.....                                        | 285 |
| 6.4.2                                                                       | Κανονικοποίηση της μετακίνησης.....                                | 295 |
| 6.4.3                                                                       | Σύγκριση με τα απλοποιητικά προσομοιώματα .....                    | 301 |
| 6.5                                                                         | Εκτίμηση της δυναμικής απόκρισης – Επιταχύνσεις .....              | 304 |
| 6.5.1                                                                       | Παραμετρική διερεύνηση.....                                        | 306 |
| 6.5.2                                                                       | Κανονικοποίηση της μετακίνησης.....                                | 311 |
| 6.6                                                                         | Εκτίμηση της καταπόνησης – Παραμορφώσεις.....                      | 313 |
| 6.6.1                                                                       | Παραμετρική διερεύνηση.....                                        | 315 |
| 6.6.2                                                                       | Κανονικοποίηση της παραμόρφωσης .....                              | 320 |
| 6.7                                                                         | Συμπεράσματα .....                                                 | 324 |
| 6.8                                                                         | Αναφορές κεφαλαίου .....                                           | 325 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7.....                                                             |                                                                    | 327 |
| ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ .....                                              |                                                                    | 327 |
| 7.1                                                                         | Γενικά συμπεράσματα .....                                          | 327 |
| 7.2                                                                         | Καταπόνηση λόγω τεκτονικής διάρρηξης .....                         | 331 |
| 7.3                                                                         | Δυναμική απόκριση .....                                            | 332 |
| 7.4                                                                         | Σεισμική ευστάθεια και καταπόνηση συστήματος στεγάνωσης.....       | 334 |
| 7.5                                                                         | Προτάσεις για μελλοντική διερεύνηση.....                           | 338 |
| 7.6                                                                         | Δημοσιεύσεις διδακτορικής διατριβής.....                           | 339 |

## Κατάλογος σχημάτων

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                 |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|
| Σχήμα 1.1: «Διάγραμμα ροής» της δομής της διδακτορικής διατριβής.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 7               |
| Σχήμα 2.1. Τυπική διάταξη σύμφωνα με EPA (1993) για: (α) σύνθετο σύστημα στεγάνωσης με σύστημα συλλογής στραγγίσματος, και (β) σύστημα τελικής κάλυψης.....                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 15              |
| Σχήμα 2.2. Διαμήκης ρωγμή κοντά στα σύνορα με το φυσικό έδαφος η οποία εκδηλώθηκε μετά τον σεισμό του Northridge (1994) στο Χ.Υ.Τ.Α. Sunshine Canyon (Matasovic et al., 1998a).....                                                                                                                                                                                                                                                                  | 22              |
| Σχήμα 2.3. Ρωγμή στη γεωμεμβράνη στεγάνωσης η οποία εκδηλώθηκε μετά τον σεισμό του Northridge (1994) στο Χ.Υ.Τ.Α. Chiquita Canyon στην περιοχή C (Matasovic et al., 1998a). ....                                                                                                                                                                                                                                                                     | 23              |
| Σχήμα 2.4. Ρωγμές και κατακόρυφη μετακίνηση επί των αναβαθμών του Χ.Υ.Τ.Α. Ο.Ι.Ι., οι οποίες εκδηλώθηκαν μετά τον σεισμό του Northridge (1994) (Matasovic et al., 1998a). ....                                                                                                                                                                                                                                                                       | 24              |
| Σχήμα 2.5. Μετακίνηση των επιφανειακών αγωγών πολυαιθυλενίου του Χ.Υ.Τ.Α. Kent έπειτα από το σεισμό Nisqualli (Bray et al., 2001).....                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 25_Toc241231091 |
| Σχήμα 2.6. Κατανομή της ταχύτητας διάδοσης του διατμητικού κύματος με το βάθος από Matasovic and Kavazanjian (1998).....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 46              |
| Σχήμα 2.7. Περιβάλλουσες αστοχίας σύμφωνα με αποτελέσματα δοκιμών άμεσης διάτμησης μεγάλης κλίμακας.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 51              |
| Σχήμα 2.8. Προτεινόμενες καμπύλες απομείωσης του μέτρου διάτμησης-αύξησης του λόγου απόσβεσης για το απορριμματικό υλικό.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 52              |
| Σχήμα 3.1. Επιφάνειες αστοχίας λόγω διάδοσης ρήγματος εντός πυκνής άμμου όπως προέκυψαν για: (α) κανονικό ρήγμα σύμφωνα με τα αποτελέσματα της παρούσας αριθμητικής ανάλυσης, (β) κανονικό ρήγμα σύμφωνα με παρατηρήσεις πεδίου των Bray et al. (1994a), (γ) ανάστροφο ρήγμα σύμφωνα με τα αποτελέσματα της παρούσας αριθμητικής ανάλυσης, και (δ) ανάστροφο ρήγμα σύμφωνα με παρατηρήσεις πεδίου των Bray et al. (1994a).....                       | 86              |
| Σχήμα 3.2. Επιφάνειες αστοχίας λόγω διάδοσης ρήγματος εντός απορριμματικού υλικού όπως προέκυψαν για: (α) κανονικό ρήγμα, και (β) ανάστροφο ρήγμα 45° σύμφωνα με τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων με θεώρηση μονοδιάστατων συνθηκών ελεύθερου πεδίου.....                                                                                                                                                                                   | 87              |
| Σχήμα 3.3. Κάνναβος πεπερασμένων στοιχείων και γεωμετρικά δεδομένα για τη διατομή του εξεταζόμενου Χ.Υ.Τ.Α. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 89              |
| Σχήμα 3.4. Επιφάνειες αστοχίας λόγω διάδοσης ρήγματος εντός απορριμματικού υλικού όπως προέκυψαν για: (α) κανονικό ρήγμα, και (β) ανάστροφο ρήγμα 45° σύμφωνα με τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων με θεώρηση διδιάστατων συνθηκών. ....                                                                                                                                                                                                     | 89              |
| Σχήμα 3.5. Σύγκριση μονοδιάστατων (1Δ), συνθηκών ελεύθερου πεδίου (Ε.Π.) και διδιάστατων (2Δ) συνθηκών προσομοίωσης για κανονικό και ανάστροφο ρήγμα 45°: κατανομή της κανονικοποιημένης ως προς το ύψος κατακόρυφης μετακίνησης ( $y/H$ ) συναρτήσει της κανονικοποιημένης ως προς το ύψος οριζόντιας συνιστώσας του παραμορφωμένου φορέα ( $x/H$ ). ....                                                                                           | 90              |
| Σχήμα 3.6. Επίδραση της πυκνότητας της διακριτοποίησης για κανονικό ρήγμα 45°: κατανομή της κανονικοποιημένης ως προς το ύψος κατακόρυφης μετακίνησης ( $y/H$ ) συναρτήσει της κανονικοποιημένης ως προς το ύψος οριζόντιας συνιστώσας του παραμορφωμένου φορέα ( $x/H$ ). Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται για διάφορες τιμές της κατακόρυφης συνιστώσας της μετακίνησης του ρήγματος κανονικοποιημένης ως προς το ύψος του Χ.Υ.Τ.Α. (0.5%-2.5%)..... | 91              |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Σχήμα 3.7. Επίδραση των χαρακτηριστικών του ρήγματος: κατανομή της κανονικοποιημένης ως προς το ύψος κατακόρυφης μετακίνησης ( $y/H$ ) συναρτήσει της κανονικοποιημένης ως προς το ύψος οριζόντιας συνιστώσας του παραμορφωμένου φορέα ( $x/H$ ) για κανονικό και ανάστροφο ρήγμα $60^\circ$ και ρήγμα $90^\circ$ . Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται για διάφορες τιμές της κατακόρυφης συνιστώσας της μετακίνησης του ρήγματος κανονικοποιημένης ως προς το ύψος του Χ.Υ.Τ.Α. (0.5%-2.5%). | 93  |
| Σχήμα 3.8. Σχηματική απεικόνιση της εξεταζόμενης γεωμετρίας και των δύο θέσεων του ίχνους του ρήγματος και λεπτομέρεια του δομημένου καννάβου στον πόδα του πρανούς.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 95  |
| Σχήμα 3.9. Επίδραση της θέσης του ρήγματος: κατανομή της οριζόντιας και της κατακόρυφης συνιστώσας της μετακίνησης για δύο επίπεδα κανονικοποιημένης επιβαλλόμενης μετακίνησης του ρήγματος. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται για πυκνή διακριτοποίηση και ίχνος του κανονικού ρήγματος $45^\circ$ στις θέσεις Α και Β. Για λόγους άμεσης αντιπαραβολής και για τις δύο περιπτώσεις το ίχνος του ρήγματος κείται στη θέση $x=0m$ .                                                          | 95  |
| Σχήμα 3.10. Διακριτοποίηση του εξεταζόμενου Χ.Υ.Τ.Α.. Με έντονη γραμμή σημειώνεται η θέση της γεωμεμβράνης στεγάνωσης στη βάση του.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 98  |
| Σχήμα 3.11. Επίδραση της θεώρησης αρχικών συνθηκών: (α) κατανομή της κανονικοποιημένης ως προς το ύψος κατακόρυφης μετακίνησης ( $y/H$ ) συναρτήσει της κανονικοποιημένης ως προς το ύψος οριζόντιας συνιστώσας του παραμορφωμένου φορέα ( $x/H$ ), και (β) κατανομή της μέγιστης αξονικής τάσης συναρτήσει της κατακόρυφης συνιστώσας της μετακίνησης του ρήγματος.                                                                                                                      | 99  |
| Σχήμα 3.12. Κατανομή της αξονικής παραμόρφωσης κατά μήκος της γεωμεμβράνης, για διάφορα επίπεδα της κατακόρυφης συνιστώσας της μετακίνησης του ρήγματος (0.1-0.6m). Το ίχνος του ρήγματος βρίσκεται στον άξονα συμμετρίας ( $x=0m$ ).                                                                                                                                                                                                                                                     | 99  |
| Σχήμα 3.13. Κατανομή των ισομεγέθων της πλαστικής παραμόρφωσης εντός του Χ.Υ.Τ.Α. για κατακόρυφη συνιστώσα της μετακίνησης ίση με: (α) 0.04m, δηλαδή την τιμή στην οποία παρατηρείται επιφανειακή εκδήλωση του ρήγματος και (β) 0.30m, δηλαδή την τιμή στην οποία αναπτύσσεται πλήρως και η δευτερογενής επιφάνεια αστοχίας.                                                                                                                                                              | 100 |
| Σχήμα 3.14. Επίδραση της διακριτοποίησης του προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων: (α) κατανομή της κανονικοποιημένης ως προς το ύψος κατακόρυφης μετακίνησης ( $y/H$ ) συναρτήσει της κανονικοποιημένης ως προς το ύψος οριζόντιας συνιστώσας του παραμορφωμένου φορέα ( $x/H$ ), και (β) κατανομή της μέγιστης αξονικής τάσης συναρτήσει της κατακόρυφης συνιστώσας της μετακίνησης του ρήγματος.                                                                                      | 101 |
| Σχήμα 3.15. Επίδραση της θέσης του ρήγματος: κατανομή της οριζόντιας και της κατακόρυφης συνιστώσας της μετακίνησης για τρία επίπεδα κανονικοποιημένης επιβαλλόμενης μετακίνησης του ρήγματος. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται για τις περιπτώσεις κανονικού ρήγματος $45^\circ$ στις θέσεις Α και Β.                                                                                                                                                                                      | 102 |
| Σχήμα 3.16. Επίδραση της θέσης του ρήγματος: κατανομή της μέγιστης αξονικής τάσης συναρτήσει της κατακόρυφης συνιστώσας της μετακίνησης του ρήγματος.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 103 |
| Σχήμα 3.17. Επίδραση της στιφρότητας του αργλικού φραγμού: (α) κατανομή της κανονικοποιημένης ως προς το ύψος κατακόρυφης μετακίνησης ( $y/H$ ) συναρτήσει της κανονικοποιημένης ως προς το ύψος οριζόντιας συνιστώσας του παραμορφωμένου φορέα ( $x/H$ ), και (β) κατανομή της μέγιστης αξονικής τάσης συναρτήσει της κατακόρυφης συνιστώσας της μετακίνησης του ρήγματος.                                                                                                               | 104 |
| Σχήμα 3.18. Επίδραση της μηχανικής συμπεριφοράς της γεωμεμβράνης: (α) κατανομή της μέγιστης αξονικής τάσης συναρτήσει της κατακόρυφης συνιστώσας της μετακίνησης του ρήγματος, και (β) κατανομή της αξονικής παραμόρφωσης της γεωμεμβράνης κατά μήκος της, για διάφορα επίπεδα της κατακόρυφης συνιστώσας της μετακίνησης του ρήγματος (0.1 και 0.3m).                                                                                                                                    | 105 |
| Σχήμα 3.19. Επίδραση των συνθηκών ολίσθησης: (α) κατανομή της κανονικοποιημένης ως προς το ύψος κατακόρυφης μετακίνησης ( $y/H$ ) συναρτήσει της κανονικοποιημένης ως προς το ύψος                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |     |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| οριζόντιας συνιστώσας του παραμορφωμένου φορέα ( $x/H$ ), και (β) κατανομή της μέγιστης αξονικής τάσης στη γεωμεμβράνη συναρτήσει της κατακόρυφης συνιστώσας της μετακίνησης του ρήγματος.....                                                                                                                                                                                                                                                                         | 107 |
| Σχήμα 3.20. Εξεταζόμενα εναλλακτικά σενάρια μέτρων προστασίας Χ.Υ.Τ.Α. έναντι τεκτονικής διάρρηξης. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 111 |
| Σχήμα 3.21. Επίδραση του πάχους της υποκείμενης αργλικής στρώσης: επιφάνειες αστοχίας μέσω των ισομεγέθων της πλαστικής παραμόρφωσης για κατακόρυφη συνιστώσα της μετακίνησης ίση με 0.2m και τις περιπτώσεις: (α) μη εφαρμογή μέτρων προστασίας, (β) Σενάριο 1, και (γ) Σενάριο 2. Με διακεκομμένη γραμμή σημειώνεται η θέση της γεωμεμβράνης. ....                                                                                                                   | 112 |
| Σχήμα 3.22. Επίδραση του πάχους της αργλικής στρώσης: κατανομή της αξονικής παραμόρφωσης της γεωμεμβράνης κατά μήκος της, για διάφορα επίπεδα της κατακόρυφης συνιστώσας της μετακίνησης του ρήγματος (0.05-0.2m). Το ίχνος του ρήγματος εντοπίζεται για $x=0m$ . Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του Σεναρίου 1 (Σ1) και του Σεναρίου 2 (Σ2) με έντονες γραμμές σε σύγκριση με τα αντίστοιχα που προκύπτουν χωρίς την εφαρμογή μέτρων προστασίας. ....                 | 113 |
| Σχήμα 3.23. Επίδραση του πάχους της γεωμεμβράνης και της προσθήκης δεύτερης γεωμεμβράνης: (α) κατανομή της κανονικοποιημένης ως προς το ύψος κατακόρυφης μετακίνησης ( $y/H$ ) συναρτήσει της κανονικοποιημένης ως προς το ύψος οριζόντιας συνιστώσας του παραμορφωμένου φορέα ( $x/H$ ), και (β) κατανομή της μέγιστης αξονικής παραμόρφωσης συναρτήσει της κατακόρυφης συνιστώσας της μετακίνησης του ρήγματος. ....                                                 | 115 |
| Σχήμα 3.24. Επίδραση του πάχους της γεωμεμβράνης: (α) κατανομή της κανονικοποιημένης ως προς το ύψος κατακόρυφης μετακίνησης ( $y/H$ ) συναρτήσει της κανονικοποιημένης ως προς το ύψος οριζόντιας συνιστώσας του παραμορφωμένου φορέα ( $x/H$ ), και (β) κατανομή της μέγιστης αξονικής παραμόρφωσης συναρτήσει της κατακόρυφης συνιστώσας της μετακίνησης του ρήγματος.....                                                                                          | 116 |
| Σχήμα 3.25. Επίδραση του πάχους της γεωμεμβράνης και της προσθήκης δεύτερης γεωμεμβράνης: (α) κατανομή της κανονικοποιημένης ως προς το ύψος κατακόρυφης μετακίνησης ( $y/H$ ) συναρτήσει της κανονικοποιημένης ως προς το ύψος οριζόντιας συνιστώσας του παραμορφωμένου φορέα ( $x/H$ ), και (β) κατανομή της ολίσθησης συναρτήσει της κατακόρυφης συνιστώσας της μετακίνησης του ρήγματος. ....                                                                      | 116 |
| Σχήμα 3.26. Επίδραση του πάχους της γεωμεμβράνης και της προσθήκης δεύτερης γεωμεμβράνης: (α) κατανομή της αξονικής παραμόρφωσης της γεωμεμβράνης κατά μήκος της, για διάφορα επίπεδα της κατακόρυφης συνιστώσας της μετακίνησης του ρήγματος (0.05-0.15m), και (β) κατανομή της μέγιστης αξονικής παραμόρφωσης συναρτήσει της κατακόρυφης συνιστώσας της μετακίνησης του ρήγματος. Οι έντονες γραμμές του (α) αναφέρονται στο σενάριο Σ6 ενώ οι υπόλοιπες στο Σ4..... | 117 |
| Σχήμα 3.27. Κατανομή της κανονικοποιημένης ως προς το ύψος κατακόρυφης μετακίνησης ( $y/H$ ) συναρτήσει της κανονικοποιημένης ως προς το ύψος οριζόντιας συνιστώσας του παραμορφωμένου φορέα ( $x/H$ ), για τις τρεις περιπτώσεις πάχους της εδαφικής στρώσης και διάφορα επίπεδα της κανονικοποιημένης κατακόρυφης συνιστώσας της μετακίνησης ως προς το ύψος ( $d/H$ ).....                                                                                          | 122 |
| Σχήμα 3.28. Μέγιστη αξονική τάση κατά μήκος του γεωσυνθετικού οπλισμού για τις τρεις εξεταζόμενες περιπτώσεις πάχους του τεχνητού επιχώματος.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 124 |
| Σχήμα 3.29. Επίδραση του υπερκείμενου φορτίου: κατανομή της κανονικοποιημένης ως προς το ύψος κατακόρυφης μετακίνησης ( $y/H$ ) συναρτήσει της κανονικοποιημένης ως προς το ύψος οριζόντιας συνιστώσας του παραμορφωμένου φορέα ( $x/H$ ), για οπλισμένο επίχωμα πάχους 2m και: (α) εφαρμογή ενός γεωσυνθετικού οπλισμού, και (β) εφαρμογή τριών γεωσυνθετικών οπλισμών. ....                                                                                          | 125 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Σχήμα 3.30. Επίδραση του υπερκείμενου φορτίου στη μέγιστη αξονική τάση κατά μήκος του γεωσυνθετικού οπλισμού για τις δύο διατάξεις οπλισμών.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 126 |
| Σχήμα 3.31. Επίδραση της απόστασης των οπλισμών: κατανομή της κανονικοποιημένης ως προς το ύψος κατακόρυφης μετακίνησης ( $y/H$ ) συναρτήσει της κανονικοποιημένης ως προς το ύψος οριζόντιας συνιστώσας του παραμορφωμένου φορέα ( $x/H$ ), για οπλισμένο επίχωμα πάχους 2m, 3m και 5m και απόσταση οπλισμών ίση με 1m. ....                                                                                                                                                                                                       | 127 |
| Σχήμα 3.32. Επίδραση της απόστασης των οπλισμών στη μέγιστη αξονική τάση κατά μήκος του γεωσυνθετικού οπλισμού για τις τρεις περιπτώσεις τεχνητών επιχωμάτων. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 128 |
| Σχήμα 3.33. Επίδραση της απόστασης των οπλισμών: κατανομή της κανονικοποιημένης ως προς το ύψος κατακόρυφης μετακίνησης ( $y/H$ ) συναρτήσει της κανονικοποιημένης ως προς το ύψος οριζόντιας συνιστώσας του παραμορφωμένου φορέα ( $x/H$ ), για οπλισμένο επίχωμα πάχους 2m, και 3m και απόσταση οπλισμών ίση με 0.5m. ....                                                                                                                                                                                                        | 129 |
| Σχήμα 3.34. Επίδραση του μέτρου ελαστικότητας των οπλισμών: κατανομή της κανονικοποιημένης ως προς το ύψος κατακόρυφης μετακίνησης ( $y/H$ ) συναρτήσει της κανονικοποιημένης ως προς το ύψος οριζόντιας συνιστώσας του παραμορφωμένου φορέα ( $x/H$ ), για οπλισμένο επίχωμα πάχους 2m και: (α) εφαρμογή ενός γεωσυνθετικού οπλισμού και (β) εφαρμογή τριών γεωσυνθετικών οπλισμών. ....                                                                                                                                           | 130 |
| Σχήμα 3.35. Επίδραση του μέτρου ελαστικότητας των οπλισμών: κατανομή της κανονικοποιημένης ως προς το ύψος κατακόρυφης μετακίνησης ( $y/H$ ) συναρτήσει της κανονικοποιημένης ως προς το ύψος οριζόντιας συνιστώσας του παραμορφωμένου φορέα ( $x/H$ ), για οπλισμένο επίχωμα πάχους 3m και: (α) εφαρμογή ενός γεωσυνθετικού οπλισμού, (β) εφαρμογή δύο γεωσυνθετικών οπλισμών, και (γ) εφαρμογή πέντε γεωσυνθετικών οπλισμών....                                                                                                   | 131 |
| Σχήμα 4.1. Επαλήθευση της εφαρμοζόμενης μεθοδολογίας υπολογισμού της δυναμικής απόκρισης για την εκτίμηση της επίδρασης της τοπογραφίας μέσω σύγκρισης με τα αριθμητικά αποτελέσματα των Gazetas et al. (2002). Παρουσιάζονται: (α) η κατανομή του λόγου της οριζόντιας επιτάχυνσης προς την επιτάχυνση ελευθέρου πεδίου ( $a_{hor}/a_{ff}$ ), και (β) η κατανομή του λόγου της κατακόρυφης επιτάχυνσης προς την οριζόντια επιτάχυνση ( $a_{ver}/a_{hor}$ ). ....                                                                   | 144 |
| Σχήμα 4.2. Επαλήθευση της εφαρμοζόμενης μεθοδολογίας υπολογισμού της δυναμικής απόκρισης για την εκτίμηση της επίδρασης της τοπογραφίας μέσω σύγκρισης με τα αριθμητικά αποτελέσματα των Assimaki et al. (2005). Παρουσιάζονται: (α) η κατανομή του λόγου της οριζόντιας επιτάχυνσης προς την επιτάχυνση ελευθέρου πεδίου ( $a_{hor}/a_{ff}$ ), και (β) η κατανομή του λόγου της κατακόρυφης επιτάχυνσης προς την επιτάχυνση ελευθέρου πεδίου ( $a_{ver}/a_{ff}$ ) για τρεις τιμές της κεντρικής συχνότητας του παλμού Ricker. .... | 145 |
| Σχήμα 4.3. Τυπικές διατάξεις Χ.Υ.Τ.Α. των οποίων μελετήθηκε η δυναμική απόκριση μέσω αριθμητικών εν χρόνω αναλύσεων αλλά και αναλύσεων στο πεδίο των συχνοτήτων. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 147 |
| Σχήμα 4.4. Οι χρονοϊστορίες επιτάχυνσης των τριών διεγέρσεων της παραμετρικής διερεύνησης οι οποίες παρουσιάζονται ανηγμένες σε μέγιστη επιτάχυνση 0.01g. Πρόκειται για έναν παλμό Ricker με κεντρική συχνότητα στα 2Hz, την καταγραφή του σεισμού του Αιγίου (1995), και την καταγραφή Shin-Kobe από τον σεισμό Hyogoken-Nanbu (1995 Kobe). ....                                                                                                                                                                                   | 148 |
| Σχήμα 4.5. Ελαστικά φάσματα απόκρισης επιτάχυνσης του παλμού Ricker και των δύο καταγραφών από το σεισμό του Αιγίου (1995) και του Kobe (1995). ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 148 |
| Σχήμα 4.6. Ισοβαρείς της κανονικοποιημένης οριζόντιας επιτάχυνσης ως προς τη μέγιστη επιβαλλόμενη επιτάχυνση σε διάφορες χρονικές στιγμές για τα τρία εξεταζόμενα προσομοιώματα.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 151 |
| Σχήμα 4.7. Συναρτήσεις μεταφοράς (TF) των τριών προσομοιωμάτων στα χαρακτηριστικά σημεία T1, T2, T3. Οι κατανομές αναφέρονται στην περίπτωση επιβολής παλμού Ricker με μέγιστη επιτάχυνση 0.01g και απορριμματικό υλικό Τύπου Α.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 152 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Σχήμα 4.8. Συναρτήσεις τοπογραφικής επιδείνωσης (TAF) των τριών προσομοιωμάτων στα υπό εξέταση σημεία. Οι κατανομές αναφέρονται στην περίπτωση επιβολής παλμού Ricker με μέγιστη επιτάχυνση 0.01g και απορριμματικό υλικό Τύπου Α.....                                                                                                                                                                                                                                           | 155 |
| Σχήμα 4.9 Κατανομή της παρασιτικής κατακόρυφης συνιστώσας της επιτάχυνσης κανονικοποιημένης ως προς τη μέγιστη επιβαλλόμενη επιτάχυνση ( $a_{\max, \text{ver}}/\text{PGA}$ ) καθ' ύψος των τριών προσομοιωμάτων. Οι διατομές εντοπίζονται στο σημείο T2 για το πρώτο προσομοίωμα και στο σημείο T3 για το δεύτερο και τρίτο. ....                                                                                                                                                | 156 |
| Σχήμα 4.10 Κατανομή του λόγου της μέγιστης οριζόντιας επιτάχυνσης από διδιάστατες αναλύσεις προς την αντίστοιχη από μονοδιάστατες (TAF) κατά μήκος της επιφάνειας των τριών εξεταζόμενων προσομοιωμάτων. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται και για τους τρεις τύπους απορριμματικού υλικού και για επιβολή παλμού Ricker.....                                                                                                                                                       | 158 |
| Σχήμα 4.11 Κατανομή του λόγου της μέγιστης κατακόρυφης επιτάχυνσης προς τη μέγιστη επιβαλλόμενη επιτάχυνση ( $a_{\max, \text{ver}}/\text{PGA}$ ) κατά μήκος της επιφάνειας των τριών εξεταζόμενων προσομοιωμάτων. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται και για τους τρεις τύπους απορριμματικού υλικού και για επιβολή παλμού Ricker. ....                                                                                                                                             | 159 |
| Σχήμα 4.12. Κατανομή του λόγου της μέγιστης οριζόντιας επιτάχυνσης από διδιάστατες αναλύσεις προς την αντίστοιχη από μονοδιάστατες (TAF) κατά μήκος της επιφάνειας των τριών εξεταζόμενων προσομοιωμάτων. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται και για τις τρεις επιβαλλόμενες διεγέρσεις και για την περίπτωση απορριμματικού υλικού Τύπου Α.....                                                                                                                                     | 161 |
| Σχήμα 4.13. Κατανομή του λόγου της μέγιστης κατακόρυφης επιτάχυνσης προς τη μέγιστη επιβαλλόμενη επιτάχυνση ( $a_{\max, \text{ver}}/\text{PGA}$ ) κατά μήκος της επιφάνειας των τριών εξεταζόμενων προσομοιωμάτων. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται και για τις τρεις επιβαλλόμενες διεγέρσεις και για την περίπτωση απορριμματικού υλικού Τύπου Α. ....                                                                                                                           | 162 |
| Σχήμα 4.14. Συναρτήσεις μεταφοράς (TF) των τριών προσομοιωμάτων στα υπό εξέταση σημεία. Οι κατανομές αναφέρονται στην περίπτωση επιβολής παλμού Ricker με μέγιστη επιτάχυνση 0.1g και απορριμματικό υλικό Τύπου Α με σχέση απομείωσης του μέτρου διάτμησης-αύξησης της απόσβεσης σύμφωνα με τους Singh and Murphy (1990). ....                                                                                                                                                   | 167 |
| Σχήμα 4.15. Συναρτήσεις τοπογραφικής επιδείνωσης (TAF) των τριών προσομοιωμάτων στα υπό εξέταση σημεία. Οι κατανομές αναφέρονται στην περίπτωση επιβολής παλμού Ricker με μέγιστη επιτάχυνση 0.1g και απορριμματικό υλικό Τύπου Α με σχέση απομείωσης του μέτρου διάτμησης-αύξησης της απόσβεσης σύμφωνα με τους Singh and Murphy (1990). ....                                                                                                                                   | 168 |
| Σχήμα 4.16. Κατανομή του λόγου της μέγιστης κατακόρυφης επιτάχυνσης προς την μέγιστη επιβαλλόμενη επιτάχυνση ( $a_{\max, \text{ver}}/\text{PGA}$ ) κατά μήκος της επιφάνειας των τριών εξεταζόμενων προσομοιωμάτων. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται και για τις τρεις περιπτώσεις απορριμματικού υλικού με σχέση απομείωσης του μέτρου διάτμησης-αύξησης της απόσβεσης σύμφωνα με τους Singh and Murphy (1990) και για την επιβολή παλμού Ricker με μέγιστη επιτάχυνση 0.1g. .... | 169 |
| Σχήμα 4.17. Συναρτήσεις μεταφοράς (TF) των τριών προσομοιωμάτων στα υπό εξέταση σημεία. Οι κατανομές αναφέρονται στην περίπτωση επιβολής παλμού Ricker με μέγιστη επιτάχυνση 0.1g και απορριμματικό υλικό Τύπου Α με σχέση απομείωσης του μέτρου διάτμησης-αύξησης της απόσβεσης σύμφωνα με τον Zekkos (2005). ....                                                                                                                                                              | 171 |
| Σχήμα 4.18. Συναρτήσεις τοπογραφικής επιδείνωσης (TAF) των τριών προσομοιωμάτων στα υπό εξέταση σημεία. Οι κατανομές αναφέρονται στην περίπτωση επιβολής παλμού Ricker με μέγιστη επιτάχυνση 0.1g και απορριμματικό υλικό Τύπου Α με σχέση απομείωσης του μέτρου διάτμησης-αύξησης της απόσβεσης σύμφωνα με τον Zekkos (2005). ....                                                                                                                                              | 173 |
| Σχήμα 4.19. Κατανομή του λόγου της μέγιστης κατακόρυφης επιτάχυνσης προς την μέγιστη επιβαλλόμενη επιτάχυνση ( $a_{\max, \text{ver}}/\text{PGA}$ ) κατά μήκος της επιφάνειας των τριών εξεταζόμενων προσομοιωμάτων. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται και για τις τρεις περιπτώσεις απορριμματικού υλικού με σχέση απομείωσης του μέτρου διάτμησης-αύξησης της απόσβεσης                                                                                                            |     |



|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| σύμφωνα με τον Zekkos (2005) και για την επιβολή παλμού Ricker με μέγιστη επιτάχυνση 0.1g.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 174 |
| Σχήμα 4.20. Κατανομή του λόγου της μέγιστης οριζόντιας επιτάχυνσης από διδιάστατες αναλύσεις προς την αντίστοιχη από μονοδιάστατες (TAF) κατά μήκος της επιφάνειας των τριών εξεταζόμενων προσομοιωμάτων. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται για τις τρεις χρονοϊστορίες επιτάχυνσης με μέγιστη επιτάχυνση 0.1g και για απορριμματικό υλικό Τύπου Β με σχέση απομείωσης του μέτρου διάτμησης-αύξησης της απόσβεσης σύμφωνα με τον Zekkos (2005).                                                                                                        | 175 |
| Σχήμα 4.21. Κατανομή του λόγου της μέγιστης οριζόντιας επιτάχυνσης από διδιάστατες αναλύσεις προς την αντίστοιχη από μονοδιάστατες (TAF) κατά μήκος της επιφάνειας των τριών εξεταζόμενων προσομοιωμάτων. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται για τις τρεις χρονοϊστορίες επιτάχυνσης με μέγιστη επιτάχυνση 0.36g και για απορριμματικό υλικό Τύπου Β με σχέση απομείωσης του μέτρου διάτμησης-αύξησης της απόσβεσης σύμφωνα με τον Zekkos (2005).                                                                                                       | 176 |
| Σχήμα 4.22. Κατανομή του λόγου της μέγιστης κατακόρυφης επιτάχυνσης προς την μέγιστη επιβαλλόμενη επιτάχυνση ( $a_{\max,ver}/PGA$ ) κατά μήκος της επιφάνειας των τριών εξεταζόμενων προσομοιωμάτων. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται για τις τρεις χρονοϊστορίες επιτάχυνσης με μέγιστη επιτάχυνση 0.1g και για απορριμματικό υλικό Τύπου Β με σχέση απομείωσης του μέτρου διάτμησης-αύξησης της απόσβεσης σύμφωνα με τον Zekkos (2005).                                                                                                             | 178 |
| Σχήμα 4.23. Κατανομή του λόγου της μέγιστης κατακόρυφης επιτάχυνσης προς την μέγιστη επιβαλλόμενη επιτάχυνση ( $a_{\max,ver}/PGA$ ) κατά μήκος της επιφάνειας των τριών εξεταζόμενων προσομοιωμάτων. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται για τις τρεις χρονοϊστορίες επιτάχυνσης με μέγιστη επιτάχυνση 0.36g και για απορριμματικό υλικό Τύπου Β με σχέση απομείωσης του μέτρου διάτμησης-αύξησης της απόσβεσης σύμφωνα με τον Zekkos (2005).                                                                                                            | 179 |
| Σχήμα 4.24. Κατανομή του λόγου της ελαστικής προς την ισοδύναμα γραμμική ιδιοπερίοδο ( $T_e/T$ ) συναρτήσεως του λόγου της ισοδύναμα γραμμικής ιδιοπεριόδου προς τη δεσπόζουσα περίοδο της σεισμικής κίνησης. Τα αποτελέσματα παρατίθενται και για τα δύο επίπεδα ισχυρής εδαφικής επιτάχυνσης και τις δύο εξεταζόμενες συσχετίσεις απομείωσης του μέτρου διάτμησης-αύξησης της απόσβεσης.                                                                                                                                                          | 181 |
| Σχήμα 4.25. Κατανομή του λόγου: (α) της μέγιστης οριζόντιας επιτάχυνσης προς τη μέγιστη επιβαλλόμενη επιτάχυνση ( $MHA/PGA$ ), και (β) της μέγιστης παρασιτικής κατακόρυφης επιτάχυνσης προς τη μέγιστη επιβαλλόμενη επιτάχυνση ( $MVA/PGA$ ), συναρτήσεως του λόγου της ισοδύναμα γραμμικής ιδιοπεριόδου προς τη δεσπόζουσα περίοδο της σεισμικής κίνησης ( $T_{str}/T_d$ ). Τα αποτελέσματα παρατίθενται για ελαστική και ισοδύναμα γραμμική απόκριση και τις δύο εξεταζόμενες συσχετίσεις απομείωσης του μέτρου διάτμησης-αύξησης της απόσβεσης. | 182 |
| Σχήμα 4.26. Κατανομή του λόγου της μέγιστης οριζόντιας επιτάχυνσης από διδιάστατες αναλύσεις προς την αντίστοιχη από μονοδιάστατες αναλύσεις (TAF), συναρτήσεως του λόγου της ισοδύναμα γραμμικής ιδιοπεριόδου προς τη δεσπόζουσα περίοδο της σεισμικής κίνησης ( $T_{str}/T_d$ ). Τα αποτελέσματα παρατίθενται για ελαστική και ισοδύναμα γραμμική απόκριση και τις δύο εξεταζόμενες συσχετίσεις απομείωσης του μέτρου διάτμησης-αύξησης της απόσβεσης.                                                                                            | 183 |
| Σχήμα 4.27. Εξεταζόμενα προσομοιώματα για τη διερεύνηση της δυναμικής αλληλεπίδρασης Χ.Υ.Τ.Α. – εδάφους θεμελίωσης.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 186 |
| Σχήμα 4.28. Ο κοινός κάρναβος πεπερασμένων στοιχείων, που χρησιμοποιήθηκε στις δυναμικές αναλύσεις των τεσσάρων προσομοιωμάτων (Α, Β1, Β2 και Β3).                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 187 |
| Σχήμα 4.29. Συναρτήσεις μεταφοράς: (α) στην αιχμή του προσομοιώματος και (β) στη θέση του άξονα συμμετρίας για το προσομοίωμα Α, τον Χ.Υ.Τ.Α. του προσομοιώματος Β1, την εδαφική στρώση που υπόκειται του Χ.Υ.Τ.Α. στο προσομοίωμα Β1, και το συνολικό προσομοίωμα Β1. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται για γραμμικώς ελαστική απόκριση (άνω) και ισοδύναμα γραμμική απόκριση (κάτω) κατά την επιβολή παλμού Ricker.                                                                                                                                  | 188 |
| Σχήμα 4.30. Καθ' ύψος κατανομές της κανονικοποιημένης μέγιστης οριζόντιας επιτάχυνσης ως προς τη μέγιστη επιβαλλόμενη επιτάχυνση στην αιχμή του προσομοιώματος (Διατομή 1) και στη                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |     |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| θέση του άξονα συμμετρίας (Διατομή 2) για τα προσομοιώματα A και B1 και την επιβολή παλμού Ricker.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 190 |
| Σχήμα 4.31. Καθ' ύψος κατανομές της κανονικοποιημένης μέγιστης οριζόντιας επιτάχυνσης ως προς τη μέγιστη επιβαλλόμενη επιτάχυνση στην αιχμή του προσομοιώματος (Διατομή 1) και στη θέση του άξονα συμμετρίας (Διατομή 2) για το προσομοίωμα B1 και την επιβολή των τριών εξεταζόμενων χρονοϊστοριών επιτάχυνσης.....                                                                                                                                                                                                                                      | 191 |
| Σχήμα 4.32. Συναρτήσεις μεταφοράς (α) στην αιχμή του προσομοιώματος, και (β) στη θέση του άξονα συμμετρίας για τα προσομοιώματα B1 και B2, για την εδαφική στρώση που υπόκειται του προσομοιώματος B1 και του B2. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται για γραμμικώς ελαστική απόκριση και ισοδύναμα γραμμική απόκριση για την επιβολή παλμού Ricker. ....                                                                                                                                                                                                      | 193 |
| Σχήμα 4.33. Συναρτήσεις μεταφοράς: (α) στην αιχμή του προσομοιώματος και (β) στη θέση του άξονα συμμετρίας για τα προσομοιώματα B1 και B3, και την εδαφική στρώση που υπόκειται των προσομοιωμάτων B1 και B3. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται για γραμμικώς ελαστική απόκριση και ισοδύναμα γραμμική απόκριση για την επιβολή παλμού Ricker. ....                                                                                                                                                                                                          | 194 |
| Σχήμα 5.1. Κατανομή του λόγου: (α) της μέγιστης οριζόντιας ισοδύναμης επιτάχυνσης προς την μέγιστη επιβαλλόμενη επιτάχυνση (MHEA/PGA), και (β) της μέγιστης κατακόρυφης ισοδύναμης επιτάχυνσης προς τη μέγιστη επιβαλλόμενη επιτάχυνση (MVEA/PGA), συναρτήσει του λόγου της ισοδύναμα γραμμικής ιδιοπεριόδου προς τη δεσπόζουσα περίοδο της σεισμικής κίνησης ( $T_{str}/T_d$ ). Τα αποτελέσματα παρατίθενται για ελαστική και ισοδύναμα γραμμική απόκριση με τις δύο εξεταζόμενες συσχετίσεις απομείωσης του μέτρου διάτμησης-αύξησης της απόσβεσης..... | 211 |
| Σχήμα 5.2. Κατανομή του λόγου της κρίσιμης επιτάχυνσης προς τη μέγιστη οριζόντια ισοδύναμη επιτάχυνση ( $k_y/MHEA$ ) για τις δύο περιβάλλουσες αστοχίας: (α) συνοχή ίση με 15kPa και γωνία τριβής ίση με 34°, και (β) μηδενική συνοχή και γωνία τριβής ίση με 34°. Τα αποτελέσματα παρατίθενται για όλες τις αριθμητικές αναλύσεις της παραμετρικής διερεύνησης.....                                                                                                                                                                                      | 214 |
| Σχήμα 5.3. Κατανομή του ψευδοστατικού συντελεστή ασφαλείας (SF) υπολογισμένου με χρήση της μέγιστης τιμής της οριζόντιας ισοδύναμης επιτάχυνσης ως σεισμικό συντελεστή για τις δύο περιβάλλουσες αστοχίας: (α) συνοχή ίση με 15kPa και γωνία τριβής ίση με 34°, και (β) μηδενική συνοχή και γωνία τριβής ίση με 34°. Εκτιμάται και η επίδραση της κατακόρυφης συνιστώσας της ισοδύναμης επιτάχυνσης αντιστοίχως για τις δύο περιβάλλουσες (γ και δ). Τα αποτελέσματα παρατίθενται για όλες τις αριθμητικές αναλύσεις της παραμετρικής διερεύνησης.....    | 215 |
| Σχήμα 5.4. Κατανομή των παραμενουσών σεισμικών μετακινήσεων (d) συναρτήσει του λόγου της κρίσιμης επιτάχυνσης προς τη μέγιστη τιμή της οριζόντιας ισοδύναμης επιτάχυνσης για τις δύο περιβάλλουσες αστοχίας: (α) συνοχή ίση με 15kPa και γωνία τριβής ίση με 34°, και (β) μηδενική συνοχή και γωνία τριβής ίση με 34°.....                                                                                                                                                                                                                                | 216 |
| Σχήμα 5.5. Κατανομή του λόγου των παραμενουσών σεισμικών μετακινήσεων υπολογισμένων με τις δύο πιθανές φορές της ισοδύναμης επιτάχυνσης ( $d^+/d^*$ ) συναρτήσει του λόγου της κρίσιμης επιτάχυνσης προς τη μέγιστη τιμή της οριζόντιας ισοδύναμης επιτάχυνσης.....                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 217 |
| Σχήμα 5.6. Χρονοϊστορίες της ισοδύναμης και κρίσιμης επιτάχυνσης, της επιβαλλόμενης ταχύτητας και της ταχύτητας της επιφάνειας αστοχίας και της αθροιστικής ολίσθησης. Τα αποτελέσματα αντιστοιχούν σε: (α) λόγο $k_y/MHEA$ ίσο με 0.71 και επιβολή της καταγραφής του σεισμού του Kobe (1995), όπου για λόγους ευκρίνειας η ανάπτυξη της ολίσθησης παρουσιάζεται για $3sec < t < 7sec$ , και (β) λόγο $k_y/MHEA$ ίσο με 0.63 και επιβολή της καταγραφής του σεισμού του Αιγίου (1995).....                                                               | 219 |
| Σχήμα 5.7. Κατανομή των μόνιμων παραμορφώσεων συναρτήσει του λόγου της κρίσιμης επιτάχυνσης για μηδενική κατακόρυφη ισοδύναμη επιτάχυνση προς τη μέγιστη τιμή της οριζόντιας ισοδύναμης επιτάχυνσης. Τα αποτελέσματα υπολογίστηκαν με και χωρίς την συνεκτίμηση της κατακόρυφης ισοδύναμης επιτάχυνσης (MVEA). ....                                                                                                                                                                                                                                       | 220 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Σχήμα 5.8. Κατανομή του λόγου της μέγιστης οριζόντιας ισοδύναμης επιτάχυνσης προς τη μέγιστη επιβαλλόμενη επιτάχυνση ( $MHEA/PGA$ ), συναρτήσει του λόγου της ισοδύναμα γραμμικής ιδιοπεριόδου προς τη δεσπόζουσα περίοδο της σεισμικής κίνησης ( $T_{str}/T_d$ ). Τα αποτελέσματα παρατίθενται για ελαστική και ισοδύναμα γραμμική απόκριση και τις δύο εξεταζόμενες συσχετίσεις απομείωσης του μέτρου διάτμησης-αύξησης της απόσβεσης.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 223 |
| Σχήμα 5.9. Κατανομή του λόγου της κρίσιμης επιτάχυνσης προς τη μέγιστη οριζόντια ισοδύναμη επιτάχυνση ( $k_y/MHEA$ ) συναρτήσει του λόγου της ισοδύναμα γραμμικής ιδιοπεριόδου προς τη δεσπόζουσα περίοδο της σεισμικής κίνησης ( $T_{str}/T_d$ ) για τις δύο περιβάλλουσες αστοχίας: (α) γωνία τριβής ίση με $16.5^\circ$ , και (β) γωνία τριβής ίση με $11^\circ$ . Τα αποτελέσματα παρατίθενται για όλες τις αριθμητικές αναλύσεις της παραμετρικής διερεύνησης.....                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 224 |
| Σχήμα 5.10. Κατανομή του ψευδοστατικού συντελεστή ασφαλείας ( $SF$ ) συναρτήσει του λόγου της ισοδύναμα γραμμικής ιδιοπεριόδου προς τη δεσπόζουσα περίοδο της σεισμικής κίνησης ( $T_{str}/T_d$ ) υπολογισμένου με χρήση της μέγιστης τιμής της οριζόντιας ισοδύναμης επιτάχυνσης ως σεισμικό συντελεστή για τις δύο περιβάλλουσες αστοχίας: (α) γωνία τριβής ίση με $16.5^\circ$ , και (β) γωνία τριβής ίση με $11^\circ$ .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 225 |
| Σχήμα 5.11. Κατανομή των παραμενουσών σεισμικών μετακινήσεων ( $d$ ) συναρτήσει του λόγου της κρίσιμης επιτάχυνσης προς τη μέγιστη τιμή της οριζόντιας ισοδύναμης επιτάχυνσης για τις δύο περιβάλλουσες αστοχίας: (α) γωνία τριβής ίση με $16.5^\circ$ , και (β) γωνία τριβής ίση με $11^\circ$ . ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 226 |
| Σχήμα 5.12. Κατανομή του λόγου της μέγιστης οριζόντιας ισοδύναμης επιτάχυνσης για την κυκλική επιφάνεια αστοχίας προς την αντίστοιχη για αστοχία κατά μήκος του συστήματος στεγάνωσης ( $MHEA_{\text{κυκλ.}}/MHEA_{\Sigma,\Sigma}$ ), συναρτήσει του λόγου της ισοδύναμα γραμμικής ιδιοπεριόδου προς τη δεσπόζουσα περίοδο της σεισμικής κίνησης ( $T_{str}/T_d$ ). ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 227 |
| Σχήμα 5.13. Κατανομή του λόγου του συντελεστή ασφαλείας για την κυκλική επιφάνεια αστοχίας προς τον αντίστοιχο για αστοχία κατά μήκος του συστήματος στεγάνωσης ( $SF_{\text{κυκλ.}}/SF_{\Sigma,\Sigma}$ ), συναρτήσει του λόγου της ισοδύναμα γραμμικής ιδιοπεριόδου προς τη δεσπόζουσα περίοδο της σεισμικής κίνησης ( $T_{str}/T_d$ ). Τα αποτελέσματα παρατίθενται για τις δύο περιβάλλουσες του απορριμματικού υλικού, δηλαδή συνοχή ίση με $15\text{kPa}$ και γωνία τριβής ίση με $34^\circ$ (α και β), και μηδενική συνοχή και γωνία τριβής ίση με $34^\circ$ (γ και δ) και για τις δύο τιμές της γωνίας τριβής της διεπιφάνειας του συστήματος στεγάνωσης, δηλαδή γωνία τριβής ίση με $16.5^\circ$ (α και γ) και ίση με $11^\circ$ (β και δ). .... | 229 |
| Σχήμα 5.14. Κατανομή του λόγου των σεισμικών μετακινήσεων για την κυκλική επιφάνεια αστοχίας προς τις αντίστοιχες για αστοχία κατά μήκος του συστήματος στεγάνωσης ( $d_{\text{κυκλ.}}/d_{\Sigma,\Sigma}$ ), συναρτήσει του λόγου της ισοδύναμα γραμμικής ιδιοπεριόδου προς τη δεσπόζουσα περίοδο της σεισμικής κίνησης ( $T_{str}/T_d$ ). Τα αποτελέσματα παρατίθενται για τις δύο περιβάλλουσες του απορριμματικού υλικού, δηλαδή συνοχή ίση με $15\text{kPa}$ και γωνία τριβής ίση με $34^\circ$ (α) και μηδενική συνοχή και γωνία τριβής ίση με $34^\circ$ (β). ....                                                                                                                                                                                   | 230 |
| Σχήμα 5.15. Σχηματική απεικόνιση του απλοποιητικού μονοβάθμιου προσομοιώματος που προτάθηκε από τους Westermo and Udawadia (1983) για την εκτίμηση της συζευγμένης απόκρισης-ολίσθησης σε συστήματα σεισμικής μόνωσης.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 232 |
| Σχήμα 5.16. Κατανομή της μέγιστης τιμής του λόγου $\tan\phi \cdot g/\alpha_{\max}$ ώστε να είναι εφικτή η ανάπτυξη της ολίσθησης ( $\eta^*$ ) συναρτήσει του λόγου της ιδιοπεριόδου της κατασκευής προς την περίοδο της επιβαλλόμενης επιτάχυνσης. Τα αποτελέσματα παρατίθενται για: (α) τιμή του λόγου μαζών ( $\gamma$ ) ίση με τη μονάδα και διάφορες τιμές της απόσβεσης ( $\xi$ ), και (β) τιμή της απόσβεσης ίση με 5% και διάφορες τιμές του λόγου μαζών.....                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 233 |
| Σχήμα 5.17. Κατανομή του λόγου της κρίσιμης επιτάχυνσης προς την αντίστοιχη τιμή της μέγιστης επιβαλλόμενης επιτάχυνσης ( $k_y/\alpha_{\max}$ ) συναρτήσει του λόγου της ιδιοπεριόδου του μονοβάθμιου ταλαντωτή προς την περίοδο της αρμονικής φόρτισης. Τα αποτελέσματα υπολογίστηκαν για τιμή του λόγου μαζών ίση με τη μονάδα και απόσβεση ίση με 5%. Με σύμβολα αναπαρίστανται τα αντίστοιχα αποτελέσματα από αριθμητικές αναλύσεις.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 235 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Σχήμα 5.18. Χρονοϊστορίες της επιβαλλόμενης επιτάχυνσης/ταχύτητας, της επιτάχυνσης/ταχύτητας της επιφάνειας αστοχίας, και της συσσωρευόμενης ολίσθησης. Τα αποτελέσματα αντιστοιχούν σε προσομοίωμα χωρίς την προσθήκη μάζας στο επίπεδο ολίσθησης, σε συνθήκες συντονισμού και τιμή του λόγου $\tan\phi \cdot g / \alpha_{\max}$ ίση με 0.5. ....                                                                                                                                                                                                               | 238 |
| Σχήμα 5.19. Χρονοϊστορίες της αθροιστικής ολίσθησης κατά μήκος της βάσης του απλού μονοβάθμιου συστήματος, για διάφορες τιμές του λόγου της ιδιοπεριόδου του προσομοιώματος προς την περίοδο της αρμονικής επιβαλλόμενης επιτάχυνσης. Τα αποτελέσματα αντιστοιχούν σε τιμή του λόγου $\tan\phi \cdot g / \alpha_{\max}$ ίση με 0.5. ....                                                                                                                                                                                                                         | 240 |
| Σχήμα 5.20. Χρονοϊστορίες της αθροιστικής ολίσθησης κατά μήκος της βάσης του απλού μονοβάθμιου συστήματος, για διάφορες τιμές του λόγου της ιδιοπεριόδου του προσομοιώματος προς την περίοδο της αρμονικής επιβαλλόμενης επιτάχυνσης. Τα αποτελέσματα αντιστοιχούν σε τιμή του λόγου $\tan\phi \cdot g / \alpha_{\max}$ ίση με 0.2. ....                                                                                                                                                                                                                         | 241 |
| Σχήμα 5.21. Χρονοϊστορίες της αθροιστικής ολίσθησης κατά μήκος της βάσης του απλού μονοβάθμιου συστήματος, για διάφορες τιμές του λόγου της ιδιοπεριόδου του προσομοιώματος προς την περίοδο της αρμονικής επιβαλλόμενης επιτάχυνσης. Τα αποτελέσματα αντιστοιχούν σε τιμή του λόγου $\tan\phi \cdot g / \alpha_{\max}$ ίση με 1.0. ....                                                                                                                                                                                                                         | 242 |
| Σχήμα 5.22. Κανονικοποίηση της παραμένουσας ολίσθησης του απλού μονοβάθμιου συστήματος σε σχέση με: (α) τη μέγιστη επιτάχυνση, και (β) το τετράγωνο της περιόδου της επιβαλλόμενης φόρτισης. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 244 |
| Σχήμα 5.23. Χρονοϊστορίες της επιβαλλόμενης επιτάχυνσης/ταχύτητας, της επιτάχυνσης/ταχύτητας της επιφάνειας αστοχίας και της αθροιστικής ολίσθησης. Τα αποτελέσματα αντιστοιχούν σε προσομοίωμα με τιμή του λόγου μαζών ίση με 0.95, σε συνθήκες συντονισμού και τιμή του λόγου $\tan\phi \cdot g / \alpha_{\max}$ ίση με 0.5. ....                                                                                                                                                                                                                              | 246 |
| Σχήμα 5.24. Χρονοϊστορίες της επιβαλλόμενης επιτάχυνσης/ταχύτητας, της επιτάχυνσης/ταχύτητας της επιφάνειας αστοχίας και της αθροιστικής ολίσθησης. Τα αποτελέσματα αντιστοιχούν σε προσομοίωμα με τιμή του λόγου μαζών ίση με 0.95, σε συνθήκες συντονισμού και τιμή του λόγου $\tan\phi \cdot g / \alpha_{\max}$ ίση με 0.5. Η απόσβεση θεωρείται ότι είναι τύπου Rayleigh. ....                                                                                                                                                                               | 249 |
| Σχήμα 5.25 Χρονοϊστορίες της αθροιστικής ολίσθησης κατά μήκος της βάσης του απλού μονοβάθμιου συστήματος, για διάφορες τιμές του λόγου της ιδιοπεριόδου του προσομοιώματος προς την περίοδο της αρμονικής επιβαλλόμενης επιτάχυνσης. Παρουσιάζονται επίσης οι αντίστοιχες χρονοϊστορίες της επιτάχυνσης στην κορυφή του ταλαντωτή. Τα αποτελέσματα αντιστοιχούν σε τιμή του λόγου $\tan\phi \cdot g / \alpha_{\max}$ ίση με 0.5. ....                                                                                                                            | 250 |
| Σχήμα 5.26 Χρονοϊστορίες της αθροιστικής ολίσθησης κατά μήκος της βάσης του απλού μονοβάθμιου συστήματος, για διάφορες τιμές του λόγου $\tan\phi \cdot g / \alpha_{\max}$ . Παρουσιάζονται επίσης οι αντίστοιχες χρονοϊστορίες της επιτάχυνσης στην κορυφή του ταλαντωτή. Τα αποτελέσματα αντιστοιχούν σε τιμή του λόγου της ιδιοπεριόδου του προσομοιώματος προς την περίοδο της αρμονικής επιβαλλόμενης επιτάχυνσης ίση με τη μονάδα (συντονισμός). ....                                                                                                       | 252 |
| Σχήμα 5.27 Σχηματική απεικόνιση του απλού προσομοιώματος υπολογισμού διπλής ολίσθησης σύμφωνα με τις βασικές παραδοχές του κλασσικού προσομοιώματος Newmark (1965). ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 253 |
| Σχήμα 5.28 Σχηματική απεικόνιση του αριθμητικού προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων που αναπτύχθηκε προκειμένου να διαπιστωθεί η ακρίβεια του προτεινόμενου ημι-αναλυτικού προσομοιώματος υπολογισμού διπλής ολίσθησης. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 256 |
| Σχήμα 5.29. Χαρακτηριστικό παράδειγμα εκτίμησης διπλής ολίσθησης, για το οποίο ο λόγος μαζών είναι ίσος με 0.1, η κλίση του άνω επιπέδου είναι ίση με 15° και οι γωνίες τριβής κατά μήκος της άνω και κάτω διεπιφάνειας είναι 23° και 16°, αντίστοιχα. Παρουσιάζονται οι χρονοϊστορίες της επιβαλλόμενης επιτάχυνσης/ταχύτητας, της επιτάχυνσης/ταχύτητας των δύο επιφανειών αστοχίας, καθώς και της αθροιστικής ολίσθησης κατά μήκος της άνω διεπιφάνειας ( $d_1$ ) και κατά μήκος της κάτω διεπιφάνειας ( $d_2$ ). Τα αποτελέσματα προέκυψαν για την περίπτωση |     |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| επιβαλλόμενης διέγερσης παλμού Ricker με μέγιστη επιτάχυνση 0.5g. Στο τελευταίο γράφημα απεικονίζονται με σύμβολα τα αποτελέσματα της αντίστοιχης αριθμητικής ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία για αντιπαραβολή με την ημι-αναλυτική μεθοδολογία.....                                                                                                                                                                                                                                                        | 258 |
| Σχήμα 5.30 Κατανομή του λόγου της ολίσθησης του άνω τεμάχους προς την αντίστοιχη του κάτω ( $d_1/d_2$ ) συναρτήσει του λόγου της κρίσιμης επιτάχυνσης των δύο επιφανειών ολίσθησης ( $\tan(\varphi_1 - \alpha)/\tan\varphi_2$ ). Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται για τιμή της γωνίας του άνω επιπέδου ολίσθησης ίση με $10^\circ$ και διάφορες τιμές του λόγου μαζών, και αντιστοιχούν στην περίπτωση επιβαλλόμενης διέγερσης παλμού Ricker με μέγιστη επιτάχυνση 0.5g. ....                                  | 260 |
| Σχήμα 5.31 Κατανομή του λόγου της ολίσθησης του άνω τεμάχους προς την αντίστοιχη του κάτω ( $d_1/d_2$ ) συναρτήσει του λόγου της κρίσιμης επιτάχυνσης των δύο επιφανειών ολίσθησης ( $\tan(\varphi_1 - \alpha)/\tan\varphi_2$ ). Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται για τιμή της γωνίας του άνω επιπέδου ολίσθησης ίση με $15^\circ$ και διάφορες τιμές του λόγου μαζών, και αντιστοιχούν στην περίπτωση επιβαλλόμενης διέγερσης παλμού Ricker με μέγιστη επιτάχυνση 0.5g. ....                                  | 262 |
| Σχήμα 5.32 Κατανομή του λόγου της ολίσθησης του άνω τεμάχους προς την αντίστοιχη του κάτω ( $d_1/d_2$ ) συναρτήσει του λόγου της κρίσιμης επιτάχυνσης των δύο επιφανειών ολίσθησης ( $\tan(\varphi_1 - \alpha)/\tan\varphi_2$ ). Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται για τιμή της γωνίας του άνω επιπέδου ολίσθησης ίση με $20^\circ$ και διάφορες τιμές του λόγου μαζών, και αντιστοιχούν στην περίπτωση επιβαλλόμενης διέγερσης παλμού Ricker με μέγιστη επιτάχυνση 0.5g. ....                                  | 263 |
| Σχήμα 5.33 Κατανομή του λόγου της ολίσθησης του άνω και κάτω τεμάχους όπως υπολογίστηκαν από το προσομοίωμα διπλής ολίσθησης προς τις αντίστοιχες που υπολογίστηκαν από το κλασσικό προσομοίωμα Newmark, συναρτήσει του λόγου της κρίσιμης επιτάχυνσης των δύο επιφανειών ολίσθησης ( $\tan(\varphi_1 - \alpha)/\tan\varphi_2$ ). Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται για τιμή του λόγου μαζών ίση με 0.30, και αντιστοιχούν στην περίπτωση επιβαλλόμενης διέγερσης παλμού Ricker με μέγιστη επιτάχυνση 0.5g..... | 265 |
| Σχήμα 6.1. Σχηματική απεικόνιση της θεώρησης δύο προδιαγεγραμμένων επιφανειών εντός του συστήματος στεγάνωσης (Σ.Σ.) με μάζα $m_2$ ενός υπέργειου Χ.Υ.Τ.Α. με μάζα $m_1$ .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 275 |
| Σχήμα 6.2. Κατανομή της κρίσιμης επιτάχυνσης της κατώτερης διεπιφάνειας ολίσθησης συναρτήσει της διατμητικής αντοχής της, για διάφορες τιμές της διατμητικής αντοχής της ανώτερης διεπιφάνειας και για διάφορες τιμές του λόγου μαζών. Τα αποτελέσματα προϋποθέτουν μικρότερη διατμητική αντοχή κατά μήκος της ανώτερης διεπιφάνειας. ....                                                                                                                                                                   | 277 |
| Σχήμα 6.3. Τυπική διατομή του εξεταζόμενου υπέργειου Χ.Υ.Τ.Α. Με διακεκομμένη γραμμή αναπαρίσταται η θέση της γεωμεμβράνης στεγάνωσης. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 278 |
| Σχήμα 6.4. Λεπτομέρεια του καννάβου πεπερασμένων στοιχείων που αναπτύχθηκε για την διενέργεια της παραμετρικής διερεύνησης. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 278 |
| Σχήμα 6.5. Κατανομή της στατικής ορθής ( $\sigma_{n\text{στατ.}}$ ) και της διατμητικής ( $\tau_{\text{στατ.}}$ ) τάσης κατά μήκος της γεωμεμβράνης στεγάνωσης. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 279 |
| Σχήμα 6.6. Χρονοϊστορίες επιτάχυνσης για τις τρεις σεισμικές καταγραφές που χρησιμοποιήθηκαν στην παραμετρική διερεύνηση ανηγμένες σε μέγιστη επιτάχυνση ίση με 0.4g. Παρουσιάζονται και τα αντίστοιχα ελαστικά φάσματα απόκρισης για απόσβεση ίση με 5%. ....                                                                                                                                                                                                                                               | 281 |
| Σχήμα 6.7. Χρονοϊστορίες της ολίσθησης ( $d$ ), της ταχύτητας ( $v$ ), της διατμητικής ( $\tau$ ) και ορθής τάσης ( $\sigma_n$ ), τριών χαρακτηριστικών θέσεων κατά μήκος της γεωμεμβράνης. Τα αποτελέσματα αντιστοιχούν σε λόγο της ιδιοπεριόδου της κατασκευής (0.29sec) προς την περίοδο του ημιτονοειδούς παλμού ίσο με μονάδα και για λόγο $\tan\varphi \cdot g/\alpha_{\max}$ ίσο με 0.5.....                                                                                                          | 283 |
| Σχήμα 6.8. Χρονοϊστορίες της ολίσθησης ( $d$ ), της ταχύτητας ( $v$ ), της διατμητικής ( $\tau$ ) και ορθής τάσης ( $\sigma_n$ ), τριών χαρακτηριστικών θέσεων κατά μήκος της γεωμεμβράνης. Τα αποτελέσματα αντιστοιχούν σε λόγο της ιδιοπεριόδου της κατασκευής (0.57sec) προς την περίοδο του ημιτονοειδούς παλμού (0.29sec) περίπου ίσο με 2 και για λόγο $\tan\varphi \cdot g/\alpha_{\max}$ ίσο με 0.5. ....                                                                                            | 287 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Σχήμα 6.9. Χρονοϊστορίες της ολίσθησης (d), της ταχύτητας (v), της διατμητικής (τ) και ορθής τάσης ( $\sigma_n$ ), τριών χαρακτηριστικών θέσεων κατά μήκος της γεωμεμβράνης. Τα αποτελέσματα αντιστοιχούν σε λόγο της ιδιοπεριόδου της κατασκευής (0.38sec) προς την περίοδο του ημιτονοειδούς παλμού (0.29sec) περίπου ίσο με 1.33 και για λόγο $\tan\phi^*g/\alpha_{\max}$ ίσο με 0.5.....                                                      | 288 |
| Σχήμα 6.10. Χρονοϊστορίες της ολίσθησης (d), της ταχύτητας (v), της διατμητικής (τ) και ορθής τάσης ( $\sigma_n$ ), τριών χαρακτηριστικών θέσεων κατά μήκος της γεωμεμβράνης. Τα αποτελέσματα αντιστοιχούν σε λόγο της ιδιοπεριόδου της κατασκευής (0.22sec) προς την περίοδο του ημιτονοειδούς παλμού (0.29sec) περίπου ίσο με 0.77 και για λόγο $\tan\phi^*g/\alpha_{\max}$ ίσο με 0.5.....                                                     | 289 |
| Σχήμα 6.11. Χρονοϊστορίες της ολίσθησης (d), της ταχύτητας (v), της διατμητικής (τ) και ορθής τάσης ( $\sigma_n$ ), τριών χαρακτηριστικών θέσεων κατά μήκος της γεωμεμβράνης. Τα αποτελέσματα αντιστοιχούν σε λόγο της ιδιοπεριόδου της κατασκευής (0.19sec) προς την περίοδο του ημιτονοειδούς παλμού (0.29sec) περίπου ίσο με 0.63 και για λόγο $\tan\phi^*g/\alpha_{\max}$ ίσο με 0.5.....                                                     | 290 |
| Σχήμα 6.12. Χρονοϊστορίες της ολίσθησης (d), της ταχύτητας (v), της διατμητικής (τ) και ορθής τάσης ( $\sigma_n$ ), τριών χαρακτηριστικών θέσεων κατά μήκος της γεωμεμβράνης. Τα αποτελέσματα αντιστοιχούν σε λόγο της ιδιοπεριόδου της κατασκευής (0.29sec) προς την περίοδο του ημιτονοειδούς παλμού (1.44sec) περίπου ίσο με 0.2 και για λόγο $\tan\phi^*g/\alpha_{\max}$ ίσο με 0.5.....                                                      | 291 |
| Σχήμα 6.13. Χρονοϊστορίες της ολίσθησης (d), της ταχύτητας (v), της διατμητικής (τ) και ορθής τάσης ( $\sigma_n$ ), τριών χαρακτηριστικών θέσεων κατά μήκος της γεωμεμβράνης. Τα αποτελέσματα αντιστοιχούν σε λόγο της ιδιοπεριόδου της κατασκευής (0.29sec) προς την περίοδο του ημιτονοειδούς παλμού (0.057sec) περίπου ίσο με 5 και για λόγο $\tan\phi^*g/\alpha_{\max}$ ίσο με 0.5.....                                                       | 293 |
| Σχήμα 6.14. Χρονοϊστορίες της ολίσθησης (d) των τριών χαρακτηριστικών θέσεων κατά μήκος της γεωμεμβράνης για τις καταγραφές των σεισμών της Λευκάδας (2003), της Αθήνας (Σεπόλια, 1999), και του Duzce (Bolu, 1999). Τα αποτελέσματα αντιστοιχούν σε λόγο της ιδιοπεριόδου της κατασκευής (0.29sec) και για λόγο $\tan\phi^*g/\alpha_{\max}$ ίσο με 0.5, με μέγιστη επιτάχυνση ίση με 0.4g..                                                      | 294 |
| Σχήμα 6.15. Χρονοϊστορίες της ολίσθησης (d), της ταχύτητας (v), της διατμητικής (τ) και ορθής τάσης ( $\sigma_n$ ), τριών χαρακτηριστικών θέσεων κατά μήκος της γεωμεμβράνης. Τα αποτελέσματα αντιστοιχούν σε λόγο της ιδιοπεριόδου της κατασκευής (0.29sec) προς την περίοδο του ημιτονοειδούς παλμού ίσο με μονάδα και για λόγο $\tan\phi^*g/\alpha_{\max}$ ίσο για 2, με μέγιστη επιτάχυνση ίση με 0.1g.....                                   | 295 |
| Σχήμα 6.16. Κανονικοποίηση της παραμένουσας ολίσθησης ως προς το τετράγωνο της περιόδου. Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα δύο προσομοιωμάτων με λόγο $T_{\text{str}}/T$ ίσο με τη μονάδα και λόγο $\tan\phi^*g/\alpha_{\max}$ ίσο με 0.5. Η περίοδος του παλμού ημιτόνου και συνεπώς και η ιδιοπερίοδος του κάθε προσομοιώματος είναι ίση προς 0.29sec και 0.58sec, αντίστοιχα.....                                                                 | 297 |
| Σχήμα 6.17. Κανονικοποίηση της παραμένουσας ολίσθησης ως προς την μέγιστη επιβαλλόμενη επιτάχυνση. Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα δύο προσομοιωμάτων με λόγο $T_{\text{str}}/T$ ίσο με τη μονάδα και ίδιο λόγο $\tan\phi^*g/\alpha_{\max}$ ίσο με 0.5. Για την πρώτη περίπτωση η γωνία τριβής είναι ίση με 11° και η μέγιστη επιτάχυνση ίση με 0.4g και για τη δεύτερη η γωνία τριβής είναι ίση με 8.5° και η μέγιστη επιτάχυνση ίση με 0.3g..... | 297 |
| Σχήμα 6.18. Κατανομή της κανονικοποιημένης παραμένουσας σεισμικής μετακίνησης κατά μήκος της κατώτερης διεπιφάνειας της γεωμεμβράνης για διάφορες τιμές του λόγου $T_{\text{str}}/T$ . Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για: (α) τιμή του λόγου $\tan\phi^*g/\alpha_{\max}$ ίση με 0.5, και (β) τιμή του λόγου $\tan\phi^*g/\alpha_{\max}$ ίση με 2.0.....                                                                                          | 299 |
| Σχήμα 6.19. Κατανομή της κανονικοποιημένης παραμένουσας σεισμικής μετακίνησης κατά μήκος της κατώτερης διεπιφάνειας της γεωμεμβράνης για τις τρεις σεισμικές καταγραφές του σεισμού της Λευκάδας (2003), της Αθήνας (Σεπόλια, 1999) και του Duzce (Bolu, 1999). Τα αποτελέσματα αντιστοιχούν σε ιδιοπερίοδο της κατασκευής (0.29sec) και για λόγο $\tan\phi^*g/\alpha_{\max}$ ίσο με 0.5, που προκύπτει για μέγιστη επιτάχυνση ίση με 0.4g.....   | 300 |
| Σχήμα 6.20. Κατανομή της κανονικοποιημένης παραμένουσας σεισμικής μετακίνησης κατά μήκος της κατώτερης διεπιφάνειας της γεωμεμβράνης. Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για: (α)                                                                                                                                                                                                                                                                     |     |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| διάφορες τιμές του λόγου $T_{str}/T$ και τιμή του λόγου $\tan\phi^*g/\alpha_{max}$ ίση με 0.5, και (β) διάφορες τιμές του λόγου $\tan\phi^*g/\alpha_{max}$ και τιμή του λόγου $T_{str}/T$ ίση με 1.0. Οι καμπύλες με τα σύμβολα αντιστοιχούν στα αποτελέσματα των διδασμάτων αριθμητικών αναλύσεων ενώ οι ευθείες γραμμές στα αποτελέσματα του απλοποιητικού προσομοιώματος. ....                                                                                                                                     | 303 |
| Σχήμα 6.21. Χρονοϊστορίες της επιτάχυνσης της επιβαλλόμενης διέγερσης στη θέση του άξονα συμμετρίας και στην αιχμή του πρηνούς για την περίπτωση: (α) δυνατή ανάπτυξη ολίσθησης και συζευγμένη απόκριση και (β) μη ανάπτυξη ολίσθησης. Τα αποτελέσματα αντιστοιχούν σε λόγο της ιδιοπερίοδου της κατασκευής (0.29sec) προς την περίοδο του ημιτονοειδούς παλμού ίσο με μονάδα και για λόγο $\tan\phi^*g/\alpha_{max}$ ίσο με 0.5. ....                                                                                | 305 |
| Σχήμα 6.22. Χρονοϊστορίες της επιτάχυνσης της επιβαλλόμενης διέγερσης στη θέση του άξονα συμμετρίας και στην αιχμή του πρηνούς για ιδιοπερίοδο του προσομοιώματος ίση με: (α) 0.57sec, (β) 0.38sec, (γ) 0.22sec, και (δ) 0.19sec. Τα αποτελέσματα αντιστοιχούν σε περίοδο του ημιτονοειδούς παλμού ίση με 0.29sec και για λόγο $\tan\phi^*g/\alpha_{max}$ ίσο με 0.5. ....                                                                                                                                            | 307 |
| Σχήμα 6.23. Χρονοϊστορίες της επιτάχυνσης της επιβαλλόμενης διέγερσης στη θέση του άξονα συμμετρίας και στην αιχμή του πρηνούς για περίοδο του ημιτονοειδούς παλμού ίση με: (α) 1.44sec, και (β) 0.057sec. Τα αποτελέσματα αντιστοιχούν σε ιδιοπερίοδο του προσομοιώματος ίση με 0.29sec και για λόγο $\tan\phi^*g/\alpha_{max}$ ίσο με 0.5. ....                                                                                                                                                                     | 308 |
| Σχήμα 6.24. Χρονοϊστορίες της επιτάχυνσης της επιβαλλόμενης διέγερσης στη θέση του άξονα συμμετρίας και στην αιχμή του πρηνούς για τις τρεις σεισμικές καταγραφές της Λευκάδας (2003), της Αθήνας (Σεπόλια, 1999) και του Duzce (Bolu, 1999). Τα αποτελέσματα αντιστοιχούν σε ιδιοπερίοδο του προσομοιώματος ίση με 0.29sec και για λόγο $\tan\phi^*g/\alpha_{max}$ ίσο με 0.5. ....                                                                                                                                  | 309 |
| Σχήμα 6.25. Χρονοϊστορίες της επιτάχυνσης της επιβαλλόμενης διέγερσης στη θέση του άξονα συμμετρίας και στην αιχμή του πρηνούς για ιδιοπερίοδο του προσομοιώματος ίση με: (α) 0.57sec, (β) 0.38sec, (γ) 0.22sec, και (δ) 0.19sec. Τα αποτελέσματα αντιστοιχούν σε περίοδο του παλμού ημιτόνου ίση με 0.29sec και για λόγο $\tan\phi^*g/\alpha_{max}$ ίσο με 2.0. ....                                                                                                                                                 | 311 |
| Σχήμα 6.26. Χρονοϊστορίες της επιτάχυνσης της επιβαλλόμενης διέγερσης στη θέση του άξονα συμμετρίας και στην αιχμή του πρηνούς για τις περιπτώσεις των προσομοιωμάτων με: (α) ιδιοπερίοδο του προσομοιώματος και περίοδο του ημιτονοειδούς παλμού ίση με 0.57sec, γωνία τριβής ίση με 11° και μέγιστη επιβαλλόμενη επιτάχυνση ίση με 0.4g, και (β) ιδιοπερίοδο του προσομοιώματος και περίοδο του ημιτονοειδούς παλμού ίση με 0.29sec, γωνία τριβής ίση με 8.5° και μέγιστη επιβαλλόμενη επιτάχυνση ίση με 0.3g. .... | 312 |
| Σχήμα 6.27. Χρονοϊστορίες της αξονικής παραμόρφωσης τριών χαρακτηριστικών θέσεων κατά μήκος της γεωμεμβράνης. Τα αποτελέσματα αντιστοιχούν σε λόγο της ιδιοπερίοδου της κατασκευής (0.29sec) προς την περίοδο του ημιτονοειδούς παλμού ίσο με μονάδα και για λόγο $\tan\phi^*g/\alpha_{max}$ ίσο με 0.5. ....                                                                                                                                                                                                         | 314 |
| Σχήμα 6.28. Χρονοϊστορίες της αξονικής παραμόρφωσης τριών χαρακτηριστικών θέσεων κατά μήκος της γεωμεμβράνης για ιδιοπερίοδο του προσομοιώματος ίση με: (α) 0.57sec, (β) 0.38sec, (γ) 0.22sec, και (δ) 0.19sec. Τα αποτελέσματα αντιστοιχούν σε περίοδο του παλμού ημιτόνου ίση με 0.29sec και για λόγο $\tan\phi^*g/\alpha_{max}$ ίσο με 0.5. ....                                                                                                                                                                   | 316 |
| Σχήμα 6.29. Χρονοϊστορίες της αξονικής παραμόρφωσης τριών χαρακτηριστικών θέσεων για περίοδο του ημιτονοειδούς παλμού ίση με: (α) 1.44sec, και (β) 0.057sec. Τα αποτελέσματα αντιστοιχούν σε ιδιοπερίοδο του προσομοιώματος ίση με 0.29sec και για λόγο $\tan\phi^*g/\alpha_{max}$ ίσο με 0.5. ....                                                                                                                                                                                                                   | 317 |
| Σχήμα 6.30. Χρονοϊστορίες της αξονικής παραμόρφωσης τριών χαρακτηριστικών θέσεων για τις τρεις σεισμικές καταγραφές του σεισμού της Λευκάδας (2003), της Αθήνας (Σεπόλια, 1999), και του Duzce (Bolu, 1999). Τα αποτελέσματα αντιστοιχούν σε ιδιοπερίοδο του προσομοιώματος ίση με 0.29sec και για λόγο $\tan\phi^*g/\alpha_{max}$ ίσο με 0.5. ....                                                                                                                                                                   | 318 |
| Σχήμα 6.31. Χρονοϊστορίες της αξονικής παραμόρφωσης τριών χαρακτηριστικών θέσεων κατά μήκος της γεωμεμβράνης για ιδιοπερίοδο του προσομοιώματος ίση με: (α) 0.57sec, (β) 0.38sec, (γ)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |     |

0.22sec, και (δ) 0.19sec. Τα αποτελέσματα αντιστοιχούν σε περίοδο του παλμού ημιτόνου ίση με 0.29sec και για λόγο  $\tan\phi \cdot g / \alpha_{\max}$  ίσο με 2.0..... 319

Σχήμα 6.32. Κανονικοποίηση της παραμένουσας αξονικής παραμόρφωσης της γεωμεμβράνης ως προς το τετράγωνο της περιόδου του παλμού ημιτόνου και ως προς τη μέγιστη επιβαλλόμενη επιτάχυνση. Συγκρίνονται τα αποτελέσματα της περίπτωσης όπου η ιδιοπερίοδος του προσομοιώματος και η περίοδος του παλμού ημιτόνου είναι ίση με 0.57sec, με τα αντίστοιχα όπου η ιδιοπερίοδος του προσομοιώματος και η περίοδος του παλμού ημιτόνου ίση με 0.29sec. Και για τις δύο περιπτώσεις η γωνία τριβής είναι ίση με  $11^\circ$ , και η μέγιστη επιβαλλόμενη επιτάχυνση ίση με 0.4g. Επίσης συγκρίνονται τα αποτελέσματα της τελευταίας περίπτωσης μεταβάλλοντας τη γωνία τριβής ( $8.5^\circ$ ) και τη μέγιστη επιβαλλόμενη επιτάχυνση σε 0.3g. .... 321

Σχήμα 6.33. Κατανομή της κανονικοποιημένης παραμένουσας αξονικής παραμόρφωσης κατά μήκος της γεωμεμβράνης για διάφορες τιμές του λόγου  $T_{\text{str}}/T$ . Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για: (α) τιμή του λόγου  $\tan\phi \cdot g / \alpha_{\max}$  ίση με 0.5, και (β) τιμή του λόγου  $\tan\phi \cdot g / \alpha_{\max}$  ίση με 2.0.. 322

Σχήμα 6.34. Κατανομή της κανονικοποιημένης παραμένουσας αξονικής παραμόρφωσης κατά μήκος της γεωμεμβράνης για τις τρεις σεισμικές καταγραφές της Λευκάδας (2003), της Αθήνας (Σεπόλια, 1999) και του Duzce (Bolu, 1999). Τα αποτελέσματα αντιστοιχούν σε ιδιοπερίοδο της κατασκευής 0.29sec και σε λόγο  $\tan\phi \cdot g / \alpha_{\max}$  ίσο με 0.5, με μέγιστη επιτάχυνση ίση με 0.4g..... 323

Σχήμα 7.1. Προτεινόμενη διαδικασία επιλογής μέτρων προστασίας έναντι τεκτονικής διάρρηξης. .... 333

Σχήμα 7.2. Προτεινόμενο φάσμα προσεγγιστικής εκτίμησης των σεισμικών συντελεστών κατά την ψευδοστατική ανάλυση κυκλικών επιφανειών αστοχίας των απορριμματικών πρανών. .... 335



## Κατάλογος πινάκων

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Πίνακας 2.1. Συνιστώμενες ελάχιστες τιμές του συντελεστή ασφαλείας σε αναλύσεις ευστάθειας πρανών σύμφωνα με Subpart B (EPA, 1993).....                                                                                                                                                                                                                                                             | 13  |
| Πίνακας 2.2. Συγκεντρωτικά στοιχεία βλαβών που έχουν παρατηρηθεί σε Χ.Υ.Τ.Α. έπειτα από τους σεισμούς San Fernando (S. F.), Whittier Narrows (W. N.), Loma Prieta (L. P.), Landers (L.), Northridge (No.), Chi-Chi (C.-C.), και Nisqualli (Ni.).....                                                                                                                                                | 27  |
| Πίνακας 2.3. Συγκεντρωτικά στοιχεία παραμέτρων διατμητικής αντοχής για απορριμματικό υλικό. Παρατίθενται αποτελέσματα από δημοσιευμένα στοιχεία (Δ.Σ.), ανάστροφες αναλύσεις (Α.Α.), δοκιμές άμεσης διάτμησης (Α.Δ.), δοκιμές άμεσης απλής διάτμησης (Α.Α.Δ.), τριαξονικές δοκιμές (Τ.Δ.), αστράγγιστες τριαξονικές δοκιμές (Α.Τ.Δ.) και αστράγγιστες τριαξονικές δοκιμές συμπίεσης (Α.Τ.Δ.Σ.)..... | 50  |
| Πίνακας 2.4. Συγκεντρωτικά στοιχεία παραμέτρων διατμητικής αντοχής για διεπιφάνεια αργίλου με γεωμεμβράνη. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 56  |
| Πίνακας 2.5. Συγκεντρωτικά στοιχεία παραμέτρων διατμητικής αντοχής για διεπιφάνεια κοκκώδους εδάφους με γεωμεμβράνη ή γεωόφασμα.....                                                                                                                                                                                                                                                                | 59  |
| Πίνακας 2.6. Συγκεντρωτικά στοιχεία παραμέτρων διατμητικής αντοχής για διεπιφάνεια γεωμεμβράνης με γεωόφασμα. Οι συντομογραφίες αναφέρονται σε Μ: μονόκλωνο, Τ: ταινία, Κ: κλωστή, Υ: υφασμένο, Μ.Υ.: μη-υφασμένο, Β: βελονοδιάτρητο, ΚΥ: κυλινδρισμός, Θ.Σ.: θερμικά συγκολλημένα. ....                                                                                                            | 66  |
| Πίνακας 2.7. Συγκεντρωτικά στοιχεία παραμέτρων διατμητικής αντοχής για τις πιθανές διεπιφάνειες ενός σύνθετου συστήματος στεγάνωσης Χ.Υ.Τ.Α.....                                                                                                                                                                                                                                                    | 70  |
| Πίνακας 2.8. Συγκεντρωτικά στοιχεία παραμέτρων διατμητικής αντοχής για τις τρεις κυριότερες διεπιφάνειες ενός σύνθετου συστήματος στεγάνωσης Χ.Υ.Τ.Α.....                                                                                                                                                                                                                                           | 71  |
| Πίνακας 3.1. Μέγεθος της κατακόρυφης συνιστώσας της μετακίνησης του ρήγματος (σε cm) που απαιτείται για την εκδήλωση των τριών σταθμών βλάβης για καθένα από τα επτά εξεταζόμενα σενάρια ενίσχυσης. ....                                                                                                                                                                                            | 118 |
| Πίνακας 3.2. Αποτελεσματικότητα των εναλλακτικών μέτρων προστασίας εκφρασμένη ως η ποσοστιαία αύξηση της κατακόρυφης συνιστώσας της μετακίνησης για την ανάπτυξη της κάθε στάθμης βλάβης.....                                                                                                                                                                                                       | 119 |
| Πίνακας 3.3. Απαιτούμενη κατακόρυφη συνιστώσα της μετακίνησης για την ανάπτυξη της κάθε στάθμης βλάβης σε κάθε εξεταζόμενη περίπτωση τεχνητού επιχώματος.....                                                                                                                                                                                                                                       | 133 |
| Πίνακας 3.4. Αποτελεσματικότητα των εξεταζόμενων διατάξεων οπλισμένων ή μη επιχωμάτων εκφρασμένη ως η ποσοστιαία αύξηση της κατακόρυφης συνιστώσας της μετακίνησης για την ανάπτυξη της κάθε στάθμης βλάβης. ....                                                                                                                                                                                   | 134 |
| Πίνακας 3.5. Μέγιστη αξονική τάση επί του κατώτερου γεωσυνθετικού οπλισμού των εξεταζόμενων διατάξεων οπλισμένων επιχωμάτων για την ανάπτυξη της κάθε στάθμης βλάβης. ....                                                                                                                                                                                                                          | 135 |
| Πίνακας 4.1. Ελαστικές ιδιοπερίοδοι των δύο τραπεζοειδών προσομοιωμάτων για τις τρεις περιπτώσεις απορριμματικού υλικού. Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν έπειτα από την εφαρμογή τριών μεθόδων: της αναλυτικής λύσης, της συνάρτησης μεταφοράς και της αριθμητικής ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία. Η απόκλιση υπολογίζεται μεταξύ της πρώτης και τρίτης μεθόδου.....                 | 154 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Πίνακας 5.1. Οριακές τιμές του λόγου $\tan\phi^*g/\alpha_{\max}$ για κάθε τιμή του λόγου $T_{\text{str}}/T$ , υπολογιζόμενες από την προτεινόμενη αναλυτική λύση σε αντιπαράθεση με τις αντίστοιχες τιμές του $\eta^*$ .....                                                                                                                                                                | 236 |
| Πίνακας 5.2. Τιμές των παραμέτρων προσομοίωσης για τη διερεύνηση της κανονικοποίησης της ολίσθησης με τη μέγιστη επιτάχυνση.....                                                                                                                                                                                                                                                            | 243 |
| Πίνακας 6.1. Τιμές του λόγου της κρίσιμης επιτάχυνσης προς τη μέγιστη επιβαλλόμενη $\alpha_{\text{crit}}/\alpha_{\max}$ για κάθε εξεταζόμενη τιμή του λόγου $T_{\text{str}}/T$ και για τιμή του λόγου $\tan\phi^*g/\alpha_{\max}$ ίση με 0.5. Τα αποτελέσματα αντιστοιχούν στις διδιάστατες αριθμητικές αναλύσεις (2D FEM) και τις υπολογιζόμενες από την προτεινόμενη αναλυτική λύση. .... | 302 |





## Εισαγωγή

### 1.1 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΤΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ

Η συνεχώς αυξανόμενη παραγωγή απορριμμάτων έχει καταστήσει παγκοσμίως την διαχείριση των στερεών αποβλήτων ως μείζον κοινωνικο-πολιτικό θέμα τις τελευταίες δεκαετίες. Η συνήθης πρακτική αντιμετώπισης είναι η κατασκευή Χώρων Υγειονομικής Ταφής Απορριμμάτων (Χ.Υ.Τ.Α.), όμως πιο πρόσφατα περιβαλλοντικοί, καθώς και άλλοι λόγοι έχουν καταδείξει την ανάγκη για απόθεση επεξεργασμένων απορριμμάτων (υπολειμμάτων) που προκύπτουν έπειτα από τη διαδικασία της ανακύκλωσης καθώς και την εφαρμογή τεχνολογιών θερμικής, φυσικής, χημικής και βιολογικής επεξεργασίας.

Στην Ελλάδα, η πολιτική διαχείρισης αποβλήτων της τελευταίας δεκαετίας έχει οδηγήσει στην κατασκευή και λειτουργία 46 περίπου Χ.Υ.Τ.Α., ενώ προβλέπεται να κατασκευαστούν άλλοι 47. Παράλληλα, οι ανάγκες των μεγάλων αστικών κέντρων (π.χ. Αθήνα) αυξάνουν με ταχείς ρυθμούς καθιστώντας ανεπαρκείς τους υφιστάμενους χώρους απόθεσης απορριμμάτων. Παρόλο που η ανάγκη για υλοποίηση έργων διαχείρισης αποβλήτων είναι ιδιαίτερα σημαντική παρατηρούνται βραδείς ρυθμοί στην υλοποίηση του προγράμματος διαχείρισης στερεών αποβλήτων, το οποίο εν μέρει σχετίζεται με την κοινωνική αποδοχή της θέσης των Χ.Υ.Τ.Α.. Τα κριτήρια επιλογής της θέσης ενός Χ.Υ.Τ.Α. είναι γεωτεχνικά, γεωλογικά, υδρογεωλογικά, τοπογραφικά, χωροταξικά, περιβαλλοντικά και λειτουργικά. Είναι λοιπόν εμφανές ότι η ταυτόχρονη εκπλήρωση των κριτηρίων αυτών αποτελεί ένα πολύ-παραμετρικό πρόβλημα.

Επιπλέον, τα ειδικά τεχνικά χαρακτηριστικά των Χ.Υ.Τ.Α., όπως οι μηχανικές ιδιότητες του απορριμματικού υλικού, η διατμητική αντοχή των διαμορφούμενων διεπιφανειών μεταξύ των διαφόρων γεωσυνθετικών και οι μηχανικές ιδιότητες της γεωμεμβράνης στεγάνωσης, προσθέτουν στον σχεδιασμό της κατασκευής πολλές αβεβαιότητες. Αρκετές από τις περιπτώσεις αστοχιών που έχουν αναφερθεί στη βιβλιογραφία αποδίδονται σε κάποιον από τους παραπάνω παράγοντες. Για

παράδειγμα, στον X.Y.T.A. Kettleman Hills (Mitchell et al., 1990), όπου το 1988 εκδηλώθηκε αστοχία με τις πλευρικές μετακινήσεις να φτάνουν τα 10.7m και τις κατακόρυφες μετακινήσεις τα 4.3m, αναφέρθηκε ότι η αστοχία οφείλεται στην ανάπτυξη ολίσθησης κατά μήκος των διεπιφανειών χαμηλής διατμητικής αντοχής, οι οποίες διαμορφώνονται μεταξύ των επιμέρους τμημάτων του σύνθετου συστήματος στεγάνωσης. Η αστοχία που εκδηλώθηκε σε X.Y.T.A. στο Cincinnati του Ohio, θεωρείται από τις μεγαλύτερες (όγκος της επιφάνειας αστοχίας περίπου ίσος με 1200000 m<sup>3</sup>), ενώ αποδίδεται στην εδαφική στρώση χαμηλής διατμητικής αντοχής επί της οποίας είχε θεμελιωθεί το έργο, χωρίς να προηγηθεί εκσκαφή αλλά ούτε και κατασκευή αργιλικής στρώσης στεγάνωσης, καθώς δεν είχαν θεσμοθετηθεί οι σχετικές κανονιστικές διατάξεις την περίοδο κατασκευής του έργου (Eid et al., 2000).

Στις Φιλιππίνες εκδηλώθηκε καταστροφική αστοχία πρανούς του X.Y.T.A. Payatas που στοίχησε τη ζωή εκατοντάδων ανθρώπων. Σε αυτήν την περίπτωση η επιφάνεια ολίσθησης αναπτύχθηκε εξ ολοκλήρου εντός της απορριμματικής μάζας και εικάζεται ότι η αστοχία προκλήθηκε από την ανάπτυξη πίεσης πόρων (Kavazanjian and Merry, 2005). Αστοχία λόγω αστάθειας πρανούς καταγράφηκε το 2003 και στον X.Y.T.A. των Άνω Λιοσίων, η οποία σχετίζεται με ανάπτυξη μετακινήσεων σε απορριμματική μάζα όγκου 800000 m<sup>3</sup>. Τα αίτια της αστοχίας παραμένουν αδιευκρίνιστα αφού δεν είναι δυνατό να αποδοθούν σε ανάπτυξη πίεσης πόρων, καθώς ο X.Y.T.A. είναι κατασκευασμένος σύμφωνα με τις οδηγίες της Ευρωπαϊκής Ένωσης, δηλαδή με σύστημα στεγάνωσης και αποστράγγισης (Kölsch and Ziehmman, 2004).

Σε σεισμικώς ενεργές περιοχές ένα άλλο σημαντικό αίτιο ενεργοποίησης αστάθειας πρανών ενδέχεται να είναι η σεισμική καταπόνηση, κυρίως λόγω των δυναμικών διατμητικών τάσεων που αναπτύσσονται κατά τη διέλευση των σεισμικών κυμάτων. Σε πρόσφατους σεισμούς όπως είναι οι: San Fernando (1971), Whittier Narrows (1987), Loma Prieta (1989), Northridge (1994), και Chi-Chi (1999), παρατηρήθηκαν βλάβες σε X.Y.T.A.. Σε αυτές τις περιπτώσεις ήταν δύσκολο να προσδιορισθεί επακριβώς η έκταση των ζημιών και κυρίως εμφανίστηκαν με τη μορφή διαφόρων τύπων ρωγμών.

Οι περιβαλλοντικές, οικονομικές και κοινωνικές συνέπειες που σχετίζονται με τη μερική ή και ολική αστοχία ενός X.Y.T.A. είναι από σημαντικές έως τεράστιες. Είναι προφανές ότι μία ενδεχόμενη αστοχία μπορεί να οδηγήσει είτε στην ανεξέλεγκτη διάχυση των απορριμμάτων στο περιβάλλον είτε στην διαρροή του στραγγίσματος στο

υπέδαφος λόγω αστοχίας του συστήματος στεγάνωσης. Οι αρνητικές επιπτώσεις των προαναφερθέντων περιπτώσεων αστοχίας είναι πολλαπλές και σχετίζονται τόσο άμεσα όσο και έμμεσα με τη δημόσια υγεία. Στα παραδείγματα έμμεσης επίδρασης συγκαταλέγονται η μόλυνση των υπογείων υδροφορέων της ευρύτερης περιοχής, του εδάφους, αλλά και της χλωρίδας και της πανίδας. Επίσης, η ενδεχόμενη διακοπή της λειτουργίας ενός Χ.Υ.Τ.Α. δημιουργεί σοβαρά προβλήματα στην εύρυθμη λειτουργία των κοινωνικών δραστηριοτήτων αλλά και στις συνθήκες υγιεινής του πληθυσμού της περιοχής που εξυπηρετεί λόγω της προβληματικής διάθεσης των παραγόμενων απορριμμάτων. Επιπροσθέτως, το κόστος ταχείας επισκευής και αποκατάστασης ενός Χ.Υ.Τ.Α. είναι σημαντικό, ενώ ακόμη υψηλότερο μπορεί να είναι το κόστος εξάλειψης των λοιπών συνεπειών, όπως για παράδειγμα η απορρύπανση του περιβάλλοντος εδάφους και των υπόγειων υδάτων καθώς και η αποκατάσταση των βλαβών σε παρακείμενες υποδομές (οδικά δίκτυα, οικιστικό περιβάλλον).

Από τα παραπάνω συμπεραίνεται ότι είναι αδήριτη ανάγκη, ο σχεδιασμός και η μελέτη ενός Χ.Υ.Τ.Α. να λαμβάνει υπόψη τόσο τις σχετιζόμενες αβεβαιότητες που χαρακτηρίζουν το έργο, όσο και τις αυξημένες απαιτήσεις ασφαλείας που εντοπίζονται στα επιμέρους τμήματά του (ειδικά στο σύστημα στεγάνωσης). Επιπλέον, ειδικά σε σειсмоγενείς περιοχές όπως είναι η Ελλάδα πρέπει να ικανοποιούνται ταυτόχρονα οι απαιτήσεις ασφαλείας και έναντι σεισμικής καταπόνησης, τόσο στους υφιστάμενους όσο και στους υπό κατασκευή Χ.Υ.Τ.Α.

## 1.2 ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ

Παρόλο που όπως ήδη αναφέρθηκε οι Χ.Υ.Τ.Α. αποτελούν σημαντικά τεχνικά έργα που χρήζουν ιδιαίτερης προσοχής, ο αντισεισμικός σχεδιασμός τους δεν αντιμετωπίζεται επαρκώς από τους διεθνείς, αλλά ούτε και από τους ελληνικούς κανονισμούς. Πιο συγκεκριμένα, για την αδρανειακή καταπόνηση προτείνεται η χρήση απλοποιητικών μεθοδολογιών εκτίμησης της σεισμικής ευστάθειας των απορριμματικών πρανών μέσω της ψευδοστατικής μεθόδου. Όμως, η εφαρμογή της ψευδοστατικής μεθόδου προϋποθέτει τη χρήση ενός σεισμικού συντελεστή, ο οποίος εξαρτάται τόσο από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της κατασκευής όσο και από τα μηχανικά χαρακτηριστικά του απορριμματικού υλικού. Επιπλέον, ενώ αναφέρεται στους κανονισμούς ότι πρέπει να διασφαλίζεται η εύρυθμη λειτουργία του συστήματος στεγάνωσης δεν υφίσταται κάποια αξιόπιστη μέθοδος προσδιορισμού της σεισμικά αναπτυσσόμενης έντασης. Όσον

αφορά στην τεκτονική διάρρηξη, προτείνεται να αποφεύγεται η γειτνίαση με ενεργό ρήγμα της ολοκαινικής περιόδου. Πιο συγκεκριμένα, απόσταση 60m από το ίχνος του ρήγματος θεωρείται επαρκής, ενώ σε περίπτωση χωροθέτησης του Χ.Υ.Τ.Α. σε μικρότερη απόσταση θα πρέπει να αποδεικνύεται ότι δεν είναι εφικτό να αναπτυχθεί αστοχία σε οποιοδήποτε μέλος του.

Ο βασικός στόχος της παρούσας διατριβής είναι να διερευνήσει την καταπόνηση των Χ.Υ.Τ.Α. έναντι σεισμικής καταπόνησης, η οποία είναι δυνατόν να προκύψει λόγω:

- τεκτονικής διάρρηξης και την συνεπαγόμενη επιβολή μονίμων παραμορφώσεων, και
- της διάδοσης σεισμικών κυμάτων και την επακόλουθη ανάπτυξη δυναμικών διατμητικών παραμορφώσεων.

Για καθεμία από τις προαναφερθείσες περιπτώσεις εξετάζεται τόσο η ευστάθεια της απορριμματικής μάζας όσο και η καταπόνηση του συστήματος στεγάνωσης. Παράλληλα διερευνάται η επίδραση των επιμέρους αβεβαιοτήτων που χαρακτηρίζουν τους Χ.Υ.Τ.Α. Τέλος, με βάση τα αποτελέσματα της διερεύνησης επιχειρείται η διατύπωση προτάσεων για τον καλύτερο δυνατό αντισεισμικό σχεδιασμό των εξεταζόμενων γεωκατασκευών, αλλά και για την προστασία τους από την εκδήλωση ενδεχόμενης αστοχίας.

### 1.3 ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ

Το **Κεφάλαιο 2** αποτελεί μία εκτενή βιβλιογραφική ανασκόπηση των θεμάτων που πραγματεύεται η παρούσα διατριβή. Αρχικά, πρόκειται να διερευνηθεί η σεισμική τρωτότητα των Χ.Υ.Τ.Α. διεθνώς, μέσω μίας αναλυτικής παράθεσης των περιστατικών όπου παρατηρήθηκαν βλάβες έπειτα από κάποιο έντονο σεισμικό γεγονός. Σκοπός είναι να καταγραφούν οι βασικές μορφές αστοχίας που έχουν εκδηλωθεί μέχρι στιγμής σε τέτοιου τύπου κατασκευές. Ακολούθως παρουσιάζονται οι διεθνείς διατάξεις αντισεισμικού σχεδιασμού Χ.Υ.Τ.Α., με έμφαση στις ευρωπαϊκές και αμερικάνικες οδηγίες. Συμπληρωματικά προς αυτές, αναπτύσσεται επίσης εκτενώς η ερευνητική δραστηριότητα των τελευταίων ετών που αφορά στη μελέτη της σεισμικής συμπεριφοράς των Χ.Υ.Τ.Α. Επιπλέον, εξετάζονται οι ιδιότητες των Χ.Υ.Τ.Α., οι οποίες σχετίζονται τόσο με το απορριμματικό υλικό όσο και με τα συστήματα αποστράγγισης και στεγάνωσης. Για τον σκοπό αυτό παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών οι οποίες έχουν διεξαχθεί για τον προσδιορισμό των



μηχανικών χαρακτηριστικών του απορριμματικού υλικού, αλλά και των διαμορφούμενων διεπιφανειών.

Το **Κεφάλαιο 3** πραγματεύεται την καταπόνηση των Χ.Υ.Τ.Α. λόγω τεκτονικής διάρρηξης. Αρχικά διεξάγεται μια εκτενής βιβλιογραφική ανασκόπηση, η οποία αφορά στη διερεύνηση της διάδοσης ρηγμάτων διαμέσου εδαφικών αποθέσεων με χρήση πειραματικών αλλά και αριθμητικών μεθόδων. Έπειτα, ακολουθεί η παρουσίαση της αριθμητικής προσομοίωσης της διάδοσης της διάρρηξης μέσω του απορριμματικού υλικού, στην οποία εξετάζεται και η επίδραση των επιμέρους σχετιζόμενων παραμέτρων. Εν συνεχεία, η προσομοίωση γίνεται πιο αναλυτική προκειμένου να συμπεριλάβει και το σύστημα στεγάνωσης και να προσδιοριστεί η καταπόνησή του. Τέλος, το κεφάλαιο ολοκληρώνεται με τη διεξαγωγή μιας εκτενούς παραμετρικής διερεύνησης των πιθανών μέτρων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν κατά τον σχεδιασμό ενός Χ.Υ.Τ.Α. προκειμένου να αντιμετωπιστεί η καταπόνηση λόγω των αναπτυσσόμενων μόνιμων παραμορφώσεων. Στους προτεινόμενους τρόπους αντιμετώπισης περιλαμβάνεται και η χρήση οπλισμένου επιχώματος, η οποία μπορεί να θεωρηθεί ως μία καινοτόμος πρόταση χρήσης γεωσυνθετικών υλικών.

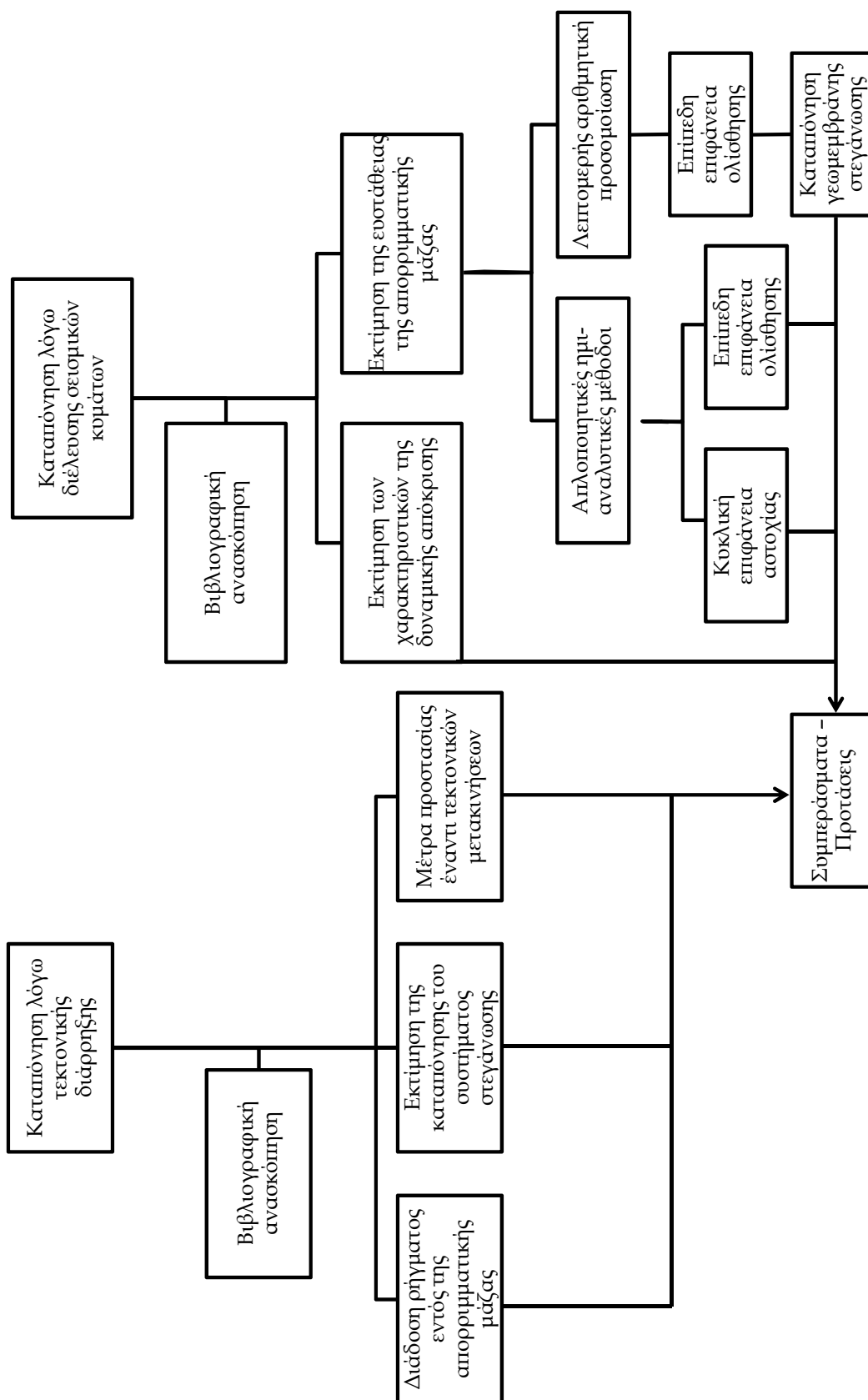
Στο **Κεφάλαιο 4** αναλύεται η δυναμική απόκριση των Χ.Υ.Τ.Α., θεωρώντας τόσο γραμμικώς ελαστική όσο και ισοδύναμα ελαστική συμπεριφορά του απορριμματικού υλικού. Και για τις δύο εξεταζόμενες περιπτώσεις διενεργήθηκαν εκτεταμένες αριθμητικές αναλύσεις με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, ενώ για την πρώτη περίπτωση πραγματοποιήθηκαν επίσης συγκρίσεις με υπάρχουσες αναλυτικές μεθοδολογίες. Παράλληλα ερευνήθηκε η επίδραση των μηχανικών ιδιοτήτων του απορριμματικού υλικού και των χαρακτηριστικών της διέγερσης. Επίσης, προκειμένου να τονιστεί η επίδραση της τοπογραφίας και των σύνθετων φαινομένων κυματικής διάδοσης που συνεπάγεται, τα αποτελέσματα των διδιάστατων αριθμητικών αναλύσεων συγκρίνονται με τα αντίστοιχα των μονοδιάστατων αναλύσεων. Τέλος, εξετάζεται η δυναμική αλληλεπίδραση εδάφους-κατασκευής λαμβάνοντας υπόψη τις προαναφερθείσες παραμέτρους.

Το **5<sup>ο</sup> Κεφάλαιο** επικεντρώνεται στην αποτίμηση της ευστάθειας της απορριμματικής μάζας υπό σεισμική διέγερση. Αρχικά πραγματοποιείται μια εκτενής βιβλιογραφική επισκόπηση των μεθόδων εκτίμησης ευστάθειας πρανών. Εν συνεχεία, δίνεται βαρύτητα στις μεθόδους εκτίμησης παραμενουσών μετακινήσεων προκειμένου να εκτιμηθεί η

σεισμική ευστάθεια για δύο τύπους αστοχίας: (α) κυκλική επιφάνεια αστοχίας και (β) ολίσθηση κατά μήκος διεπιφάνειας χαμηλής διατμητικής αντοχής εντός του συστήματος στεγάνωσης. Ειδικά για την δεύτερη περίπτωση, όπου η απόκριση θεωρείται ότι επηρεάζεται λιγότερο από τα φαινόμενα τοπογραφίας, διενεργούνται εκτός από ασύζευκτες και συζευγμένες αναλύσεις, χρησιμοποιώντας δύο απλουστευτικά αριθμητικά προσομοιώματα. Τέλος, προτείνεται ένα νέο προσομοίωμα το οποίο επιλύεται ημι-αναλυτικά μετά από κατάλληλη υλοποίηση σε υπολογιστικό κώδικα με χρήση της γλώσσας προγραμματισμού FORTRAN, το οποίο λαμβάνει ταυτόχρονα υπόψη την ύπαρξη δύο επιφανειών αστοχίας και εξετάζει την αλληλεπίδραση τους στην εξέλιξη των σεισμικών μετακινήσεων.

Το **Κεφάλαιο 6** εξετάζει την καταπόνηση της γεωμεμβράνης στεγάνωσης λόγω της αδρανειακής απόκρισης του Χ.Υ.Τ.Α. Οι απλοποιητικές μεθοδολογίες που αναπτύχθηκαν και εξετάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο δεν είναι εφικτό να υπολογίσουν τις αναπτυσσόμενες σεισμικές παραμορφώσεις της γεωμεμβράνης, αλλά ούτε και να λάβουν υπόψη τα χαρακτηριστικά της κατασκευής στην εκτίμηση των σεισμικών μετακινήσεων κατά μήκος της βάσης της. Στο κεφάλαιο αυτό μορφώνεται και αναλύεται παραμετρικά ένα σύνθετο αριθμητικό προσομοίωμα, με το οποίο εκτιμώνται ακριβέστερα αφενός οι σεισμικές μετακινήσεις και αφετέρου οι σεισμικές παραμορφώσεις του συστήματος στεγάνωσης. Τέλος, εντοπίζονται οι ενδεχόμενοι μηχανισμοί αστοχίας και προτείνονται κριτήρια για τα όρια ανάπτυξής τους.

Τα συμπεράσματα της παρούσας διατριβής αναλύονται στο **Κεφάλαιο 7**. Το κεφάλαιο αυτό περιλαμβάνει εκτός από τα ευρήματα της διερεύνησης των προαναφερθέντων θεμάτων και συστάσεις για τον αντισεισμικό σχεδιασμό των Χ.Υ.Τ.Α. Συνοπτικά η δομή της διδακτορικής διατριβής παρουσιάζεται στο διάγραμμα του Σχήματος 1.1.



Σχήμα 1.1: «Διάγραμμα ροής» της δομής της διδακτορικής διατριβής.

#### 1.4 ΑΝΑΦΟΡΕΣ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

- Eid, H.T., Stark, T.D., Evans, W.D., and Sherry, P.E., 2000, "Municipal solid waste slope failure. I: Waste and foundation soil properties", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 126(5), 397 - 407.
- Kavazanjian, E.J., and Merry, S.M., 2005, "The 10 July 2000 Payatas landfill failure", *Proceedings of Sardinia 2005: Tenth international waste management and landfill symposium*, 3-7 October, Italy.
- Kölsch, F., and Ziehmman, G, 2004, "Landfill stability: Risks and challenges", *Waste management world*, May-June, 55 - 60.
- Mitchell, J.K., Seed, R.B., and Seed, H.B., 1990, "Kettleman Hills waste landfill slope failure. I: Liner - system properties", *Journal of Geotechnical Engineering*, 116(4), 647 - 668.

### Βιβλιογραφική ανασκόπηση

#### 2.1 ΚΑΝΟΝΙΣΤΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ

Οι αρνητικές συνέπειες, οι οποίες σχετίζονται με το μη ορθό σχεδιασμό και λειτουργία ενός Χώρου Υγειονομικής Ταφής Απορριμμάτων (Χ.Υ.Τ.Α.), περιλαμβάνουν εκτός από τη μόλυνση του περιβάλλοντος (υπόγειων υδάτων, εδάφους και αέρα), την υγεία του κοινωνικού συνόλου, και επιπλέον την εκδήλωση πιθανής αστοχίας της απορριμματικής μάζας. Καθώς η προστασία του περιβάλλοντος αποτελεί αδήριτη κοινωνική ανάγκη, η θέσπιση κανονισμών υπήρξε καθοριστική για την ασφαλέστερη διαχείριση, και διάθεση των απορριμμάτων. Επιπλέον, η εφαρμογή διατάξεων οι οποίες προσδιορίζουν τη χωροθέτηση, τη λειτουργία, και τον σχεδιασμό των Χ.Υ.Τ.Α. με γνώμονα την ασφάλεια και προστασία τόσο των τωρινών όσο και των μεταγενέστερων γενεών, αποτελούν έναυσμα για αναστροφή της αρνητικής κοινωνικής θεώρησης των κατασκευών αυτών.

Τις τελευταίες δεκαετίες καταβάλλεται μία σημαντική προσπάθεια ενίσχυσης του κανονιστικού πλαισίου που διέπει τη διαχείριση αλλά και τη διάθεση των στερεών αστικών αποβλήτων. Συνεπώς, είναι μείζονος σημασίας η επισκόπηση των διεθνών κανονισμών που αφορούν το σχεδιασμό των Χ.Υ.Τ.Α., καθώς παρέχουν τις βασικές αρχές αλλά και τα απαραίτητα τεχνικά χαρακτηριστικά των κατασκευών αυτών. Εν γένει, οι κανονισμοί διακρίνουν τις κατηγορίες των αποβλήτων (κυρίως σε επικίνδυνα και μη), ορίζουν κριτήρια για τη χωροθέτηση των Χ.Υ.Τ.Α., προσδιορίζουν βασικές αρχές οι οποίες θα πρέπει να εφαρμόζονται κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του, περιγράφουν τα απαιτούμενα τεχνικά χαρακτηριστικά και καθορίζουν τις απαραίτητες ενέργειες για την τελική κάλυψη αλλά και την ασφαλή συντήρηση μετά το πέρας της λειτουργίας τους.

Στη συνέχεια, παρατίθενται περιληπτικά το πλαίσιο και οι διατάξεις των αμερικάνικων και ευρωπαϊκών οδηγιών, καθώς και το ισχύον θεσμικό πλαίσιο στην

Ελλάδα όπως έχει διαμορφωθεί έπειτα από την εναρμόνιση προς τις κοινοτικές οδηγίες, με έμφαση στα απαιτούμενα τεχνικά χαρακτηριστικά και τον αντισεισμικό σχεδιασμό χώρων υγειονομικής ταφής μη επικίνδυνων αποβλήτων.

### **2.1.1 Αμερικάνικες οδηγίες (US EPA, 1993)**

Οι αμερικάνικες οδηγίες US EPA (1993) έχουν ομοσπονδιακή εφαρμογή ως οι ελάχιστα αποδεκτές προδιαγραφές, αλλά αποτελεί επιλογή της κάθε πολιτείας η πλήρης ή όχι υιοθέτησή τους, ενώ είναι υποχρέωσή της η εφαρμογή τους. Οι γενικές αρχές πάντως δίδονται στο κείμενο που έχει ομοσπονδιακή εφαρμογή και αυτές θα παρουσιαστούν ακολούθως.

Το κείμενο περιγραφής των κριτηρίων διάθεσης στερεών αποβλήτων αποτελείται από έξι διακριτά μέρη (Subparts) στα οποία περιγράφονται οι τεχνικές απαιτήσεις που αφορούν: τη χωροθέτηση (Subpart B), τη λειτουργία (Subpart C), τον σχεδιασμό (Subpart D), την παρακολούθηση των υπογείων υδάτων και τις σχετικές διορθωτικές κινήσεις (Subpart E), το κλείσιμο και τη φροντίδα μετά το πέρας λειτουργίας (Subpart F), και τέλος την οικονομική διασφάλιση (Subpart G).

#### **Γενικά στοιχεία**

Η θέση κατασκευής ενός Χ.Υ.Τ.Α. θα πρέπει να μην είναι στην άμεση γειτνίαση: (α) ενός αεροδρομίου, (β) μίας περιοχής, για την πλημμύρα 100ετίας της οποίας δεν μπορεί να αποδειχθεί ότι το έργο είναι ασφαλές, (γ) ενός υδροβιότοπου, και (δ) μίας περιοχής όπου ενδέχεται να αναπτυχθεί αστάθεια (π.χ. κατολίσθηση). Σχετικά με τη λειτουργία του Χ.Υ.Τ.Α., οι βασικές απαιτήσεις συνίστανται στη μη αποδοχή επικίνδυνων αποβλήτων, στην κάλυψη των απορριμμάτων καθημερινώς με εδαφική στρώση, στον έλεγχο του παραγόμενου μεθανίου, στον έλεγχο των όμβριων υδάτων, στη μη αποδοχή υγρών αποβλήτων, στην απαγόρευση καύσης των απορριμμάτων και την απαγόρευση της εισόδου σε μη έχοντες αρμοδιότητες.

Επιπλέον, οι κανονισμοί προβλέπουν ότι θα πρέπει να εγκατασταθεί σύστημα παρακολούθησης των υπογείων υδάτων και να γίνεται δειγματοληψία και έλεγχος τουλάχιστον δύο φορές ανά έτος. Στην περίπτωση που διαπιστωθεί υπέρβαση των αποδεκτών ορίων, θα πρέπει να εφαρμοστούν τεχνικές απορρύπανσης οι οποίες θα έχουν ως αποτέλεσμα τη μείωση της συγκέντρωσης των ρυπαντών σε τιμές μικρότερες των αποδεκτών ορίων. Μετά το πέρας της λειτουργίας του Χ.Υ.Τ.Α., θα πρέπει να

κατασκευαστεί τελική κάλυψη της απορριμματικής μάζας προκειμένου να αποτρέπεται η διήθηση νερού εντός της. Σύμφωνα με τις οδηγίες θα πρέπει για 30 έτη μετά το κλείσιμο του Χ.Υ.Τ.Α. να διατηρείται η τελική κάλυψη, να παρακολουθείται η χημική σύσταση των υπόγειων υδάτων, να συλλέγεται το παραγόμενο βιοαέριο και να εκτελούνται όλες οι απαραίτητες ενέργειες συντήρησης.

### **Αντισεισμικός σχεδιασμός**

Τα βασικά στοιχεία του αντισεισμικού σχεδιασμού δίνονται ως διατάξεις που αφορούν στον έλεγχο της χωροθέτησης της κατασκευής (Subpart B). Πιο συγκεκριμένα διακρίνονται δύο περιπτώσεις: (α) η γειτνίαση με ενεργό ρήγμα με την αντιμετώπιση της συνεπαγόμενης καταπόνησης και (β) ο έλεγχος της ζώνης σεισμικής επικινδυνότητας της περιοχής του έργου.

Όσον αφορά στην πρώτη περίπτωση, ένας Χ.Υ.Τ.Α. δεν θα πρέπει να τοποθετείται σε απόσταση μικρότερη των 60m από ρήγμα της ολοκαινικής περιόδου εκτός αν αποδειχθεί ότι δεν θα προκληθεί βλάβη στην ακεραιότητα του Χ.Υ.Τ.Α. και ότι δεν τίθεται σε κίνδυνο η ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον. Επίσης, τονίζεται ότι η γειτνίαση με ενεργό ρήγμα εγκυμονεί κινδύνους που προέρχονται από την αναπτυσσόμενη μετακίνηση κατά μήκος του ρήγματος, από την καταπόνηση λόγω της εγγύς του ρήγματος σεισμικής κίνησης και από την εκδήλωση αστοχίας με την μορφή αστάθειας πρανούς λόγω της δυναμικής καταπόνησης.

Στην περίπτωση που προταθεί εναλλακτικός σχεδιασμός με τοποθέτηση της κατασκευής σε απόσταση μικρότερη από τα 60m, θα πρέπει παράλληλα η μελέτη να περιλαμβάνει:

- αντισεισμικό σχεδιασμό σε περιοχές με υψηλή πιθανότητα μεγάλων επιταχύνσεων (0.1g – 0.75g),
- έλεγχο της σεισμικής ευστάθειας των απορριμματικών πρανών, βάσει του οποίου θα γίνει επιλογή των υλικών αλλά και των κλίσεων των πρανών,
- εφαρμογή τεχνικών βελτίωσης του εδάφους σε περίπτωση που οι επί τόπου ή οι εργαστηριακές δοκιμές αποδείξουν κίνδυνο σε ρευστοποίηση.

Όσον αφορά στη δεύτερη περίπτωση αντισεισμικού ελέγχου, αναφέρεται ότι οι Χ.Υ.Τ.Α. δεν θα πρέπει να τοποθετούνται σε ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας (10% πιθανότητα υπέρβασης της σεισμικής επιτάχυνσης 0.1g σε 250 χρόνια) εκτός αν αποδειχθεί ότι όλα τα τμήματα της κατασκευής συμπεριλαμβανομένων των συστημάτων

στεγάνωσης, συλλογής στραγγίσματος και ελέγχου επιφανειακών υδάτων είναι σχεδιασμένα ώστε να επαρκούν έναντι της μέγιστης οριζόντιας επιτάχυνσης στο σεισμικό υπόβαθρο.

Σχετικά με τον σχεδιασμό σε περιοχές με σεισμική δραστηριότητα, ο κανονισμός προτείνει την ακόλουθη διαδικασία:

- προσδιορισμός της αναμενόμενης μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης για τον μέγιστο αναμενόμενο σεισμό,
- προσδιορισμός των επί τόπου σεισμικών κινδύνων όπως είναι η ανάπτυξη εδαφικών καθιζήσεων,
- σχεδιασμός της κατασκευής και των επιμέρους τμημάτων της ώστε να επαρκούν στην καταπόνηση της μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης.

Επιπλέον, αναφέρεται ότι ο σχεδιασμός θα πρέπει να περιλαμβάνει συντελεστές ασφαλείας οι οποίοι όμως δεν ορίζονται.

Για την περίπτωση που η μέγιστη εδαφική επιτάχυνση είναι μεγαλύτερη από 0.1g, θα πρέπει να ελέγχεται εκτός από την ευστάθεια του εδάφους θεμελίωσης και η ευστάθεια των απορριμματικών πρανών. Εάν η μέγιστη εδαφική επιτάχυνση είναι μικρότερη από 0.1g, τότε δεν είναι αναγκαίο να γίνουν οι παραπάνω έλεγχοι εκτός αν το έδαφος θεμελίωσης χαρακτηρίζεται από χαμηλή διατμητική αντοχή ή είναι επικίνδυνο για ρευστοποίηση. Πάντως, η εκτίμηση της σεισμικής καταπόνησης θα πρέπει να διεξάγεται ανεξαρτήτως του μεγέθους της μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης.

Σχετικά με τη μέθοδο ελέγχου ευστάθειας, αναφέρεται ότι είναι διαθέσιμα υπολογιστικά εργαλεία που βασίζονται στην ψευδοστατική μέθοδο, η εφαρμογή της οποίας δίνει συντηρητικά αποτελέσματα και λαμβάνει υπόψη την οριζόντια και την κατακόρυφη συνιστώσα της σεισμικής κίνησης. Επιπλέον, ορίζεται ότι θα πρέπει να προκύπτει κατάλληλος συντελεστής ασφαλείας και, τέλος, ότι σε κατασκευές τοποθετημένες σε περιοχές υψηλού σεισμικού κινδύνου ο σχεδιασμός θα πρέπει να διεξάγεται από ειδικούς.

Συμπληρωματικά, θα πρέπει να αναφερθεί ότι στην παράγραφο όπου προσδιορίζονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά των ασταθών περιοχών αλλά και οι τρόποι αντιμετώπισής τους, προτείνεται ως μέθοδος εκτίμησης ευστάθειας πρανών η μέθοδος οριακής ισορροπίας και επίσης οι τιμές των συντελεστών ασφαλείας που δίδονται στον Πίνακα 2.1 για στατική και σεισμική φόρτιση.



**Πίνακας 2.1.** Συνιστώμενες ελάχιστες τιμές του συντελεστή ασφαλείας σε αναλύσεις ευστάθειας πρανών σύμφωνα με Subpart B (EPA, 1993).

| Συνέπειες αστοχίας πρανούς                                               | Αβεβαιότητα παραμέτρων αντοχής |           |          |           |
|--------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|-----------|----------|-----------|
|                                                                          | Μικρή                          |           | Μεγάλη   |           |
|                                                                          | Στατικός                       | Σεισμικός | Στατικός | Σεισμικός |
| Δεν υφίσταται διακινδύνευση ανθρώπινης ζωής ή μόλυνσης του περιβάλλοντος | 1.25                           | 1.2       | 1.5      | 1.3       |
| Υφίσταται διακινδύνευση ανθρώπινης ζωής ή μόλυνσης του περιβάλλοντος     | 1.5                            | 1.3       | 2.0      | 1.7       |

### Τεχνικά χαρακτηριστικά σχεδιασμού

Στο Subpart D του κανονισμού καθορίζονται τα κριτήρια σχεδιασμού των χώρων απόθεσης απορριμμάτων. Πιο συγκεκριμένα, ο σχεδιασμός μπορεί να γίνει είτε με βάση την επίδοση της κατασκευής είτε ακολουθώντας κάποιες συγκεκριμένες προδιαγραφές. Στην πρώτη περίπτωση θα πρέπει να διασφαλίζεται ότι οι συγκεντρώσεις ρυπαντών δεν θα υπερβαίνουν τα όρια που έχουν προσδιοριστεί για κάθε τύπο ρυπογόνου ουσίας. Αυτή η μέθοδος σχεδιασμού, αφενός παρέχει ελευθερία στον τρόπο σχεδιασμού και ωφελεί την ανάπτυξη πρωτοποριακών τεχνολογιών, αφετέρου με την εφαρμογή της μπορούν να ληφθούν υπόψη οι ιδιαίτερες επιτόπου συνθήκες που ενδέχεται να χαρακτηρίζουν τη θέση κατασκευής (Estrin and Rowe, 1995).

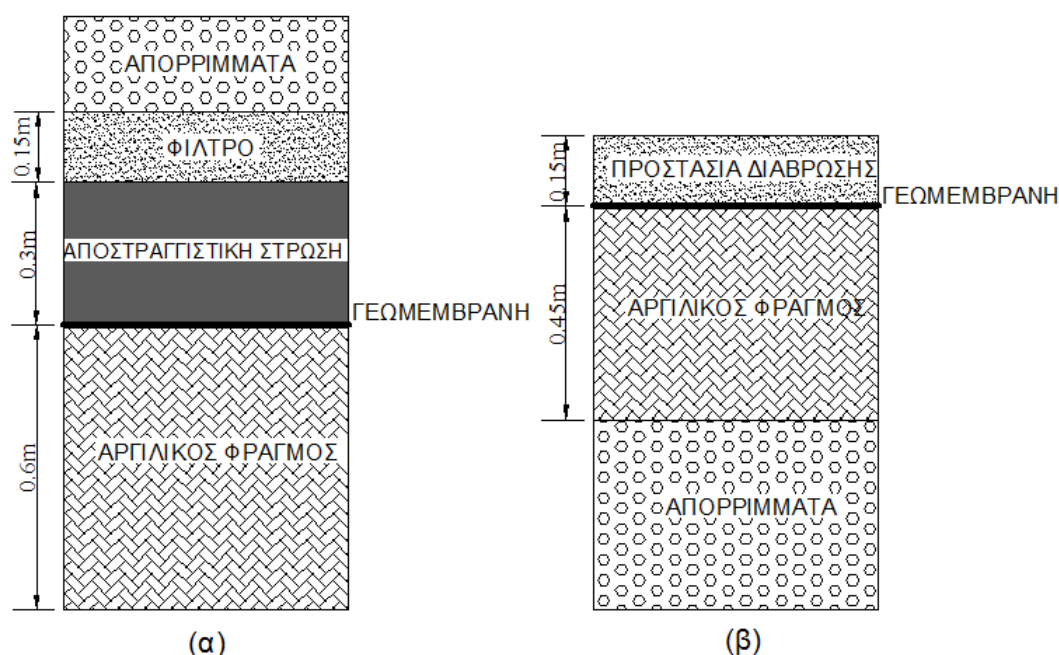
Τα ελάχιστα απαιτούμενα τεχνικά χαρακτηριστικά ορίζονται ως ένα σύνθετο σύστημα στεγάνωσης και ένα σύστημα συλλογής στραγγίσματος, το οποίο θα έχει τη δυνατότητα να συγκρατεί τουλάχιστον στράγγισμα ύψους 30cm πάνω από τη γεωμεμβράνη. Το σύνθετο σύστημα στεγάνωσης απαρτίζεται από δύο μέρη. Το άνω τμήμα αποτελείται από ελαστική γεωμεμβράνη ελάχιστου πάχους 0.75mm ή εναλλακτικά από γεωμεμβράνη τύπου HDPE (High Density Polyethylene) ελάχιστου πάχους 1.5mm, το δε κατώτερο τμήμα θα πρέπει να αποτελείται από 0.60m συμπυκνωμένου εδάφους με συντελεστή διαπερατότητας μικρότερο ή ίσο προς  $1 \times 10^{-7}$  cm/sec. Η γεωμεμβράνη θα πρέπει να τοποθετείται σε άμεση επαφή προς την εδαφική στρώση. Οι έλεγχοι αντοχής της γεωμεμβράνης θα πρέπει να διεξάγονται έναντι έντασης που αναπτύσσεται: (α) λόγω ιδίου βάρους κατά την τοποθέτηση σε πρανή, (β)

λόγω εφελκυσμού κατά την απόθεση των απορριμμάτων, και (γ) λόγω της αγκύρωσης. Επιπροσθέτως, θα πρέπει να ελέγχεται η ευστάθεια εδαφικής στρώσης επί γεωμεμβράνης και γεωφασμάτων ή γεωδικτύων, τα οποία ενδέχεται να τοποθετηθούν πάνω από τη γεωμεμβράνη. Η ελάχιστη εφελκυστική αντοχή της γεωμεμβράνης θα πρέπει να είναι επαρκής, ώστε να μπορεί να παραλάβει τις αναμενόμενες τάσεις που προβλέπεται να αναπτυχθούν κατά τον χρόνο λειτουργίας της.

Το σύστημα συλλογής στραγγίσματος θα πρέπει να αποτελείται από τα εξής τμήματα:

- μία αποστραγγιστική στρώση αποτελούμενη είτε από φυσικά κοκκώδη εδάφη (άμμο, χαλίκι) είτε από συνθετικό υλικό (γεωδίκτυ), τοποθετημένη είτε απευθείας πάνω στη γεωμεμβράνη είτε πάνω σε προστατευτική στρώση που βρίσκεται επί της γεωμεμβράνης (γεωφάσμα),
- διατήρητους σωλήνες συλλογής στραγγίσματος εντός της αποστραγγιστικής στρώσης που θα συλλέγουν το στράγγισμα,
- μια προστατευτική στρώση φίλτρου που θα αποτελείται από υψηλής διαπερατότητας υλικό (ή γεωφάσμα) και θα αποφεύγεται με αυτόν τον τρόπο η έμφραξη από λεπτόκοκκα εδάφη,
- φρεάτια συλλογής στραγγίσματος.

Τέλος, σχετικά με το σύστημα τελικής κάλυψης αναφέρεται ότι θα πρέπει να χαρακτηρίζεται από διαπερατότητα μικρότερη από την αντίστοιχη του συστήματος στεγάνωσης ή μικρότερη από  $1 \times 10^{-5} \text{cm/sec}$ , όποια από τις δύο τιμές είναι μικρότερη. Συνεπώς, εάν χρησιμοποιείται γεωμεμβράνη στο σύστημα στεγάνωσης θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί και για το σύστημα τελικής κάλυψης, αφού δεν είναι εφικτή η κατασκευή γεωλογικού φραγμού με διαπερατότητα ίση ή μικρότερη μίας γεωμεμβράνης. Επιπλέον, το σύστημα τελικής κάλυψης θα πρέπει να αποτελείται από μία εδαφική στρώση πάχους 0.45m που θα ελαχιστοποιεί τη διήθηση, και μία εδαφική στρώση που θα είναι προστατευτική έναντι διάβρωσης και θα έχει ελάχιστο πάχος 0.15m. Στο Σχήμα 2.1 παρατίθενται οι τυπικές διατάξεις του σύνθετου συστήματος στεγάνωσης βάσης και του συστήματος τελικής κάλυψης σύμφωνα με τις ελάχιστες απαιτήσεις που προαναφέρθηκαν.



**Σχήμα 2.1.** Τυπική διάταξη σύμφωνα με ΕΡΑ (1993) για: (α) σύνθετο σύστημα στεγάνωσης με σύστημα συλλογής στραγγίσματος, και (β) σύστημα τελικής κάλυψης.

### 2.1.2 Ευρωπαϊκές διατάξεις (Council directive 99/31)

Οι ευρωπαϊκές οδηγίες αποσκοπούν στη θέσπιση μέτρων, διαδικασιών και οδηγιών, ώστε να προλαμβάνονται και να αποφεύγονται, κατά το δυνατόν, οι αρνητικές συνέπειες στο περιβάλλον, και πιο συγκεκριμένα η μόλυνση των επιφανειακών και υπογείων υδάτων, του εδάφους και του αέρα καθώς και η επιβάρυνση του φαινομένου του θερμοκηπίου, οι οποίες μπορεί να προκύψουν κατά την απόθεση των απορριμμάτων.

#### Γενικά στοιχεία

Στην κοινοτική οδηγία 99/31 ορίζονται οι διαδικασίες αδειοδότησης ενός Χ.Υ.Τ.Α., τα κριτήρια αποδοχής των απορριμμάτων, καθώς και η διαδικασία αποδοχής, οι διαδικασίες ελέγχου και παρακολούθησης κατά τη διάρκεια λειτουργίας, αλλά και μετά το κλείσιμο του έργου. Επίσης, ορίζονται γενικές απαιτήσεις για όλα τα είδη χώρων υγειονομικής ταφής (επικίνδυνων ή μη απορριμμάτων). Σε αυτές περιλαμβάνονται, εκτός από κριτήρια για την τοποθεσία κατασκευής του έργου, μέτρα ελέγχου των υδάτων και διαχείρισης του στραγγίσματος, μέτρα προστασίας του εδάφους και των υδάτων, και μέτρα ελέγχου του παραγόμενου βιοαερίου.

Πιο συγκεκριμένα, στην επιλογή της θέσης θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η απόσταση των ορίων του Χ.Υ.Τ.Α. από ποτάμια, λίμνες και λοιπούς χώρους επιφανειακών υδάτων, καθώς και από περιοχές με αγροτική ανάπτυξη ή με αστικό περιβάλλον. Επιπλέον, δεν πρέπει να αμελείται ο κίνδυνος εκδήλωσης πλημμύρας, κατολισθήσεως, ή/και χιονοστιβάδας στην περιοχή τοποθέτησης του έργου, σε συνδυασμό και με τις γεωλογικές και υδρογεωλογικές συνθήκες της περιοχής, ενώ ταυτόχρονα θα πρέπει να εξετάζεται η γειτνίαση με περιοχές προστασίας υπόγειων υδάτων ή με παράκτιες περιοχές.

Επιπροσθέτως, ορίζεται ότι θα πρέπει να λαμβάνονται κατάλληλα μέτρα ώστε να ελέγχεται το νερό που διηθείται εντός του Χ.Υ.Τ.Α., να συλλέγεται το στράγγισμα και το μολυσμένο νερό, καθώς και να εκτελούνται τρόποι επεξεργασίας των τελευταίων ώστε να πληρούν τις απαιτούμενες προδιαγραφές για την απόρριψή τους. Επίσης, σύμφωνα με τις οδηγίες το παραγόμενο βιοαέριο θα πρέπει να συλλέγεται, να επεξεργάζεται καταλλήλως και έπειτα να χρησιμοποιείται.

### **Τεχνικά χαρακτηριστικά σχεδιασμού**

Οι τεχνικές προδιαγραφές που ορίζονται για την προστασία του εδάφους αλλά και των επιφανειακών και υπόγειων υδάτων περιλαμβάνουν: (α) την κατασκευή γεωλογικού φραγμού και γεωμεμβράνης στη βάση κατά την φάση λειτουργίας και (β) γεωλογικού φραγμού και γεωμεμβράνης κάλυψης για μετά το πέρας λειτουργίας του έργου. Ο γεωλογικός φραγμός θα πρέπει να έχει πάχος μεγαλύτερο ή ίσο με 1m και συντελεστή διαπερατότητας μικρότερο ή ίσο με  $1 \times 10^{-7} \text{cm/sec}$ , για μη επικίνδυνα απόβλητα. Στην περίπτωση που δεν είναι δυνατό να πληρούνται οι παραπάνω προδιαγραφές, μπορεί να χρησιμοποιείται τεχνητός φραγμός ο οποίος όμως θα πρέπει να έχει πάχος κατ'ελάχιστον ίσο με 0.5m. Ακόμη, για την συλλογή του στραγγίσματος θα πρέπει να τοποθετείται στρώση αποστράγγισης πάχους ίσου τουλάχιστον με 0.5m.

Για την τελική κάλυψη του Χ.Υ.Τ.Α. σε περίπτωση μη επικίνδυνων αποβλήτων, θα πρέπει να τοποθετηθεί εδαφική στρώση με πάχος μεγαλύτερο από 1m, στρώση αποστράγγισης με πάχος μεγαλύτερο από 0.5m, στρώση συλλογής του βιοαερίου και μη διαπερατή στρώση κατάλληλης ορυκτολογικής σύστασης (αργλικής). Τέλος, ορίζεται ότι η απόθεση των απορριμμάτων θα πρέπει να γίνεται με τρόπο ώστε να διασφαλίζεται η ευστάθεια και η αποφυγή ανάπτυξης ολισθήσεων εντός της απορριμματικής μάζας, καθώς και η σταθερότητα των σχετικών κατασκευών.

### 2.1.3 Ελληνικό θεσμικό πλαίσιο

Στην ελληνική νομοθεσία η πρώτη διάταξη, η οποία κάλυπτε με πληρότητα το αντικείμενο της χωροθέτησης των εγκαταστάσεων διαχείρισης απορριμμάτων θεσμοθετήθηκε το 1964. Εν συνεχεία όμως παρατηρήθηκε ένα μεγάλο νομοθετικό κενό έως ότου η κοινή υπουργική απόφαση (Κ.Υ.Α.) 114218/97 (ΦΕΚ 1016 Β), η οποία ισχύει μέχρι και σήμερα, αντικατέστησε τις παλαιότερες διατάξεις. Οι περισσότερες διατάξεις που ορίζονται σε αυτή ισχύουν μέχρι σήμερα, ενώ στην Κ.Υ.Α. 29407/3508 (ΦΕΚ 1572 Β/16-12-02) τροποποιήθηκαν μερικές παράγραφοι που αφορούν στις τεχνικές προδιαγραφές των Χ.Υ.Τ.Α.

#### Γενικά στοιχεία

Στην Κ.Υ.Α. 114218/97 ορίζονται οι απαιτούμενες τεχνικές προδιαγραφές για:

- τη συλλογή, προσωρινή αποθήκευση και μεταφορά στερεών αποβλήτων,
- τη μεταφόρτωση στερεών αποβλήτων,
- τα συστήματα διαλογής στη πηγή,
- την κατασκευή και λειτουργία εγκαταστάσεων μηχανικής διαλογής και κομποστοποίησης,
- τη διαχείριση υλίων από εγκαταστάσεις επεξεργασίας αστικών λυμάτων,
- τους Χ.Υ.Τ.Α. και τους Χ.Υ.Τ.Α. αδρανών.

Επίσης, προσδιορίζονται τα όρια και τα κριτήρια καταλληλότητας και επιλογής θέσεων εγκατάστασης διαχείρισης αποβλήτων. Πιο συγκεκριμένα, απαγορεύεται η εγκατάσταση Χ.Υ.Τ.Α. εντός περιοχών κηρυγμένων αρχαιολογικών χώρων, παραδοσιακών οικισμών, θεσμοθετημένων περιοχών προστασίας, και οικιστικών περιοχών. Απαγορευτικές διατάξεις ισχύουν για αεροδρόμια, και περιοχές που σχετίζονται με την εθνική άμυνα και ασφάλεια. Επιπλέον, περιγράφονται τα γεωλογικά, υδρογεωλογικά, υδρολογικά, περιβαλλοντικά, χωροταξικά κριτήρια για την επιλογή της θέσης του Χ.Υ.Τ.Α., καθώς και κριτήρια λειτουργικά και γενικής φύσης, ενώ στις εξεταζόμενες παραμέτρους περιλαμβάνεται και το οικονομικό κόστος.

#### Τεχνικά χαρακτηριστικά σχεδιασμού

Από τις βασικές διατάξεις της νομοθετικής πρόβλεψης είναι η διασφάλιση της ευστάθειας όχι μόνο του Χ.Υ.Τ.Α., αλλά και της περιοχής και του εδάφους θεμελίωσης. Παρότι δεν προσδιορίζεται η μεθοδολογία ανάλυσης της ευστάθειας, γίνεται σαφές ότι

κατά τη φάση λειτουργίας αλλά και μετά το πέρας αυτής θα πρέπει να εκτελείται έλεγχος ευστάθειας των απορριμματικών πρανών.

Όσον αφορά στην προστασία του εδάφους και των επιφανειακών υδάτων, αυτή επιτυγχάνεται με την εφαρμογή φυσικής υπάρχουσας (ενδεχομένως) μόνωσης, συστήματος τεχνητής μόνωσης από συμπίεσμένα αργιλικά υλικά και συνθετικής μεμβράνης, και συστήματος αποστράγγισης και συλλογής στραγγισμάτων. Οι σχετικές διατάξεις που αφορούν τα τεχνικά χαρακτηριστικά των επιμέρους συστημάτων αντικαταστάθηκαν από τις αντίστοιχες της Κ.Υ.Α. 29407/3508, με την οποία επιτεύχθηκε η ενσωμάτωση στο εθνικό δίκαιο της κοινοτικής οδηγίας 99/31. Επιπλέον των όσων αναφέρθηκαν στην παράγραφο 2.1.2, ορίζεται και η χρήση γεωφάσματος προστασίας της γεωμεμβράνης, πριν την τοποθέτηση της στρώσης αποστράγγισης. Επίσης, προτείνεται η γεωμεμβράνη να χαρακτηρίζεται από εφελκυστική αντοχή διαρροής και θραύσης μεγαλύτερη από 15MPa και 24MPa, αντίστοιχα.

#### **2.1.4 Ελλείψεις και τεχνικά θέματα των κανονιστικών διατάξεων**

Η επισκόπηση των διεθνών και ελληνικών διατάξεων που αφορούν στον αντισεισμικό σχεδιασμό των χώρων απόθεσης απορριμμάτων αλλά και τις τεχνικές προδιαγραφές τους ανέδειξε μερικά προβλήματα και ελλείψεις. Πιο συγκεκριμένα, οι ευρωπαϊκές οδηγίες και οι ελληνικές νομοθετικές ρυθμίσεις αμελούν το θέμα της αντισεισμικής θωράκισης των Χ.Υ.Τ.Α., παρόλο που η Ελλάδα αλλά και άλλες χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης (π.χ. Ιταλία) χαρακτηρίζονται από έντονη σεισμική δραστηριότητα.

Όσον αφορά στις αμερικάνικες οδηγίες παρατηρείται ελλιπής αντιμετώπιση του προβλήματος κυρίως σχετικά με δύο άξονες. Αρχικά η αντισεισμική συμπεριφορά εντάσσεται στα θέματα χωροθέτησης του έργου και όχι στον σχεδιασμό του. Αυτός ο τρόπος αντιμετώπισης όμως, λόγω της αυξανόμενης πληθυσμιακής κάλυψης και της πληθώρας των άλλων κριτηρίων επιλογής της θέσης του έργου που παρουσιάστηκαν, κρίνεται ως μη ρεαλιστικός. Αφετέρου, στις απαιτήσεις ευστάθειας του απορριμματικού όγκου και επάρκειας των στεγανωτικών στρώσεων και λοιπών συστημάτων του Χ.Υ.Τ.Α. έναντι της σεισμικής καταπόνησης, δεν περιλαμβάνονται οδηγίες για την προτεινόμενη μεθοδολογία σχεδιασμού. Επίσης ενώ, απαιτείται μεν επαρκής συντελεστής ασφαλείας δεν προσδιορίζεται ο τρόπος εύρεσης της τιμής του. Γίνεται αναφορά στην ψευδοστατική μέθοδο ανάλυσης ευστάθειας πρανών και προτείνονται κατάλληλοι συντελεστές ασφαλείας στην ενότητα που αναφέρεται στις διατάξεις για την

αντιμετώπιση περιοχών επικίνδυνων για την ανάπτυξη κατολισθητικών φαινομένων. Παρατηρείται επίσης, ότι οι προτεινόμενοι συντελεστές ασφαλείας έναντι σεισμικής ευστάθειας πρανών είναι μεγαλύτεροι της μονάδας, και αυξάνουν αρκετά καθώς αυξάνεται η αβεβαιότητα των παραμέτρων αντοχής (βλ. Πίνακα 2.1). Το γεγονός αυτό μπορεί να οδηγήσει σε υπερβολικά συντηρητικό σχεδιασμό, ειδικά αν εφαρμοστεί στα απορριμματικά πρανή.

Τέλος, από τις κανονιστικές διατάξεις έγινε σαφές ότι στη βάση του Χ.Υ.Τ.Α. κατασκευάζεται σύστημα στεγάνωσης αποτελούμενο από ένα σύνολο εδαφικών και γεωσυνθετικών στρώσεων, η εναλλαγή των οποίων οδηγεί στην διαμόρφωση αρκετών διεπιφανειών εδάφους – γεωσυνθετικών, αλλά και γεωσυνθετικών μεταξύ τους. Παρατηρείται επίσης, ότι οι ευρωπαϊκές οδηγίες είναι πιο συντηρητικές στις προτεινόμενες τεχνικές προδιαγραφές σε σχέση με τις αμερικάνικες.

## **2.2 ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΤΡΩΤΟΤΗΤΑ Χ.Υ.Τ.Α.**

Η παρακολούθηση και καταγραφή των βλαβών που έχουν παρατηρηθεί σε Χ.Υ.Τ.Α. έπειτα από σοβαρή σεισμική καταπόνησή τους, έχει δώσει το έναυσμα για την εξέλιξη των μέτρων που στοχεύουν στην αντισεισμική θωράκισή τους. Είναι σημαντική η συστηματική καταγραφή των βλαβών καθώς, αφενός μεν αποτιμάται με αυτό τον τρόπο η υφιστάμενη μεθοδολογία σχεδιασμού, αφετέρου προσδιορίζεται ο τρόπος της σεισμικής απόκρισης της κατασκευής, δηλαδή οι κρίσιμες μορφές αστοχίας. Επιπλέον, αποτελέσματα καλά τεκμηριωμένων καταγραφών μπορούν να χρησιμοποιηθούν και σε ανάστροφες αναλύσεις με στόχο τον προσδιορισμό των δυναμικών ιδιοτήτων του απορριμματικού υλικού. Ακολουθεί μία συνοπτική παρουσίαση των αστοχιών που παρατηρήθηκαν σε Χ.Υ.Τ.Α. έπειτα από πρόσφατους σεισμούς, και εν συνεχεία επιχειρείται κατηγοριοποίηση των βλαβών σε μία συγκεντρωτική παρουσίασή τους.

### **Σεισμός San Fernando (1971)**

Ο σεισμός του San Fernando (1971) προκλήθηκε από την διάρρηξη ενός ανάστροφου ρήγματος και βάσει καταγραφών της ευρύτερης περιοχής του epicέντρου, η μέγιστη επιτάχυνση στο βραχώδες υπόβαθρο για τους 11 Χ.Υ.Τ.Α. που βρίσκονταν σε ακτίνα 60km από το epicέντρο κυμαινόταν μεταξύ 0.05g και 0.5g. Στον Χ.Υ.Τ.Α. Russel Moe, όπου η μέγιστη επιτάχυνση εκτιμήθηκε στα 0.5g, παρατηρήθηκαν ρωγμές περιμετρικά των συνόρων καθώς και ρωγμές στο έδαφος επικάλυψης από όπου εκδηλώθηκαν και

φωτιές λόγω έλλειψης συστήματος απαγωγής βιοαερίου. Επίσης, στους Χ.Υ.Τ.Α. Sunshine Canyon και Scholl Canyon, όπου η μέγιστη επιτάχυνση εκτιμήθηκε από σχέσεις εξασθένισης ίση με 0.3g και 0.19g αντίστοιχα, παρουσιάστηκαν ρωγμές στο έδαφος επικάλυψης. Σε κανέναν από τους προαναφερθέντες Χ.Υ.Τ.Α. δεν υπήρχε σύστημα στεγάνωσης (Matasovic et al., 1998a).

#### **Σεισμός Whittier Narrows (1987)**

Ένα ανάστροφο «τυφλό» ρήγμα προκάλεσε τον σεισμό του Whittier Narrows (1987). Παρόλο που σε κοντινή απόσταση βρισκόντουσαν αρκετοί Χ.Υ.Τ.Α., βλάβες αναφέρθηκαν μόνο στον Operating Industries Inc. (O.I.I.). Η επιτάχυνση στο βραχώδες υπόβαθρο του εν λόγω Χ.Υ.Τ.Α., ο οποίος δεν διαθέτει σύστημα στεγάνωσης, αναφέρεται ότι λαμβάνει τιμές από 0.24g έως 0.29g έπειτα από την εφαρμογή σχέσεων εξασθένισης, ενώ παρατηρήθηκαν ρωγμές εύρους 25-50mm και 15-40mm στα πρανή και στο κατάστρωμα αντίστοιχα. Έπειτα από το σεισμό αυτό τοποθετήθηκαν επιταχυνσιογράφοι στη βάση και στην επιφάνειά του (Matasovic et al., 1998a), οι οποίοι χρησίμευσαν μετέπειτα σε ανάστροφες αναλύσεις για τον προσδιορισμό των δυναμικών ιδιοτήτων του απορριμματικού υλικού.

#### **Σεισμός Loma Prieta (1989)**

Έπειτα από τον σεισμό της Loma Prieta (1989), εκτιμήθηκε η μετασεισμική συμπεριφορά περίπου 15 Χ.Υ.Τ.Α., κανένας εκ των οποίων δεν διέθετε σύστημα στεγάνωσης. Πιο συγκεκριμένα, σε τρεις από τους Χ.Υ.Τ.Α. (Kirby Canyon, Ben Lomond, Santa Cruz) διαπιστώθηκαν ρωγμές του εδάφους επικάλυψης εύρους 25-75mm και κυρίως σε περιοχές επαφής των απορριμμάτων με το φυσικό έδαφος. Στον Χ.Υ.Τ.Α. Guadalupe αναφέρεται ότι αναπτύχθηκε μετακίνηση του εδάφους επικάλυψης (Matasovic et al., 1998a).

#### **Σεισμός Landers (1992)**

Στον ομώνυμο Χ.Υ.Τ.Α., ο οποίος δεν διαθέτει σύστημα στεγάνωσης, παρατηρήθηκαν ρωγμές του εδάφους επικάλυψης στα πρανή (Anderson, 1995).

#### **Σεισμός Northridge (1994)**

Ο Χ.Υ.Τ.Α. Calabasas είναι ο πιο κοντινός στο επίκεντρο του σεισμού του Northridge (1994) και η εκτιμώμενη επιτάχυνση στο βραχώδες υπόβαθρο είναι ίση με 0.20g. Παρόλο που αναπτύχθηκε διαμήκης ρωγμή μήκους 215m, με εύρος 150mm και κατακόρυφη



μετατόπιση ίση με 100mm, δεν παρατηρήθηκε επιφανειακή εκδήλωση των απορριμμάτων. Επιπλέον, αρκετές ρωγμές παράλληλες και κάθετες στους αναβαθμούς παρουσιάστηκαν στα πρανή (Anderson, 1995).

Αν και παρόμοιου τύπου βλάβες αναπτύχθηκαν και στον Χ.Υ.Τ.Α. Sunshine Canyon η μέγιστη επιβαλλόμενη επιτάχυνση θεωρείται ότι είναι μεγαλύτερη (0.46g). Πιο συγκεκριμένα, παρουσιάστηκαν εφελκυστικές διαμήκεις ρωγμές παράλληλα προς την αιχμή του πρανούς καθώς και μία ρωγμή με κατακόρυφη μετακίνηση ίση με 380mm στην επιφάνεια του απορριμματικού όγκου (Anderson, 1995). Σύμφωνα με τους Augello et al. (1995) οι διαμήκεις ρωγμές στα σύνορα με το φυσικό έδαφος είχαν εύρος από 20mm έως 300mm και κατακόρυφη μετακίνηση από 150mm έως 300mm. Μία χαρακτηριστική περίπτωση διακρίνεται στο Σχήμα 2.2. Επιπλέον, αναφέρεται ότι μικρότερου εύρους (20mm) ρωγμές αναπτύχθηκαν και επί των πρανών.

Με μέγιστη επιτάχυνση ίση με 0.21g, ο Χ.Υ.Τ.Α. Τογον παρουσίασε ρωγμές του εδάφους επικάλυψης (25mm – 50mm) και καθίζηση στην επαφή απορριμμάτων και φυσικού εδάφους στο ανατολικό τμήμα, καθώς και ρωγμές στην επιφάνεια και επί των πρανών στο δυτικό τμήμα. Ακόμη παρατηρήθηκαν βλάβες στο σύστημα απαγωγής βιοαερίου (Augello et al., 1995).

Στον Χ.Υ.Τ.Α. Russel Moe, όπου η μέγιστη επιτάχυνση εκτιμήθηκε στα 0.44g, παρατηρήθηκαν ρωγμές περιμετρικά των συνόρων καθώς και θραύση δύο αγωγών βιοαερίου. Εκτός των προαναφερθέντων, ένας ακόμη Χ.Υ.Τ.Α. ο οποίος παρουσίασε βλάβες έπειτα από το σεισμό του Northridge (1994), και επιπλέον δεν διέθετε σύστημα στεγάνωσης ήταν ο Tierra Rejada. Ο Anderson (1995) αναφέρει ότι εκδηλώθηκαν εκτός από ρωγμές με εύρος από 10mm έως 150mm, ρωγμές κατά μήκος των συνόρων με εύρος από 20mm έως 70mm, διαρροή βιοαερίου και ρωγμές με κατακόρυφη μετακίνηση ίση με 150mm. Καθώς στην περιοχή είχαν ήδη χαρτογραφηθεί δύο ρήγματα, σύμφωνα με τον συγγραφέα δεν έχει επιβεβαιωθεί αν οι ρωγμές οφείλονται στη δυναμική απόκριση της απορριμματικής μάζας ή στην ανάπτυξη μετακίνησης σε κάποιο από τα ρήγματα αυτά.

Με μερική στεγάνωση έχει κατασκευαστεί ο Χ.Υ.Τ.Α. Chiquita Canyon, στο βραχώδες υπόβαθρο του οποίου θεωρείται ότι η μέγιστη επιτάχυνση ήταν ίση με 0.33g κατά το σεισμό του Northridge. Στο κεντρικό του τμήμα δεν αναφέρθηκαν βλάβες, αλλά στην περιοχή «Α» παρατηρήθηκαν ρωγμές στην επικάλυψη εδάφους με κατακόρυφη διάσταση 120mm και οριζόντια 150mm. Στην περιοχή «Β» παρουσιάστηκε μειωμένης

έκτασης καθίζηση και ρωγμές κοντά στην περίμετρο, ενώ στην περιοχή «C» εντοπίστηκε ρωγμή στη γεωμεμβράνη μήκους 4.3m και πλάτους 250mm παράλληλα προς την άρθρωση του συστήματος αγκύρωσής της (Σχήμα 2.3). Στην περιοχή «D» οι ρωγμές ήταν επίσης κοντά στην επαφή με το φυσικό έδαφος και είχαν κατακόρυφη διάσταση 200mm και οριζόντια 300mm, με αποτέλεσμα να παρατηρείται επιφανειακή εκδήλωση της στεγάνωσης (Anderson, 1995). Οι Augello et al. (1995) αναφέρουν ότι και σε αυτήν την περιοχή παρατηρήθηκε ρωγμή της γεωμεμβράνης στεγάνωσης επί του πλευρικού πρανούς κοντά στο σύστημα αγκύρωσης. Επιπλέον, αναφέρουν ότι η ρωγμή αποτελούνταν από τρία παράλληλα τμήματα με συνολικό μήκος περίπου 27m και εύρος 300mm. Στην περιοχή «C» εκτός της ρωγμής στη γεωμεμβράνη, αναπτύχθηκαν και διαμήκεις ρωγμές στην διεπιφάνεια γεωμεμβράνης - απορριμμάτων με εύρος 300 mm και κατακόρυφη μετακίνηση από 150 mm έως 300 mm.



**Σχήμα 2.2.** Διαμήκης ρωγμή κοντά στα σύνορα με το φυσικό έδαφος η οποία εκδηλώθηκε μετά τον σεισμό του Northridge (1994) στο Χ.Υ.Τ.Α. Sunshine Canyon (Matasovic et al., 1998a).

Σε τρία τμήματα χωρίζεται και ο Χ.Υ.Τ.Α. Brandley Avenue (East, West, West Extension), σε δύο εκ των οποίων παρατηρήθηκαν βλάβες. Στον East Brandley Avenue εμφανίστηκαν ρωγμές καθίζησης με μετακίνηση μέχρι 150mm, ενώ στο West Extension αναφέρθηκαν εκτεταμένες ρωγμές, περιορισμένου εύρους καθιζήσεις και ρωγμή στο γεώφασμα του συστήματος στεγάνωσης, χωρίς συνακόλουθη βλάβη στη γεωμεμβράνη.

Αντιθέτως, στην περιοχή «C» του Χ.Υ.Τ.Α. Lopez Canyon παρουσιάστηκε ρωγμή στη γεωμεμβράνη HDPE με πάχος 2mm, ενώ στην περιοχή «B» εντοπίστηκαν επιφανειακές ρωγμές στα σύνορα και θραύση στους αγωγούς του βιοαερίου (Anderson, 1995). Σύμφωνα με τους Augello et al. (1995), ρωγμή διαπιστώθηκε στο γεωόφασμα του συστήματος στεγάνωσης, η οποία αποδίδεται στον εξοπλισμό λειτουργίας, ενώ δεν αναφέρεται βλάβη στη γεωμεμβράνη.



**Σχήμα 2.3.** Ρωγμή στη γεωμεμβράνη στεγάνωσης η οποία εκδηλώθηκε μετά τον σεισμό του Northridge (1994) στο Χ.Υ.Τ.Α. Chiquita Canyon στην περιοχή C (Matasovic et al., 1998a).

Στη βάση του Χ.Υ.Τ.Α. Ο.Ι.Ι. η μέγιστη καταγεγραμμένη οριζόντια επιτάχυνση έφτασε τα 0.25g, ενώ μετά τον σεισμό του Northridge (1994) οι βλάβες αποτελούνταν κυρίως από ρωγμές του εδάφους επικάλυψης στα πρανή με εύρος από 50mm έως 150mm. Από τα φάσματα των καταγεγραμμένων χρονοϊστοριών επιτάχυνσης εκτιμήθηκε η ιδιοπερίοδος της κατασκευής περίπου ίση με 1.2sec (Augello et al., 1995).

Επιπλέον σε συνδυασμό με τις ρωγμές παρατηρήθηκε και κατακόρυφη μετακίνηση επί των αναβαθμών σε μερικές περιπτώσεις (βλ. Σχήμα 2.4, Matasovic et al., 1998a).



**Σχήμα 2.4.** Ρωγμές και κατακόρυφη μετακίνηση επί των αναβαθμών του Χ.Υ.Τ.Α. Ο.Ι.Ι., οι οποίες εκδηλώθηκαν μετά τον σεισμό του Northridge (1994) (Matasovic et al., 1998a).

### **Σεισμός Chi-Chi (1999)**

Ο σεισμός του Chi-Chi (1999) προκλήθηκε κατά τη διάρρηξη του ανάστροφου ρήγματος Chelungpu. Ο Χ.Υ.Τ.Α. Wu Feng, ο οποίος διέθετε γεωμεμβράνη στεγάνωσης, υπέστη βλάβες λόγω της μετακίνησης του ρήγματος. Πιο συγκεκριμένα αναφέρεται ότι παρόλο που δεν παρατηρήθηκε καταστροφική αστοχία της απορριμματικής μάζας, αναπτύχθηκε σημαντική παραμόρφωση και μετακίνηση των απορριμμάτων στον πόδα του πρανούς. Επιπλέον, μικρού μεγέθους κατολισθήσεις επί της διεπιφάνειας με την γεωμεμβράνη παρατηρήθηκαν στα ανάντη του πρανούς, χωρίς να αναφερθεί ωστόσο βλάβη στη γεωμεμβράνη (Anderson, 2000).

### **Σεισμός Nisqually (2001)**

Έπειτα από τον σεισμό Nisqually (2001) εξετάστηκαν οι τέσσερις Χ.Υ.Τ.Α. που βρίσκονταν σε κοντινή απόσταση από το επίκεντρο. Από αυτούς, στους Χ.Υ.Τ.Α. Kent και Midway, οι οποίοι δεν βρίσκόντουσαν σε φάση λειτουργίας, διαπιστώθηκε περιορισμένου εύρους μετακίνηση των απορριμματικών πρανών. Στην πρώτη περίπτωση αυτό έγινε εμφανές από την μετακίνηση των επιφανειακών αγωγών πολυαιθυλενίου που χρησιμοποιούν για τη συλλογή του βιοαερίου (βλ. Σχήμα 2.5), ενώ και στη δεύτερη σημάδια μετακίνησης των αγωγών αποδεικνύουν την ανάπτυξη μετατόπισης επί του απορριμματικού πρανούς (Bray et al., 2001).



**Σχήμα 2.5.** Μετακίνηση των επιφανειακών αγωγών πολυαιθυλενίου του Χ.Υ.Τ.Α. Kent έπειτα από το σεισμό Nisqualli (Bray et al., 2001).

### 2.2.1 Κατηγοριοποίηση βλαβών και συγκεντρωτική παρουσίασή τους

Έπειτα από τον σεισμό του Northridge (1994), διατυπώθηκε από τους Matasovic et al. (1998a) ένα σύστημα διαβάθμισης των βλαβών σε Χ.Υ.Τ.Α. Τα προτεινόμενα επίπεδα βλαβών είναι:

- (I) Μικρές ή μηδαμινές Βλάβες: ανυπαρξία αστοχιών ή μικρής έκτασης βλάβες χωρίς να είναι αναγκαία η άμεση επιδιόρθωσή τους.
- (II) Μικρές Βλάβες: οι βλάβες επιδιορθώνονται χωρίς να είναι αναγκαία η διακοπή της λειτουργίας του Χ.Υ.Τ.Α.
- (III) Μεσαίες Βλάβες: οι βλάβες είναι εφικτό να επιδιορθωθούν εντός 48 ωρών από το απασχολούμενο προσωπικό, δεν τίθεται θέμα διακινδύνευσης της ακεραιότητας του συστήματος απόθεσης απορριμμάτων.
- (IV) Σημαντικές Βλάβες: το σύστημα απόθεσης απορριμμάτων έχει υποστεί βλάβες, χωρίς τη διαρροή ρυπογόνων ουσιών. Οι βλάβες δεν μπορούν να επιδιορθωθούν εντός 48 ωρών και απαιτείται η συνεισφορά ειδικού εργολάβου για την επιδιόρθωσή της.

- (V) Μεγάλες Βλάβες: γενική αστάθεια με την ανάπτυξη σημαντικών παραμορφώσεων. Η ακεραιότητα του συστήματος απόθεσης απορριμμάτων πλήττεται.

Εν γένει η επισκόπηση των βλαβών που αναπτύχθηκαν έπειτα από πρόσφατους σεισμούς σε Χ.Υ.Τ.Α. έδειξε ότι μέχρι στιγμής δεν έχει παρατηρηθεί κάποια καταστροφική αστοχία (Κατηγορία V). Πιο συγκεκριμένα, οι παρατηρηθείσες βλάβες οι οποίες παρουσιάζονται συνοπτικά στον Πίνακα 2.2., περιλαμβάνουν: (α) ρωγμές του εδάφους επικάλυψης [P.E.], (β) περιφερειακές ρωγμές συνόρων [P.Σ.], (γ) ρωγμές σε συνδυασμό με καθίζηση [P.K.], (δ) διαμήκεις ρωγμές στο κατάστρωμα [Δ.Ρ.Κ.] ή στους αναβαθμούς [Δ.Ρ.Α.], (ε) μετακίνηση στα πρανά [Μ.Π.], (στ) βλάβες στο σύστημα στεγάνωσης [Β.Σ.], και (ζ) βλάβες στο σύστημα απαγωγής βιοαερίου [Β.Β.].

Επιπλέον, στον Πίνακα 2.2 παρουσιάζεται η μέγιστη επιτάχυνση στο βραχύδες υπόβαθρο (PGA), όπως αναφέρεται ότι έχει εκτιμηθεί από σχέσεις εξασθένισης στις προαναφερθείσες εργασίες η οποία κυμαίνεται από 0.1g έως 0.6g. Ακόμη παρατίθεται η κατηγορία βλάβης σύμφωνα με τα προτεινόμενα επίπεδα βλαβών.

Η ρηγμάτωση αποτελεί την συνηθέστερη μορφή αστοχίας και πιο συγκεκριμένα οι περιφερειακές ρωγμές συνόρων, οι οποίες στην περίπτωση που ο Χ.Υ.Τ.Α. δεν διαθέτει σύστημα στεγάνωσης ενέχουν τον κίνδυνο ρύπανσης του περιβάλλοντος εδάφους και του υδροφόρου ορίζοντα. Ο συγκεκριμένος τύπος αστοχίας πιθανολογείται ότι οφείλεται στη διαφορετική σεισμική απόκριση του εύκαμπτου απορριμματικού υλικού και του παρακείμενου πιο δύσκαμπτου εδάφους ή βράχου.

Πρέπει να σημειωθεί ότι μόλις 8 από τους 23 Χ.Υ.Τ.Α. στους οποίους αναφέρθηκαν βλάβες λόγω σεισμού διέθεταν σύστημα στεγάνωσης. Παρόλο που οι Χ.Υ.Τ.Α. με σύστημα στεγάνωσης ήταν λίγοι σε αριθμό, σε τέσσερις από αυτούς αναφέρθηκε ρωγμή στην γεωμεμβράνη. Επιπροσθέτως, σε μερικές περιπτώσεις δεν ήταν σαφές αν οι βλάβες είχαν προκληθεί κατά την κατασκευή του Χ.Υ.Τ.Α. ή λόγω της σεισμικής καταπόνησης. Καθώς οι εν λόγω βλάβες ήταν επισκευάσιμες και δεν προκάλεσαν δυσμενείς περιβαλλοντικές επιπτώσεις μπορούν να θεωρηθούν ότι ανήκουν στην Κατηγορία IV κατά Matasovic et al. (1998a). Επίσης, πρέπει να επισημανθεί ότι συχνά δεν είναι εφικτό να είναι γνωστές οι επιπτώσεις του σεισμού στα συστήματα στεγάνωσης στη βάση του Χ.Υ.Τ.Α., αφού ως επί το πλείστον δεν είναι δυνατή η επισκεψιμότητά τους.

**Πίνακας 2.2.** Συγκεντρωτικά στοιχεία βλαβών που έχουν παρατηρηθεί σε Χ.Υ.Τ.Α. έπειτα από τους σεισμούς San Fernando (S. F.), Whittier Narrows (W. N.), Loma Prieta (L. P.), Landers (L.), Northridge (No.), Chi-Chi (C.-C.), και Nisqualli (Ni.).

| Χ.Υ.Τ.Α.                  | Σεισμός | PGA<br>(g) | Τύπος βλάβης         | Σύστημα<br>στεγάνωσης | Εύρος<br>(mm) | Κατ. |
|---------------------------|---------|------------|----------------------|-----------------------|---------------|------|
| Russell Moe               | S. F.   | 0.50       | P.Σ., P.E.           | X                     | -             | II   |
|                           | No.     | 0.44       | P.Σ., B.B.           | X                     | -             | III  |
|                           | S. F.   | 0.30       | P.E.                 | X                     | -             | II   |
| Sunshine Canyon           | No.     | 0.46       | Δ.P.A.               | X                     | 20            | III  |
|                           | No.     | 0.46       | P.Σ.                 | X                     | 300           | III  |
|                           | No.     | 0.46       | Δ.P.K.               | X                     | 380           | III  |
| Scholl Canyon             | S. F.   | 0.19       | P.E.                 | X                     | -             | I    |
|                           | W. N.   | 0.26       | P.E.                 | X                     | 15-40         | III  |
| Operating Industries Inc. | W. N.   | 0.26       | Δ.P.A.               | X                     | 25-50         | III  |
|                           | No.     | 0.10       | Δ.P.A.               | X                     | 50-150        | II   |
|                           | No.     | 0.10       | Δ.P.K.               | X                     | 5             | II   |
| Guadalupe                 | L. P.   | 0.43       | M.Π.                 | X                     | -             | II   |
| Ben Lomond                | L. P.   | 0.38       | P.E.                 | X                     | 25-75         | II   |
| Kirby Canyon              | L. P.   | 0.34       | P.E.                 | X                     | 25-75         | II   |
| Lopez Canyon              | No.     | 0.44       | B.Σ., P.Σ., B.B.     | √                     | -             | III  |
| Bradley East              | No.     | 0.36       | P.K.                 | X                     | 150           | II   |
| Bradley West Ex.          | No.     | 0.36       | P.K., B.Σ.           | √                     | -             | III  |
| Chiquita A                | No.     | 0.33       | P.E.                 | X                     | 150           | II   |
| Chiquita B                | No.     | 0.33       | P.Σ.                 | X                     | -             | II   |
| Chiquita C                | No.     | 0.33       | P.Σ.                 | √                     | 300           | IV   |
|                           | No.     | 0.33       | B.Σ.                 | √                     | 250           | IV   |
| Chiquita D                | No.     | 0.33       | P.Σ.                 | √                     | 300           | IV   |
|                           | No.     | 0.33       | B.Σ.                 | √                     | 300           | IV   |
| Toyon Canyon              | No.     | 0.21       | P.Σ.                 | X                     | 25-50         | II   |
|                           | No.     | 0.21       | B.B., Δ.P.K., Δ.P.A. | X                     | -             | II   |
|                           | No.     | 0.20       | Δ.P.K.               | √                     | 150           | III  |
| Calabasas                 | No.     | 0.20       | Δ.P.A.               | √                     | -             | III  |
| Tierra Rejada             | No.     | 0.21       | P.Σ.                 | X                     | 20-70         | II   |
|                           | No.     | 0.21       | P.E.                 | X                     | 10-150        | II   |
| Landers                   | L.      | 0.29       | P.E.                 | X                     | -             | I    |
| Santa Cruz                | L. P.   | 0.30       | P.E.                 | X                     | 25-75         | I    |
| Wu-Feng                   | C.-C.   | 0.60       | M.Π.                 | √                     | -             | III  |
| Midway                    | Ni.     | -          | M.Π.                 | √                     | 50            | II   |
| Kent                      | Ni.     | -          | M.Π.                 | √                     | 100           | II   |

Αν και περιπτώσεις ολικής αστάθειας των απορριμματικών πρανών δεν έχουν αναφερθεί, στους περισσότερους Χ.Υ.Τ.Α. έχουν καταγραφεί ρωγμές στα πρανή και περιορισμένου εύρους μετακινήσεις οι οποίες υποδηλώνουν την ανάπτυξη μόνιμων σεισμικών παραμορφώσεων στα απορριμματικά πρανή. Πρέπει να σημειωθεί δε ότι γενικά είναι δύσκολος ο εντοπισμός και η αντιμετώπιση εκ των υστέρων των όποιων βλαβών, ειδικά αυτών που αφορούν το σύστημα στεγάνωσης, οπότε είναι πιθανόν να μην είναι όλες οι αστοχίες καταγεγραμμένες. Τέλος, η διασταύρωση με ενεργό ρήγμα παρατηρήθηκε ότι συνοδεύεται από μεγάλο μέγεθος παραμορφώσεις και μετακίνηση του απορριμματικού όγκου χωρίς την ανάπτυξη καταστροφικής αστοχίας.

### 2.3 ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ Χ.Υ.Τ.Α.

Όπως διαπιστώθηκε έπειτα από την επισκόπηση των κανονιστικών διατάξεων για τον αντισεισμικό σχεδιασμό των Χ.Υ.Τ.Α., δεν προτείνεται κάποια μεθοδολογία σχεδιασμού. Το συγκεκριμένο πρόβλημα αφενός έχει προκύψει σε διάφορες περιπτώσεις Χ.Υ.Τ.Α., ειδικά σε περιπτώσεις επικίνδυνων αποβλήτων, και αφετέρου έχει αποτελέσει πεδίο έρευνας για πολλούς ερευνητές. Είναι λοιπόν ανάγκη για τους σκοπούς της παρούσας διατριβής να παρουσιαστεί η κοινή πρακτική αντιμετώπισης του εν λόγω προβλήματος προκειμένου να προσδιοριστούν τα ζητήματα τα οποία χρήζουν περαιτέρω διερεύνησης.

Εν γένει, ο αντισεισμικός σχεδιασμός των Χ.Υ.Τ.Α. ακολουθεί τις διαδικασίες που σχετίζονται με τον σχεδιασμό των χωμάτων φραγμάτων και των τεχνητών επιχωμάτων, όπως αναφέρεται χαρακτηριστικά από τον Sêco e Pinto (2004). Ταυτόχρονα τονίζεται ότι στις διαδικασίες ανάλυσης θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι ιδιαιτερότητες της εν λόγω γεωκατασκευής. Σε αυτές περιλαμβάνονται οι μηχανικές ιδιότητες του απορριμματικού υλικού, οι οποίες επηρεάζονται από πολλαπλές παραμέτρους και χαρακτηρίζονται από πλήθος αβεβαιοτήτων, με αποτέλεσμα να παρατηρείται έντονο ερευνητικό ενδιαφέρον στο συγκεκριμένο αντικείμενο. Για τον λόγο αυτό θα παρουσιαστούν αναλυτικά σε επόμενη παράγραφο τα αποτελέσματα των δημοσιευμένων εργασιών επί του συγκεκριμένου αντικειμένου. Επιπροσθέτως, όπως έχει ήδη αναφερθεί, τόσο το σύστημα στεγάνωσης στη βάση του Χ.Υ.Τ.Α. όσο και το σύστημα τελικής κάλυψης αποτελούνται από διαδοχικές στρώσεις εδάφους – γεωσυνθετικών με αποτέλεσμα να δημιουργούνται προδιαγεγραμμένες επιφάνειες μειωμένης διατμητικής αντοχής. Είναι λοιπόν οξύμωρο το γεγονός ότι μία τεχνική, η οποία αναπτύχθηκε κυρίως για την προστασία του περιβάλλοντος, να δύναται να συντελέσει στην σεισμική



αστάθεια της κατασκευής και επομένως σε δυσμενείς περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Το τελευταίο γεγονός έχει οδηγήσει στη θεώρηση αυτών των διεπιφανειών ως των κρίσιμων επιφανειών ολίσθησης στις αναλύσεις ευστάθειας (Bray and Repetto, 1994).

Μια επιπλέον ιδιαιτερότητα των Χ.Υ.Τ.Α. αποτελεί η γεωμετρία. Εν γένει υπάρχουν κάποιες τυπικές διατάξεις η εφαρμογή των οποίων εξαρτάται από τοπογραφικούς και υδρογεωλογικούς παράγοντες. Οι διατάξεις αυτές κατηγοριοποιούνται ως: (α) υπόγειος Χ.Υ.Τ.Α., κατασκευασμένος έπειτα από εκσκαφή της περιοχής και απόθεση απορριμμάτων, (β) πλευρικός Χ.Υ.Τ.Α., κατασκευασμένος έπειτα από πλευρική τοποθέτηση των απορριμμάτων σε υφιστάμενο πρανές, (γ) υπόγειος Χ.Υ.Τ.Α., κατασκευασμένος έπειτα από πλήρωση κοιλάδας, (δ) υπόγειος και υπέργειος Χ.Υ.Τ.Α., και (ε) υπέργειος Χ.Υ.Τ.Α. (Sharma and Lewis, 1994 και Bray and Repetto, 1994). Τέλος, η επιλογή των χαρακτηριστικών της σεισμικής διέγερσης, δηλαδή: (α) μέγιστη επιτάχυνση στο βραχώδες υπόβαθρο, (β) δεσπόζουσα περίοδος, και (γ) διάρκεια της ισχυρής σεισμικής κίνησης, είναι σημαντικές παράμετροι σχεδιασμού, όπως άλλωστε ισχύει για τον αντισεισμικό σχεδιασμό οποιουδήποτε τεχνικού έργου.

Οι διαδικασίες που ακολουθούνται κατά τον σχεδιασμό μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε: (α) πειραματικές, (β) αναλυτικές και (γ) αριθμητικές. Εν γένει διακρίνονται δύο στάδια σχεδιασμού:

- προσδιορισμός της δυναμικής απόκρισης
- προσδιορισμός της δυναμικής ευστάθειας.

Για το πρώτο στάδιο αναφέρεται η εφαρμογή κυρίως δύο μεθοδολογιών. Η πρώτη αναφέρεται στην ημι-αναλυτική μονοδιάστατη απόκριση λόγω κατακόρυφης διάδοσης διατμητικών κυμάτων (Schnabel et al., 1972) έχει εφαρμοστεί στην εκτίμηση της σεισμικής συμπεριφοράς υφιστάμενων Χ.Υ.Τ.Α. (π.χ. Del Nero et al., 1995 και Kavazanjian et al., 1995a). Κατά τη δεύτερη εφαρμόζεται η διδιάστατη προσομοίωση με πεπερασμένα στοιχεία, η οποία αν και δεν έχει βρει ακόμα ευρεία εφαρμογή, αποτελεί ακριβέστερη διαδικασία ανάλυσης. Το αποτέλεσμα της εκτίμησης της δυναμικής απόκρισης θα πρέπει να είναι ο προσδιορισμός της ισοδύναμης επιτάχυνσης, η μέγιστη τιμή της οποίας θα πρέπει να χρησιμοποιείται ως σεισμικός συντελεστής κατά τις ψευδοστατικές αναλύσεις με στόχο την επίτευξη συντελεστού ασφαλείας μεγαλύτερου ή ίσου με τη μονάδα (Bray and Repetto, 1994). Ακόμη, η κρίσιμη επιτάχυνση για την

οποία η επιφάνεια αστοχίας είναι οριακά ευσταθής προκύπτει από ψευδοστατικές αναλύσεις.

Για την εκτίμηση της σεισμικής ευστάθειας, η αριθμητική εκτίμηση των σεισμικών παραμορφώσεων σύμφωνα με το προσομοίωμα Newmark (1965) αποτελεί κοινή πρακτική, όπως αναφέρεται από πολλούς ερευνητές (Sharma and Lewis, 1994, Sêco e Pinto, 2004, Krinitzsky et al., 1997, Kavazanjian and Matasovic, 2001, και Bray and Repetto, 1994). Σύμφωνα με αυτήν τη μέθοδο, οι σεισμικές μετακινήσεις προκύπτουν έπειτα από διπλή ολοκλήρωση της σχετικής επιτάχυνσης της επιφάνειας ολίσθησης. Όσον αφορά στο αποδεκτό επίπεδο αναπτυσσόμενων παραμορφώσεων, αναφέρεται ότι εντός της απορριμματικής μάζας η μέγιστη τιμή της σεισμικής μετακίνησης δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 0.3m, ενώ κατά μήκος του συστήματος στεγάνωσης η αντίστοιχη τιμή είναι 0.15m και τέλος κατά μήκος του συστήματος τελικής κάλυψης η μέγιστη επιτρεπόμενη μετακίνηση είναι ίση με 0.3m. Η σχετικά μεγάλη τιμή σεισμικής παραμόρφωσης για το σύστημα τελικής κάλυψης βασίζεται στο γεγονός ότι οι βλάβες του είναι επισκευάσιμες και εντοπίζονται σχετικά εύκολα (Kavazanjian and Matasovic, 2001).

Εν συνεχεία παρουσιάζονται λεπτομερώς τα αποτελέσματα της ερευνητικής δραστηριότητας που έχει λάβει χώρα κατά τις τελευταίες δεκαετίες σε σχέση με τη δυναμική απόκριση και τη δυναμική ευστάθεια των Χ.Υ.Τ.Α., αλλά και την εκτίμηση της σεισμικής έντασης στο σύστημα στεγάνωσης.

### **2.3.1 Δυναμική απόκριση Χ.Υ.Τ.Α.**

Η δυναμική απόκριση των Χ.Υ.Τ.Α. έχει διερευνηθεί πειραματικά, διατυπώνοντας αναλυτικές λύσεις αλλά και διεξάγοντας αριθμητικές αναλύσεις.

Οι Gunturi and Elgamal (1998) για να εξετάσουν την περίπτωση της δυναμικής απόκρισης Χ.Υ.Τ.Α. με γεωμετρία λόφου, βασίστηκαν στην θεωρία της διατμητικής δοκού και διατύπωσαν τις αναλυτικές σχέσεις για μία μη ομοιογενή, κωνικής διατομής διατμητική δοκό. Διαπιστώθηκε σε αυτήν την εργασία ότι για σχετικά μεγάλες τιμές του λόγου αποκοπής δεν παίζει σημαντικό ρόλο η μη ομοιογενής κατανομή του μέτρου διάτμησης στις υπολογισθείσες ιδιοσυχρότητες και επιπλέον οι ιδιομορφές παρουσιάζουν μικρή διαφοροποίηση. Συμπερασματικά, το νέο αναλυτικό

προσομοίωμα οδηγεί σε υψηλότερη κύρια ιδιοσυχνότητα από ότι η κλασσική θεώρηση της διατμητικής δοκού.

Οι Repetto and Bray (1992) κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι οι επιτόπου εδαφικές συνθήκες μπορεί να παίζουν σημαντικό ρόλο στην απόκριση του Χ.Υ.Τ.Α. και για το λόγο αυτό πρέπει να λαμβάνονται υπόψη. Πιο συγκεκριμένα, εξετάζεται η ακρίβεια της κοινής πρακτικής, σύμφωνα με την οποία προσδιορίζεται αρχικά η απόκριση στην επιφάνεια θεμελίωσης της γεωκατασκευής χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η ύπαρξη του υπερκείμενου απορριμματικού όγκου. Για τον σκοπό αυτό διεξάγονται μονοδιάστατες δυναμικές αναλύσεις εδαφικής απόκρισης (Schnabel et al., 1972), και τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η εν λόγω παραδοχή οδηγεί σε ιδιαίτερα συντηρητική εκτίμηση της μέγιστης επιτάχυνσης στη διεπιφάνεια θεμελίωσης – Χ.Υ.Τ.Α. ειδικά για σχετικά μεγάλο ύψος απορριμμάτων (>15m).

Οι Singh and Sun (1995) προτείνουν, βασιζόμενοι σε δημοσιευμένα αποτελέσματα αναλύσεων και καταγραφών και σε υπολογισμούς μονοδιάστατων αναλύσεων, μια προσεγγιστική συσχέτιση για την ενίσχυση της μέγιστης επιτάχυνσης, συναρτήσει του ύψους του Χ.Υ.Τ.Α. και της ταχύτητας διάδοσης διατμητικού κύματος των απορριμμάτων. Τονίζουν δε ότι οι μέγιστες τιμές της ενίσχυσης αντιστοιχούν σε περιπτώσεις συντονισμού.

Οι Yegian et al. (1998) προτείνουν μία απλοποιητική διαδικασία ανάλυσης της μονοδιάστατης δυναμικής απόκρισης Χ.Υ.Τ.Α. προκειμένου να λαμβάνεται υπόψη η επίδραση των γεωσυνθετικών στρώσεων. Σύμφωνα με αυτή τη μεθοδολογία τα γεωσυνθετικά αντικαθίστανται από μία ισοδύναμη στρώση εδάφους, η οποία μπορεί να προσομοιώνει την ανάπτυξη ολίσθησης κατά την επιβολή της σεισμικής διέγερσης. Τα χαρακτηριστικά της ισοδύναμης εδαφικής στρώσης, δηλαδή το μέτρο διάτμησης, ο λόγος απόσβεσης και η καμπύλη απομείωσης του μέτρου διάτμησης, προσδιορίστηκαν βάσει αποτελεσμάτων πειραμάτων σεισμικής τράπεζας σε διάφορες διεπιφάνειες γεωσυνθετικών.

Οι Rathje and Bray (2001) εξέτασαν την επίδραση του υπολογισμού της απόκρισης μέσω μονοδιάστατων και ακριβέστερων διδιάστατων αναλύσεων, στην εκτίμηση της ευστάθειας. Για την προσομοίωση της μη γραμμικής συμπεριφοράς του απορριμματικού υλικού επιλέχθηκαν οι καμπύλες απομείωσης του μέτρου διάτμησης – αύξησης του λόγου απόσβεσης για αργίλους με δείκτη πλαστιμότητας (PI) ίσο με 30. Πιο

συγκεκριμένα, οι μονοδιάστατες αναλύσεις προσεγγίζουν, υπερεκτιμώντας ελαφρώς, τον σεισμικό συντελεστή για ολίσθηση στη βάση. Επιπλέον, συμπέραναν ότι οι μονοδιάστατες αναλύσεις υπολογίζουν με αδρή προσέγγιση τις μέγιστες οριζόντιες επιταχύνσεις στο κατ'άστωμα της γεωκατασκευής, ενώ για την στέψη του πρσανούς οι αντίστοιχες τιμές υποεκτιμούνται. Επίσης προτείνουν ότι, η τοπογραφική επίδραση μπορεί να ληφθεί προσεγγιστικά υπόψη στον υπολογισμό του σεισμικού συντελεστή για το σύστημα τελικής κάλυψης πολλαπλασιάζοντας τις αντίστοιχες χρονοϊστορίες επιταχύνσεων από μονοδιάστατες αναλύσεις με ένα συντελεστή 1.3.

Οι Psarropoulos et al. (2007), εξέτασαν την επίδραση των τοπικών εδαφικών συνθηκών στην απόκριση υπέργειων – υπογείων και υπέργειων Χ.Υ.Τ.Α. Έπειτα από εκτενή παραμετρική διερεύνηση μέσω διδιάστατων αναλύσεων προσομοιωμάτων πεπερασμένων στοιχείων, κατέληξαν στο ότι η μη γραμμική συμπεριφορά του απορριμματικού υλικού επηρεάζει κατά κύριο λόγο την εξέλιξη των φαινομένων ενίσχυσης και τοπογραφικής επιδείνωσης σε συνδυασμό με τα χαρακτηριστικά της σεισμικής διέγερσης (μέγιστη επιβαλλόμενη επιτάχυνση και δεσπόζουσα περίοδο). Επιπλέον τονίζεται ότι, το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης εδάφους θεμελίωσης – Χ.Υ.Τ.Α. δεν μπορεί να αγνοηθεί θεωρώντας τον ρόλο του απλουστευτικά ως ευεργετικό, καθώς είναι πιθανό ανάλογα με τις επιτόπου συνθήκες να μην είναι ρεαλιστική αυτή η παραδοχή.

Τέλος, οι Thusyanthan et al., (2004) προσέγγισαν πειραματικά την δυναμική απόκριση ενός υπογείου Χ.Υ.Τ.Α. εκτελώντας πειράματα σε φυγοκεντριστή. Αν και το πείραμα αφορούσε σχετικά μικρό βάθος απορριμμάτων (περίπου 7m), είναι χρήσιμο να αναφερθεί ότι τα αποτελέσματα παρουσίασαν αρκετά καλή σύγκλιση προς τη συσχέτιση που προτάθηκε από τους Singh and Sun (1995), ενώ παράλληλα τονίζεται η επίδραση του συχνοτικού περιεχομένου της σεισμικής διέγερσης. Επίσης, τα αποτελέσματα επαληθεύθηκαν και μέσω μονοδιάστατων αριθμητικών αναλύσεων.

### **2.3.2 Δυναμική ευστάθεια Χ.Υ.Τ.Α.**

Για την εκτίμηση της δυναμικής ευστάθειας των Χ.Υ.Τ.Α., κυρίως χρησιμοποιείται η μέθοδος μονίμων παραμορφώσεων για τον υπολογισμό των αναπτυσσόμενων παραμορφώσεων στις διεπιφάνειες, που ορίζονται είτε από το σύστημα στεγάνωσης του πυθμένα είτε από το σύστημα τελικής επικάλυψης.

Μια ψευδοστατική μέθοδος εφαρμόστηκε από τον Shewbridge (1996) για την εκτίμηση της οριζόντιας κρίσιμης επιτάχυνσης, κατά μήκος του συστήματος στεγάνωσης. Εκτός από τις βασικές παραδοχές της ψευδοστατικής μεθόδου, δηλαδή ότι η κατανομή της διατμητικής τάσης κατά μήκος της επιφάνειας ολίσθησης είναι ομοιόμορφη, επιπλέον θεωρείται ότι η διατμητική αντοχή χαρακτηρίζεται μόνο από τη γωνία τριβής και ότι οι κατακόρυφες εσωτερικές δυνάμεις είναι μηδενικές. Από τα διαγράμματα που παρατίθενται στην εργασία αυτή, συμπεραίνεται ότι για μεγάλες τιμές του λόγου του μήκους προς το ύψος του Χ.Υ.Τ.Α. η κρίσιμη επιτάχυνση εξαρτάται κατά κύριο λόγο από τη γωνία τριβής της διεπιφάνειας.

Η περίπτωση ευστάθειας του συστήματος στεγάνωσης πυθμένα εξετάστηκε από τους Bray et al. (1995). Αρχικά διενεργήθηκαν ισοδύναμα γραμμικές μονοδιάστατες αναλύσεις και προσδιορίστηκε η ισοδύναμη επιτάχυνση, η μέγιστη τιμή της οποίας χρησιμοποιείται ως σεισμικός συντελεστής στις ψευδοστατικές αναλύσεις. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι ο σεισμικός συντελεστής εξαρτάται από τις δυναμικές ιδιότητες του απορριμματικού υλικού, από την μέγιστη επιβαλλόμενη επιτάχυνση και από την δεσπόζουσα περίοδο του κραδασμού. Επίσης, υπολογίστηκαν οι σεισμικές μετακινήσεις και προέκυψε ότι συσχετίζονται με την κύρια περίοδο του Χ.Υ.Τ.Α., το συχνотικό περιεχόμενο και τον ισοδύναμο αριθμό των κύκλων της χρονοϊστορίας της ισοδύναμης επιτάχυνσης.

Οι Kramer and Smith (1997) εξέτασαν την ολίσθηση κατά μήκος της βάσης των Χ.Υ.Τ.Α., αφού επαναδιατύπωσαν το προσομοίωμα που προτάθηκε από τους Westermo and Udawadia (1983) και το οποίο έχει τη δυνατότητα να λαμβάνει υπόψη την αλληλεπίδραση των αδρανειακών δυνάμεων ενός μονοβάθμιου ταλαντωτή στην ανάπτυξη των σεισμικών μετακινήσεων. Πιο συγκεκριμένα, η σύγκριση των συζευγμένων (ταυτόχρονη θεώρηση της δυναμικής απόκρισης και της ολίσθησης) με τις αντίστοιχες μη συζευγμένες αναλύσεις (υπολογισμός πρώτα της απόκρισης και έπειτα της ολίσθησης), έδειξε ότι οι τελευταίες υπερεκτιμούν την ολίσθηση ειδικά κοντά στο συντονισμό. Για πολύ μεγάλες ιδιοπεριόδους, η μη συζευγμένη ανάλυση παύει να είναι συντηρητική, ενώ σε κάθε περίπτωση η μη θεώρηση της ευκαμψίας της ολισθαίνουσας μάζας οδηγεί σε μη ρεαλιστικά αποτελέσματα.

Σε μεταγενέστερη εργασία τους οι Bray and Rathje (1998) έπειτα από μη γραμμικές μονοδιάστατες παραμετρικές αναλύσεις πρότειναν μια συσχέτιση της μέγιστης

ισοδύναμης επιτάχυνσης για ολίσθηση στη βάση του Χ.Υ.Τ.Α., με τον λόγο της κύριας περιόδου του προς τη μέση περίοδο του σεισμικού κραδασμού. Επίσης ανέδειξαν το σημαντικό ρόλο της προσομοίωσης της μη γραμμικής συμπεριφοράς των απορριμμάτων παρατηρώντας ότι, με τις καμπύλες απομείωσης του μέτρου διάτμησης αύξησης του λόγου απόσβεσης με πιο έντονα μη γραμμική συμπεριφορά (Kavazanjian et al., 1995b) μπορεί να υπολογιστεί μικρότερη ενίσχυση σε σύγκριση με αντίστοιχες καμπύλες εδαφικών υλικών (Vucetic and Dobry, 1991). Ακόμη, η μέγιστη ισοδύναμη επιτάχυνση εξαρτάται και από τις επιτόπου εδαφικές συνθήκες, και πιο συγκεκριμένα αναμένονται μεγαλύτερες τιμές της παραμέτρου όταν το έδαφος θεμελίωσης είναι βράχος σε σύγκριση με άργιλο ή άμμο. Μεγαλύτερη διασπορά παρατηρείται στην κατανομή της μέγιστης επιφανειακής επιτάχυνσης με την οποία θα μπορούσε να εξεταστεί η ευστάθεια του συστήματος τελικής κάλυψης.

Επιπροσθέτως, στην προαναφερθείσα εργασία των Bray and Rathje (1998) εκτιμήθηκε η σεισμική ευστάθεια και σε όρους μετακινήσεων. Εφαρμόστηκε η μεθοδολογία που προτάθηκε από τους Chopra and Zhang (1991), σύμφωνα με την οποία λαμβάνεται υπόψη η αλληλεπίδραση της δυναμικής απόκρισης στην ανάπτυξη ολίσθησης (συζευγμένη ευστάθεια), θεωρώντας ελαστική φασματική απόκριση της απορριμματικής μάζας. Εν γένει με τη μη συζευγμένη ανάλυση υπολογίζονται συντηρητικά οι μετακινήσεις συγκριτικά με την συζευγμένη ανάλυση. Τόσο οι μετακινήσεις για ολίσθηση στη βάση όσο και οι αντίστοιχες για ολίσθηση του συστήματος τελικής κάλυψης προσδιορίστηκαν από μη συζευγμένες αναλύσεις και συντείνουν στο γεγονός ότι οι παράμετροι που επηρεάζουν τις αναπτυσσόμενες μετακινήσεις είναι η κρίσιμη επιτάχυνση, η μέγιστη ισοδύναμη επιτάχυνση και οι σχετιζόμενοι με αυτή παράγοντες, δηλαδή η μέγιστη επιβαλλόμενη επιτάχυνση, η ιδιοπερίοδος της κατασκευής και η μέση περίοδος της σεισμικής διέγερσης. Τέλος, τα αποτελέσματα της προαναφερθείσας διερεύνησης συμπυκνώθηκαν σε μία απλοποιητική διαδικασία αντισεισμικού σχεδιασμού που προτάθηκε από τους Bray et al. (1998) στην οποία εκτιμάται η ευστάθεια στο σύστημα στεγάνωσης και στο τελικό σύστημα κάλυψης σε όρους σεισμικών μετακινήσεων.

Η ευστάθεια του συστήματος τελικής κάλυψης έχει αποτελέσει αντικείμενο έρευνας και άλλων ερευνητών. Οι Ling and Leshchinsky (1997), εξέτασαν την ψευδοστατική ευστάθεια του συστήματος τελικής κάλυψης και προσδιόρισαν αναλυτικές σχέσεις προσδιορισμού του συντελεστή ασφαλείας για απειρομήκες και μη πρανές, της

απαιτούμενης δύναμης οπλισμού για την επίτευξη της ευστάθειας, και της κρίσιμης επιτάχυνσης για την περίπτωση ολίσθησης κατά μήκος της διεπιφάνειας εδάφους – γεωμεμβράνης. Έπειτα από παραμετρική διερεύνηση των αποτελεσμάτων κατέληξαν ότι το πάχος της στρώσης επικάλυψης και η κατακόρυφη συνιστώσα της επιτάχυνσης δεν παίζουν σημαντικό ρόλο στην ευστάθεια, ενώ αντιθέτως η αύξηση της κλίσης του πρανούς μειώνει δραματικά την ευστάθεια. Τέλος, υπολογίστηκαν και οι σεισμικές μετακινήσεις για καταγραφές διαφόρων σεισμικών γεγονότων της Βορείου Αμερικής.

Η ανάπτυξη σεισμικών μετακινήσεων κατά μήκος της διεπιφάνειας του συστήματος τελικής επικάλυψης εξετάστηκε από τους Matasovic et al. (1998b), και πιο συγκεκριμένα διερευνήθηκε η επίδραση των βασικών παραδοχών του προσομοιώματος του Newmark (1965) επί των αποτελεσμάτων. Θεωρώντας ολίσθηση κατά μήκος του γεωφάσματος, δηλαδή σχετικά μεγάλες τιμές κρίσιμης επιτάχυνσης, οι σεισμικές μετακινήσεις προέκυψαν ότι εξαρτώνται από το πάχος της στρώσης εδαφικής κάλυψης και επιπλέον απέδειξαν ότι η παραδοχή της σταθερής διατμητικής αντοχής κατά την εξέλιξη της ολίσθησης είναι ιδιαίτερα καθοριστική. Πιο συγκεκριμένα, η θεώρηση της απομένουσας διατμητικής αντοχής οδηγεί σε συντηρητικό υπολογισμό των μετακινήσεων σε σύγκριση με την μεταβαλλόμενη κατά την ανάπτυξη των μετακινήσεων διατμητική αντοχή. Επιπλέον οι Biondi et al. (2008) επισημαίνουν ότι η σχέση απομείωσης της διατμητικής αντοχής μετά την μέγιστη τιμή της καθώς και το μέτρο της απομείωσης επιδρούν σημαντικά στην εκτίμηση των μόνιμων σεισμικών παραμορφώσεων.

### 2.3.3 Σύστημα στεγάνωσης

Η σεισμική καταπόνηση του συστήματος στεγάνωσης αποτελεί ένα αντικείμενο που παραδόξως δεν έχει συγκεντρώσει μεγάλο ερευνητικό ενδιαφέρον. Ενδεχομένως αυτό να οφείλεται στην παραδοχή ότι ο περιορισμός της ανάπτυξης σεισμικών μετακινήσεων μειώνει και την αναπτυσσόμενη ένταση στο σύστημα στεγάνωσης. Οι Singh and Sun (1995) διατύπωσαν μια απλή ψευδοστατική διαδικασία για τον υπολογισμό των αναπτυσσόμενων παραμορφώσεων εντός του αργλικού φραγμού. Σύμφωνα την πρότασή τους οι διατμητικές τάσεις που αναπτύσσονται στη διεπιφάνεια λαμβάνουν την μέγιστη τιμή τους, δηλαδή ισούνται με την διατμητική αντοχή της διεπιφάνειας, και εφαρμόζοντας χαρακτηριστικές καμπύλες τάσης – παραμόρφωσης για αργίλους προσδιορίζεται η διατμητική παραμόρφωση εντός του αργλικού φραγμού.

Με την προαναφερθείσα διαδικασία διαμορφώθηκαν διαγράμματα συσχέτισης του ύψους του Χ.Υ.Τ.Α. με τη διατμητική αντοχή της γεωμεμβράνης και την διατμητική παραμόρφωση. Παρατηρείται ότι υψηλής πλαστιμότητας άργιλοι με μικρή διατμητική αντοχή, για μεγάλο ύψος απορριμματικού όγκου και μεγάλη αντοχή της διεπιφάνειας εμφανίζουν μεγάλες διατμητικές παραμορφώσεις που ξεπερνούν το 10%. Για την αναπτυσσόμενη σεισμική ένταση στη γεωμεμβράνη στεγάνωσης έχει διενεργηθεί μια πειραματική διερεύνηση σε φυγοκεντριστή (Thusyanthan et al., 2007). Ένας υπόγειος Χ.Υ.Τ.Α. και μία κυψέλη υπογείου Χ.Υ.Τ.Α. υποβλήθηκαν σε διαδοχικές σεισμικές διεγέρσεις η μέγιστη επιτάχυνση των οποίων δεν ξεπερνούσε τα 0.32g. Όσον αφορά στον ολοκληρωμένο υπόγειο Χ.Υ.Τ.Α. παρατηρήθηκε αύξηση της απομένουσας εφελκυστικής τάσης της γεωμεμβράνης ίση με 30% της αρχικής στατικής τάσης κατά μέγιστο. Τα πειραματικά αποτελέσματα της κυψέλης έδειξαν ότι παρομοίως, αναπτύσσεται παραμένουσα παραμόρφωση έπειτα από κάθε σεισμικό γεγονός, αλλά η μέγιστη ποσοστιαία αύξησή της είναι μικρότερη από την αντίστοιχη του ολοκληρωμένου Χ.Υ.Τ.Α. της τάξης του 10%.

## 2.4 ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΑΠΟΡΡΙΜΜΑΤΙΚΟΥ ΥΛΙΚΟΥ

Ο προσδιορισμός των μηχανικών ιδιοτήτων του απορριμματικού υλικού αποτελεί πολύ σημαντική παράμετρο σχεδιασμού των Χ.Υ.Τ.Α., καθώς η ανάλυση της σεισμικής ευστάθειας είναι σε άμεση συνάρτηση των παραμέτρων συμπεριφοράς του υλικού. Το απορριμματικό υλικό όμως χαρακτηρίζεται από ένα πλήθος αβεβαιοτήτων, οι οποίες πηγάζουν από το είδος, την προέλευση, και τον τρόπο διαχείρισης των απορριμμάτων. Κατ' αρχάς η σύσταση του απορριμματικού υλικού είναι εξαιρετικά ανομοιογενής περιλαμβάνοντας υλικά όπως χαρτί, πλαστικά, ξύλο, ελαστικά, υπολείμματα τροφών και οργανικά υλικά. Η σύσταση των απορριμμάτων επίσης διαφέρει από περιοχή σε περιοχή και από χώρα σε χώρα, καθώς οι πολιτικές ανακύκλωσης και επεξεργασίας των απορριμμάτων διαφέρουν. Επιπλέον, έπειτα από τη συλλογή η συμπίκνωση των απορριμμάτων κατά τη διαδικασία της απόθεσης, καθώς και η εφαρμοζόμενη δύναμη συμπίκνωσης μπορεί να επηρεάσει σε μεγάλο βαθμό τις αναπτυσσόμενες μηχανικές ιδιότητες. Επίσης, η καθημερινή κάλυψη με εδαφικό υλικό συντελεί στη διαδικασία αποσύνθεσης των απορριμμάτων μέσω μιας σύνθετης διαδικασίας αλληλεπίδρασης με το έδαφος.



Αποτέλεσμα των προαναφερθέντων ιδιαιτεροτήτων, σε συνδυασμό με την έλλειψη διεθνώς αποδεκτών προτύπων για τη δειγματοληψία και την εκτέλεση δοκιμών, είναι να παρατηρείται εξαιρετικά μεγάλη απόκλιση μεταξύ των προτεινόμενων στη βιβλιογραφία μηχανικών ιδιοτήτων των απορριμμάτων. Επιπλέον, όπως αναφέρεται χαρακτηριστικά από τους Dixon and Jones (2005) δεν υπάρχει κάποια καθιερωμένη διαδικασία ή οδηγίες επιλογής των απαραίτητων μηχανικών παραμέτρων για τον σχεδιασμό των Χ.Υ.Τ.Α. Με βάση τα προαναφερθέντα παρατίθενται στη συνέχεια τα αποτελέσματα κάποιων αντιπροσωπευτικών εργασιών (και όχι της πλήρους βιβλιογραφίας η οποία είναι εξαιρετικά εκτενής), που αφορούν στις βασικότερες ιδιότητες του απορριμματικού υλικού οι οποίες είναι απαραίτητες στους υπολογισμούς της σεισμικής απόκρισής τους. Οι ιδιότητες αυτές αναφέρονται στην πυκνότητα, στη διατμητική αντοχή, στην ταχύτητα διάδοσης του διατμητικού κύματος και στις σχέσεις απομείωσης του μέτρου διάτμησης-αύξησης του λόγου απόσβεσης συναρτήσει της μεταβολής των διατμητικών παραμορφώσεων.

#### 2.4.1 Πυκνότητα

Η ανομοιογένεια του απορριμματικού υλικού σε συνδυασμό με την χρονικά μεταβαλλόμενη συμπεριφορά του και τη συνεχή εναπόθεση και συμπίκνωση καθιστούν τον προσδιορισμό της πυκνότητας ή του ειδικού βάρους εξαιρετικά δυσχερή. Οι μέθοδοι προσδιορισμού του ειδικού βάρους σε Χ.Υ.Τ.Α. μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως εξής (Fassett et al., 1994):

- επιτόπου δοκιμές, π.χ. δοκιμαστικές κυψέλες και δοκιμαστικά ορύγματα,
- καταγραφές και παρακολούθηση, όπου η συνολική αποτιθέμενη μάζα (απορρίμματα και έδαφος) καταγράφεται καθημερινά και παράλληλα διενεργείται τοπογραφική αποτύπωση της ογκομετρικής μεταβολής οπότε υπολογίζεται μία μέση τιμή του ειδικού βάρους,
- εμπειρικές μετρήσεις, στις οποίες υπολογίζεται το ειδικό βάρος κάθε συστατικού του απορριμματικού όγκου και έπειτα από μια ποσοστιαία εκτίμηση καθενός προσδιορίζεται το ειδικό βάρος,
- εργαστηριακά δείγματα, μέσω δειγματοληψίας «αδιατάρακτων» δοκιμίων,
- γεωφυσικές μέθοδοι, δηλαδή επιτόπου προσδιορισμός του ειδικού βάρους με χρήση ακτινών γάμμα.

Οι Fassett et al. (1994) προτείνουν ότι ο υπολογισμός της πυκνότητας έχει νόημα όταν αναφέρονται παράλληλα: (α) η σύσταση των απορριμμάτων σε συνδυασμό με την καθημερινή εδαφική κάλυψη και το ποσοστό υγρασίας, (β) η μέθοδος και ο βαθμός συμπύκνωσης, (γ) το βάθος στο οποίο αναφέρεται η μέτρηση, και (δ) η ηλικία των απορριμμάτων. Στην εργασία τους συνέλλεξαν τα αποτελέσματα 18 ερευνητών οι οποίοι εφάρμοσαν διαφορετικές τεχνικές υπολογισμού της πυκνότητας (είτε εργαστηριακές, είτε επιτόπου) και κατέληξαν να προτείνουν ότι για βάθος μέχρι 10m. Με καλή συμπύκνωση και εφαρμογή εδαφικής κάλυψης, το ειδικό βάρος μπορεί να θεωρηθεί περίπου ίσο με  $10.2 \pm 1.6 \text{ kN/m}^3$ .

Σχετικά μεγαλύτερες τιμές για το ειδικό βάρος προτείνουν οι Matasovic and Kavazanjian (1998) έπειτα από επιτόπου δοκιμές στον X.Y.T.A. Operating Industries Inc. (O.I.I.) σε βάθος μέχρι 45m. Η παρατηρούμενη διακύμανση των μετρήσεων σε τρεις γεωτρήσεις ήταν μεταξύ  $12 \text{ kN/m}^3$  και  $20 \text{ kN/m}^3$  χωρίς να παρατηρείται αύξηση με το βάθος, ενώ τελικά προτείνεται μία μέση τιμή ίση με  $16 \text{ kN/m}^3$ . Επίσης οι Morochnic et al. (1998) παρουσίασαν αντίστοιχα αποτελέσματα υπολογισμού του ειδικού βάρους στον ίδιο X.Y.T.A. (O.I.I.) χρησιμοποιώντας τρεις διαφορετικές τεχνικές, δηλαδή (α) τη μέτρηση του βάρους του δείγματος και του αφαιρούμενου όγκου, (β) τον υπολογισμό βάσει του ποσοστού εδαφικού υλικού, και (γ) τη μέτρηση του βάρους του δείγματος και του όγκου της γεώτρησης. Είναι χαρακτηριστικό ότι το ειδικό βάρος παρουσιάζει μεγάλη διασπορά για τις τρεις μεθόδους, με τα αποτελέσματα της πρώτης μεθόδου να δίνουν τις μεγαλύτερες τιμές ( $15\text{--}20 \text{ kN/m}^3$ ), ενώ το αντίστοιχο εύρος για την τρίτη μέθοδο ήταν  $10\text{--}15 \text{ kN/m}^3$ .

Οι Dixon and Jones (2005) θεωρούν ότι αυξανόμενη της ηλικίας των απορριμμάτων, το ειδικό τους βάρος εξαρτάται κυρίως από το βάθος, το βαθμό αποσύνθεσης και τις κλιματικές συνθήκες. Επίσης, αναφέρουν ότι το ειδικό βάρος αυξάνει με το βάθος, ενώ παραθέτουν αποτελέσματα από εργασίες της συναφούς βιβλιογραφίας τα οποία αναφέρουν ότι το ειδικό βάρος μπορεί να λάβει τιμές από  $5 \text{ kN/m}^3$  έως  $20 \text{ kN/m}^3$ .

Η χρήση ενός τυπικού προφίλ κατανομής του ειδικού βάρους με το βάθος για κάθε X.Y.T.A., το οποίο εξαρτάται από ορισμένα χαρακτηριστικά του, προτάθηκε από τον Zekkos (2005). Στην εν λόγω εργασία συλλέχθηκαν τα αποτελέσματα από 11 διαφορετικές εργασίες και επιπλέον υπολογίστηκε έπειτα από επιτόπου δοκιμές το ειδικό βάρος των απορριμμάτων στον X.Y.T.A. Tri-Cities. Το εύρος των προτεινόμενων

τιμών είναι αρκετά μεγάλο ( $5\text{--}20\text{kN/m}^3$ ) αλλά παρατηρήθηκε ότι η κατανομή του ειδικού βάρους με το βάθος ανά Χ.Υ.Τ.Α. είναι σχετικά ομοιόμορφη. Διαμέσου της εκτέλεσης πειραμάτων ισοτροπικής συμπίεσης μεγάλης κλίμακας σε ανακατασκευασμένα δοκίμια, εξετάστηκε η επίδραση των επιμέρους παραμέτρων δηλαδή της σύστασης των απορριμμάτων, του ποσοστού υγρασίας, των συνθηκών συμπίκνωσης και της κατακόρυφης τάσης. Προτάθηκε ένα μοντέλο υπερβολικής κατανομής συναρτήσει του βάθους, το οποίο συνίσταται από το επιφανειακό ειδικό βάρος και δύο παραμέτρους, οι οποίες καθορίζουν τη μορφή της καμπύλης με το βάθος. Όπως είναι άλλωστε αναμενόμενο, οι τιμές των παραμέτρων αυτών είναι μεγαλύτερες καθώς αυξάνεται η ποσότητα του εδάφους καθημερινής κάλυψης, του ποσοστού υγρασίας και της πίεσης συμπίκνωσης, ενώ για μέσες τιμές της τάσης συμπίκνωσης και της ποσότητας του εδάφους καθημερινής κάλυψης το ειδικό βάρος κυμαίνεται από  $10\text{kN/m}^3$  στην επιφάνεια έως  $13\text{kN/m}^3$  σε βάθος  $30\text{m}$ .

#### 2.4.2 Διατμητική αντοχή

Η διατμητική αντοχή του απορριμματικού υλικού αποτελεί απαραίτητη παράμετρο για τον υπολογισμό της στατικής και σεισμικής ευστάθειας. Οι αβεβαιότητες που χαρακτηρίζουν το απορριμματικό υλικό καθορίζουν και την διατμητική αντοχή του, δηλαδή (α) το ποσοστό οργανικού υλικού και ινωδών συστατικών, (β) η ηλικία των απορριμμάτων και ο βαθμός αποσύνθεσής τους, και (γ) οι συνθήκες απόθεσης (ποσότητα εδάφους για τελική κάλυψη και βαθμός συμπίκνωσης) (Fassett et al., 1994). Για τον προσδιορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων του απορριμματικού υλικού χρησιμοποιούνται μέθοδοι αντίστοιχες με τις γεωτεχνικές διερευνήσεις του εδάφους. Η πιο απλή μέθοδος που χρησιμοποιείται είναι οι ανάστροφες αναλύσεις. Αναλύσεις στατικής ευστάθειας πρυνών Χ.Υ.Τ.Α. έχουν συχνά χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό των παραμέτρων διατμητικής αντοχής του απορριμματικού υλικού, αν και συχνά αναφέρεται ότι με αυτήν την μέθοδο υπολογισμού προκύπτουν συντηρητικά αποτελέσματα (Fassett et al., 1994). Αρκετά μεγαλύτερη ακρίβεια επιτυγχάνεται στον υπολογισμό των προαναφερθέντων παραμέτρων με επιτόπου δοκιμές. Τέλος, η σύγχρονη τεχνολογία έχει βοηθήσει στην εκτέλεση εργαστηριακών δοκιμών μεγάλης κλίμακας αντιπροσωπευτικών δειγμάτων, επομένως έχουν εκτελεστεί πειράματα άμεσης διάτμησης και τριαξονικής δοκιμής. Παρακάτω παρουσιάζονται αναλυτικά τα

αποτελέσματα των αντίστοιχων μελετών, σε όρους συνοχής και γωνίας τριβής (παράμετροι του κριτηρίου Mohr-Coulomb), ανά κατηγορία μεθόδου.

### **Αποτελέσματα ανάστροφων αναλύσεων**

Οι Augello et al. (1995) χρησιμοποίησαν τα αποτελέσματα ανάστροφων αναλύσεων σε στατικά ευσταθείς Χ.Υ.Τ.Α., που παρουσίασαν βλάβες κατά τον σεισμό του Northridge (1994), προκειμένου να εκτιμήσουν τις βασικές παραμέτρους διατμητικής αντοχής. Συγκεκριμένα, κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι το εύρος διακύμανσης της γωνίας τριβής είναι από 19° έως 39°, τιμές που αντιστοιχούν σε συντελεστή ασφαλείας ίσο με 1.2. Καθώς οι εξεταζόμενες περιπτώσεις αναφέρονται σε στατικά ευσταθή απορριμματικά πρηνή τα αποτελέσματα της διατμητικής αντοχής εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την επιλογή του συντελεστή ασφαλείας, δηλαδή μια μεγαλύτερη τιμή του θα κατέληγε σε υπολογισμό μεγαλύτερων τιμών της γωνίας τριβής.

Εν συνέχεια, στην ίδια εργασία υπολογίστηκε και η δυναμική γωνία εσωτερικής τριβής. Έπειτα από δυναμικές μονοδιάστατες και διδιάστατες αναλύσεις θεωρώντας για το απορριμματικό υλικό την κατανομή του ειδικού βάρους που προτάθηκε στην εργασία των Kavazanjian et al. (1995b), και τις καμπύλες απομείωσης του μέτρου διάτμησης που παρουσιάστηκαν από τους Kavazanjian and Matasovic (1995), προσδιόρισαν τον σεισμικό συντελεστή για τις ψευδοστατικές αναλύσεις. Καθώς στις εξεταζόμενες περιπτώσεις είχε παρατηρηθεί αστοχία έπειτα από τον σεισμό του Northridge, εφαρμόστηκε συντελεστής απομείωσης επί του σεισμικού συντελεστή και ακολούθως υπολογίστηκε η δυναμική εσωτερική γωνία τριβής (27°–45°). Οι μεγαλύτερες τιμές που ελήφθησαν συγκριτικά με τη στατική ανάλυση, πιθανώς οφείλονται στην αβεβαιότητα της επιλογής του συντελεστή ασφαλείας, αλλά και του συντελεστή απομείωσης του σεισμικού συντελεστή.

Οι Kavazanjian et al. (1995b) έπειτα από ανάστροφες αναλύσεις τεσσάρων ευσταθών Χ.Υ.Τ.Α. και σε συνδυασμό με δημοσιευμένα στοιχεία από εργαστηριακά πειράματα και επιτόπου δοκιμές προτείνουν ένα διγραμμικό κριτήριο αστοχίας: α) για ορθή τάση μικρότερη από 30kPa συνοχή ίση με 24kPa και β) για ορθή τάση μεγαλύτερη από 30kPa γωνία τριβής ίση με 33°. Οι Eid et al. (2000) χρησιμοποίησαν δημοσιευμένα αποτελέσματα ανάστροφων αναλύσεων από πρηνή απορριμμάτων που είχαν αστοχήσει, και δημοσιευμένα αποτελέσματα δοκιμών μεγάλης κλίμακας σε άμεση διάτμηση και εκτίμησαν την μέση διατμητική αντοχή του απορριμματικού υλικού. Εν συνέχεια, οι

τιμές των παραμέτρων που προέκυψαν, δηλαδή συνοχή ίση με 25kPa και γωνία τριβής ίση με 35°, επαληθεύθηκαν με αρκετή ακρίβεια και για άλλες τρεις περιπτώσεις αστοχίας πρανών Χ.Υ.Τ.Α., ενώ από τα αποτελέσματα των ανάστροφων αναλύσεων του Χ.Υ.Τ.Α. Cincinnati υπολογίστηκε λίγο μεγαλύτερη τιμή συνοχής (40kPa). Η βιβλιογραφική επισκόπηση μερικών εργασιών που χρησιμοποίησαν ανάστροφες αναλύσεις (Dixon and Jones, 2005) έδειξε ότι η συνοχή ισούται με 10kPa ενώ η γωνία τριβής λαμβάνει τιμές από 15° έως 25°.

Σε μία πιο πρόσφατη διερεύνηση της διατμητικής αντοχής του απορριμματικού υλικού (Palaypayon and Ohta, 2007) αναφέρεται ότι βάσει ανάστροφων αναλύσεων ευστάθειας από παρατηρηθείσες αστοχίες των Χ.Υ.Τ.Α. Payatas και Leuwigajah, η συνοχή υπολογίστηκε ίση με 19kPa και 10kPa, αντίστοιχα και η γωνία εσωτερικής τριβής ίση με 28° και 20°, αντίστοιχα. Επιπροσθέτως, στη συγκεκριμένη εργασία αναφέρεται ότι έπειτα από διερεύνηση για τον προσδιορισμό των παραμέτρων αντοχής σε 15 Χ.Υ.Τ.Α. στην Ιαπωνία, η συνοχή προέκυψε να λαμβάνει τιμές από 39.2kPa έως 68.7kPa, ενώ η γωνία εσωτερικής τριβής ήταν ίση με 30°. Τέλος, από ανάστροφες αναλύσεις ευστάθειας κατακόρυφων απορριμματικών πρανών ύψους 3-5m του Χ.Υ.Τ.Α. Toyon Bay υπολογίστηκε ότι η συνοχή μπορεί να λαμβάνει μικρότερες τιμές σε σχέση με τις προαναφερθείσες, δηλαδή από 3.4kPa έως 7.1kPa, ενώ οι αντίστοιχες τιμές της γωνίας εσωτερικής τριβής είναι μεταξύ 40° και 30°.

### **Αποτελέσματα επιτόπου δοκιμών**

Οι Houston et al. (1995) εκτέλεσαν επιτόπου δοκιμές άμεσης διάτμησης με διαστάσεις δοκιμίων 122cmx122cm, σε δύο θέσεις του Χ.Υ.Τ.Α. Northwest Regional Landfill Facility. Οι παράμετροι διατμητικής αντοχής των στερεών αποβλήτων που υπολογίστηκαν για τις δύο θέσεις δεν είχαν μεγάλη απόκλιση, δηλαδή η συνοχή προέκυψε ίση με 4.4kPa και 5kPa, ενώ η γωνία τριβής ίση με 33.7° και 35.7°.

### **Αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών**

Ο Kölsch (1995) θεωρεί ότι η διατμητική αντοχή του απορριμματικού υλικού χαρακτηρίζεται από δύο συνιστώσες, δηλαδή την αντοχή μέσω της ενεργοποίησης της εσωτερικής τριβής και την αντοχή μέσω του εφελκυσμού που μπορεί να αναπτυχθεί από τα ινώδη συστατικά. Πιο συγκεκριμένα, η πρώτη συνιστώσα χαρακτηρίζεται από τη γωνία εσωτερικής τριβής, ενώ η δεύτερη από τη γωνία εφελκυσμού ( $\zeta$ ). Για τον προσδιορισμό της γωνίας εφελκυσμού έγιναν πειράματα μεγάλης κλίμακας, τα

αποτελέσματα των οποίων έδειξαν ότι μπορεί να κυμαίνεται μεταξύ 15° και 35°, ενώ βάσει βιβλιογραφικών αναφορών θεωρείται ότι η γωνία εσωτερικής τριβής μπορεί να λάβει τιμές μεταξύ 15° και 22°. Η συνολική αντοχή χαρακτηρίζεται από το άθροισμα των δύο γωνιών και συνοχή ίση με 15kPa.

Εκτεταμένο πρόγραμμα εργαστηριακών δοκιμών σε ανακατασκευασμένα δοκίμια από τον Χ.Υ.Τ.Α. Ο.Ι.Ι. εκτελέστηκε από τους Kavazanjian et al. (1999). Το πρόγραμμα περιείχε: (α) δοκιμές συμπίεσομέτρου, (β) δοκιμές άμεσης διάτμησης και (γ) δοκιμές άμεσης απλής διάτμησης σε μονοτονική φόρτιση, σε δοκίμια διαμέτρου και ύψους 460mm. Από κάθε εργαστηριακή δοκιμή προέκυψαν διαφορετικές τιμές των παραμέτρων διατμητικής αντοχής. Η συνοχή προέκυψε ίση με 43kPa και η γωνία τριβής ίση με 31° στις δοκιμές άμεσης διάτμησης. Οι δοκιμές άμεσης απλής διάτμησης εκτελέστηκαν τόσο για ανακυκλική όσο και για μονοτονική φόρτιση, προκειμένου να προσδιοριστούν οι δυναμικές ιδιότητες των απορριμμάτων και η διατμητική αντοχή τους αντίστοιχα. Θεωρώντας ότι λόγω της διαδικασίας απόθεσης το επίπεδο αστοχίας είναι οριζόντιο και για επίπεδο διατμητικής παραμόρφωσης 10%, υπολογίστηκε από δοκιμή άμεσης απλής διάτμησης ότι η συνοχή είναι μηδενική και η γωνία τριβής ίση με 30°. Επίσης, εξετάστηκε και η θεώρηση όπου το επίπεδο αστοχίας ταυτίζεται με το επίπεδο του μεγαλύτερου λόγου κυρίων τάσεων, η οποία οδήγησε σε δύο ζεύγη τιμών (άνω και κάτω όριο αντίστοιχα): α) συνοχή ίση με 30kPa και γωνία τριβής ίση με 59° και β) συνοχή ίση με 16kPa και γωνία τριβής ίση με 33°. Επομένως, αποδεικνύεται ότι η διατμητική αντοχή εξαρτάται και από την συσχέτιση του επιπέδου αστοχίας με την διεύθυνση του επιπέδου απόθεσης.

Οι Machado et al. (2002) διατύπωσαν ένα καταστατικό προσομοίωμα για την προσομοίωση της μηχανικής συμπεριφοράς του απορριμματικού υλικού. Για τον σκοπό αυτό διεξήχθησαν τριαξονικές δοκιμές και δοκιμές συμπίεσομέτρου σε δοκίμια διαμέτρου 150mm και 200mm και ύψους 300mm και 400mm αντίστοιχα, τα οποία συλλέχτηκαν από Χ.Υ.Τ.Α. του Σαο Πάολο. Στην εργασία αυτή προτείνεται οι παράμετροι διατμητικής αντοχής να αντιστοιχούν σε ένα επίπεδο παραμορφώσεων. Συγκεκριμένα παρατηρήθηκε ότι οι τιμές των εν λόγω παραμέτρων αυξάνονται καθώς αυξάνεται το μέγεθος των παραμορφώσεων, με τη γωνία τριβής να λαμβάνει τιμές από 15° έως 30°, και τη συνοχή από 5kPa έως 90kPa για αξονική παραμόρφωση 8-28%. Τα αποτελέσματα αυτά καταδεικνύουν ότι τα ινώδη συστατικά των αποβλήτων

λειτουργούν ως οπλισμός, κατ' αντιστοιχία με τη μηχανική συμπεριφορά της οπλισμένης γης.

Οι Zhu et al. (2003) εξέτασαν τις μηχανικές ιδιότητες των απορριμμάτων στο Χ.Υ.Τ.Α. Tianziling διεξάγοντας δοκιμές άμεσης διάτμησης, αστράγγιστες τριαξονικές δοκιμές και αστράγγιστες τριαξονικές δοκιμές συμπίεσης. Οι εκτιμώμενες τιμές των παραμέτρων διατμητικής αντοχής και το μέγεθος των εξεταζόμενων δοκιμίων είναι αντίστοιχα για κάθε μία από τις προαναφερθείσες δοκιμές: α) συνοχή ίση με 6.4kPa-31.4kPa και γωνία τριβής ίση με 40.4°-46.6° (30cm<sup>2</sup>x2cm) β) συνοχή ίση με 0kPa-10.2kPa και γωνία τριβής ίση με 10.5°-19° (10cmx20cm) και γ) συνοχή ίση με 0-12.8kPa και γωνία τριβής ίση με 21°-29.5° (10cmx20cm).

Οι Vilar and Carvalho (2005) εκτέλεσαν μεγάλης κλίμακας τριαξονικές δοκιμές συμπίεσης σε δοκίμια διαμέτρου 150mm και 200mm και ύψους 300mm και 400mm αντίστοιχα από τον Χ.Υ.Τ.Α. Bandeirantes. Διαπίστωσαν ότι η διατμητική αντοχή μεγαλώνει καθώς αυξάνεται η παραμόρφωση, συμπέρασμα που συμφωνεί με τα αποτελέσματα των Machado et al. (2002) στον ίδιο Χ.Υ.Τ.Α. Συγκεκριμένα, η συνοχή αυξάνει από 20kPa σε 71kPa και η γωνία τριβής από 22° σε 33° για αντίστοιχη αύξηση της παραμόρφωσης από 10% σε 30%. Παράλληλα εξετάστηκε και η επίδραση του ειδικού βάρους στην διατμητική αντοχή, αλλά από τα αποτελέσματα των δοκιμών δεν προέκυψε ότι η αύξηση του ειδικού βάρους επηρεάζει τη σχέση τάσεων-παραμορφώσεων του απορριμματικού υλικού.

Σύμφωνα με τους Dixon and Jones (2005) η συνοχή λαμβάνει τιμές από 0 έως 23.5kPa ενώ η γωνία τριβής από 21° έως 42°, όπως προκύπτει από τη βιβλιογραφική επισκόπηση μερικών εργασιών δημοσιευμένων πριν το 1995, οι οποίες παρουσίαζαν αποτελέσματα δοκιμών άμεσης διάτμησης.

Μεγάλης κλίμακας εργαστηριακές δοκιμές άμεσης διάτμησης, δοκιμές άμεσης απλής διάτμησης και δοκιμές τριαξονικής συμπίεσης έγιναν προκειμένου να προσδιοριστεί η σχέση τάσεων-παραμορφώσεων του απορριμματικού υλικού από τον Zekkos (2005). Διαμορφώθηκαν δοκίμια διαστάσεων 300mmx300mmx180mm και διεξήχθησαν δοκιμές άμεσης διάτμησης υπό διάφορα επίπεδα ορθής τάσης. Καθώς αρκετά από τα δοκίμια δεν έφτασαν στην μέγιστη διατμητική τάση, η μετακίνηση των 55mm θεωρήθηκε ικανή να αποδώσει την διατμητική αντοχή, λαμβάνοντας με αυτόν τον τρόπο μια συντηρητική εκτίμηση. Η επίδραση της σύστασης εκτιμήθηκε με τη διαμόρφωση δύο

διαφορετικών τύπων δοκιμών, δηλαδή με ποσοστό 100% και 62% σε σωματίδια διαμέτρου μικρότερης των 19mm (εδαφοειδές υλικό) και τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η διατμητική αντοχή δεν διαφέρει για τις δύο περιπτώσεις.

Επιπλέον, διαπιστώθηκε ότι η αύξηση της ορθής τάσης μπορεί να συντελέσει σε μείωση της γωνίας εσωτερικής τριβής, ενώ αντιθέτως η αύξηση του ειδικού βάρους σε δοκίμια ίδιας σύστασης συντελεί σε αύξηση της διατμητικής αντοχής. Προκειμένου να εξεταστεί η επίδραση της σχετικής γωνίας μεταξύ της διεύθυνσης των ινωδών συστατικών και του επιπέδου διάτμησης, εκτιμήθηκε και η διατμητική αντοχή σε δοκίμια όπου η σχετική γωνία λαμβάνει τιμή ίση με 90°. Παρατηρείται αύξηση της διατμητικής τάσης σε μεγάλες τιμές της μετακίνησης, οπότε συνεπάγεται ότι η δράση των ινωδών συστατικών είναι παρεμφερής με αυτή του οπλισμού. Επίσης χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα της πειραματικής διερεύνησης, αλλά και 8 ακόμη εργασιών οι οποίες παραθέτουν αποτελέσματα δοκιμών άμεσης διάτμησης (δεδομένα 103 δοκιμών), προτείνεται ένα κριτήριο αστοχίας στο οποίο η συνοχή ισούται με 15kPa και η γωνία τριβής εξαρτάται από την κατακόρυφη τάση και προσδιορίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\phi = \phi_0 - \Delta\phi \log\left(\frac{\sigma_n}{P_a}\right) \quad (2.1)$$

όπου  $\phi_0=36^\circ$ ,  $\Delta\phi=5^\circ$  και  $P_a=101.3\text{kPa}$ .

Από τα αποτελέσματα δοκιμών τριαξονικής συμπίεσης της εργασίας αυτής καθώς και άλλων τεσσάρων που αναφέρονται στη βιβλιογραφία προέκυψε ότι η γωνία εσωτερικής τριβής κυμαίνεται μεταξύ 26° και 44°, ενώ οι μεγαλύτερες τιμές σε σχέση με τις δοκιμές άμεσης διάτμησης δικαιολογούνται από το γεγονός ότι το επίπεδο αστοχίας αναπτύσσεται σε γωνία ίση με  $45^\circ + \phi/2$ , δηλαδή υπό γωνία 58°-77° σε σχέση με τη διεύθυνση των ινωδών συστατικών.

Μεγάλης κλίμακας τριαξονικές δοκιμές και δοκιμές άμεσης διάτμησης εκτελέστηκαν στο πλαίσιο της διδακτορικής διατριβής του Singh (2008) στον X.Y.T.A. Block West στον Καναδά. Οι αστράγγιστες τριαξονικές δοκιμές εκτελέστηκαν σε 5 αδιατάρακτα και 9 ανακατασκευασμένα δοκίμια διαμέτρου 150mm και 200mm και μήκους 460mm, και με βάση τα αποτελέσματά τους προτάθηκαν δύο κριτήρια διαρροής. Το πρώτο αντιπροσωπεύει το άνω όριο των αποτελεσμάτων με συνοχή 8.4kPa και γωνία εσωτερικής τριβής 47°, ενώ το δεύτερο το κάτω όριο των αποτελεσμάτων με μηδενική



συνοχή και γωνία εσωτερικής τριβής ίση με  $35^\circ$ . Επίσης, αν και το πλήθος των αδιατάρακτων δοκιμών ήταν μικρό, παρατηρήθηκε ικανοποιητική σύγκλιση με τα αποτελέσματα των ανακατασκευασμένων δοκιμών, οπότε οι προτεινόμενοι παράμετροι αντοχής θεωρούνται αντιπροσωπευτικοί και για τις δύο εξεταζόμενες περιπτώσεις. Η συσκευή άμεσης διάτμησης είχε διαστάσεις  $1\text{m} \times 1\text{m} \times 1\text{m}$  εντός της οποίας τοποθετήθηκε σε στρώσεις απορριμματικό υλικό το οποίο συλλέχθηκε έπειτα από την εκσκαφή δύο δοκιμαστικών ορυγμάτων στον Χ.Υ.Τ.Α. Τα αποτελέσματα των δοκιμών δείχνουν ότι οι τιμές της συνοχής κυμαίνονται μεταξύ 14 και 26kPa και της γωνίας εσωτερικής τριβής μεταξύ  $30^\circ$  και  $36^\circ$ . Πρέπει να σημειωθεί ότι αυτές οι παράμετροι αντοχής βρίσκονται εντός των ορίων που προέκυψαν από τις τριαξονικές δοκιμές.

### 2.4.3 Δυναμική συμπεριφορά

Η δυναμική συμπεριφορά του απορριμματικού υλικού περιγράφεται, όπως και στα εδάφη, από την ταχύτητα διάδοσης του διατμητικού κύματος και από τις καμπύλες απομείωσης του μέτρου διάτμησης - αύξησης του λόγου απόσβεσης. Οι κατηγορίες μεθόδων εν γένει συμπίπτουν με τις αντίστοιχες για τον προσδιορισμό της διατμητικής αντοχής. Στη συνέχεια παρουσιάζονται συνοπτικά αποτελέσματα των πιο αντιπροσωπευτικών διερευνήσεων που έχουν λάβει χώρα για την εκτίμηση των δυναμικών ιδιοτήτων του απορριμματικού υλικού.

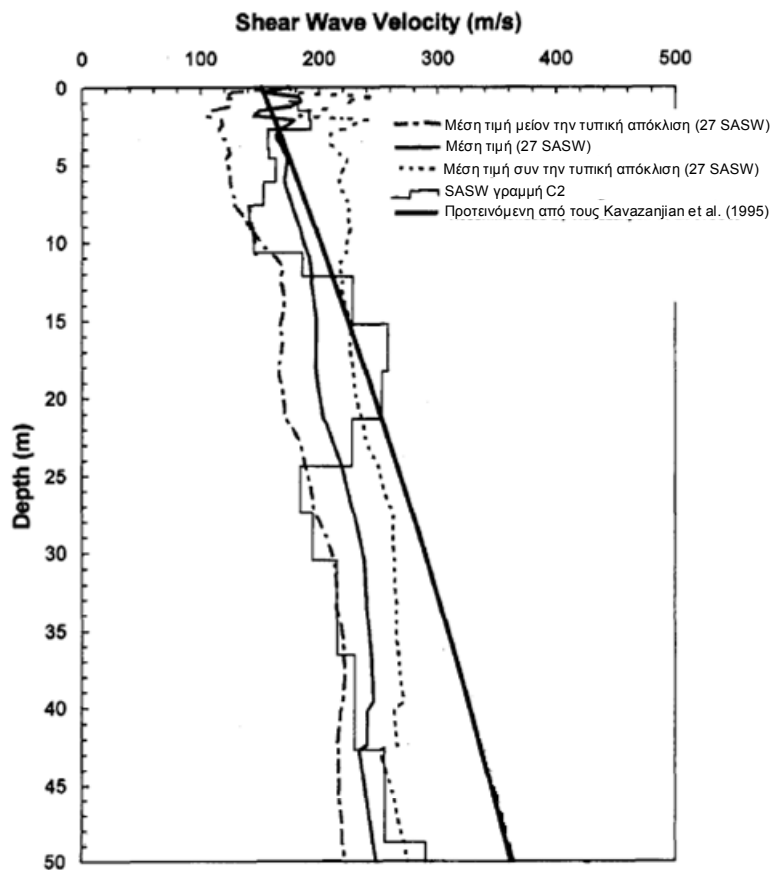
#### Ταχύτητα διάδοσης διατμητικού κύματος

Οι Idriss et al. (1995) έπειτα από δοκιμές τύπου OYO suspension logging, φασματικές αναλύσεις επιφανειακών κυμάτων (SASW) και δοκιμές downhole στον Χ.Υ.Τ.Α. Ο.Ι.Ι., αναφέρουν ότι η ταχύτητα διάδοσης διατμητικού κύματος χαρακτηρίζεται από μέση τιμή ίση με 365m/sec. Το προφίλ της κατανομής της ταχύτητας διάδοσης διατμητικού κύματος με το βάθος λαμβάνει τιμές από 200m/sec στην επιφάνεια έως 500m/sec σε βάθος 100m. Αντίστοιχες τιμές αναφέρουν και οι Morochnic et al. (1998) για τις ίδιες αναλύσεις σε μία χαρακτηριστική θέση του Ο.Ι.Ι., όπου υπάρχει και εγκατεστημένος επιταχυνσιογράφος.

Από επιτόπου δοκιμές downhole στον Χ.Υ.Τ.Α. Northwest Regional Landfill Facility της Αριζόνα, οι Houston et al. (1995) προτείνουν ότι η κατανομή της ταχύτητας διάδοσης διατμητικού κύματος, ανάλογα με το βάθος έως και 10m κυμαίνεται από 124m/sec έως 229m/sec.

Ένα εκτεταμένο πρόγραμμα ερευνών στον Χ.Υ.Τ.Α. ΟΠ είχε ως αντικείμενο και τον προσδιορισμό των δυναμικών ιδιοτήτων των στερεών αποβλήτων με επιτόπου δοκιμές, μεγάλης κλίμακας εργαστηριακές δοκιμές και ανάστροφες αναλύσεις (Matasovic and Kavazanjian, 1998). Συγκεκριμένα, από φασματικές αναλύσεις επιφανειακών κυμάτων σε 27 θέσεις υπολογίστηκε ότι η μέση κατανομή της ταχύτητας διάδοσης διατμητικού κύματος κυμαίνεται από 120m/sec στην επιφάνεια έως 240m/sec για βάθος ίσο με 50m. Η κατανομή με τις εκτιμώμενες τυπικές αποκλίσεις καθώς και προηγούμενα αποτελέσματα των συγγραφέων παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.6.

Έπειτα από μετρήσεις επιφανειακών κυμάτων σε δύο Χ.Υ.Τ.Α. της Ατλάντα ο Rix (1998) αναφέρει ότι η ταχύτητα διάδοσης του διατμητικού κύματος μετρήθηκε εντός της απορριμματικής μάζας από 125m/sec κοντά στην επιφάνεια έως 160m/sec σε βάθος 25m.



**Σχήμα 2.6.** Κατανομή της ταχύτητας διάδοσης του διατμητικού κύματος με το βάθος από Matasovic and Kavazanjian (1998).

Οι Matasovic et al. (2006) αναφέρουν την εκτέλεση φασματικών αναλύσεων επιφανειακών κυμάτων (SASW) σε πέντε Χ.Υ.Τ.Α. τοξικών αποβλήτων. Από τα

αποτελέσματα των μετρήσεων εκτιμήθηκε ο μέσος όρος της ταχύτητας διάδοσης διατμητικού κύματος, η οποία λαμβάνει τιμές από 100m/sec στην επιφάνεια έως 500m/sec σε βάθος ίσο με 35m.

Φασματικές αναλύσεις επιφανειακών κυμάτων (SASW) αναφέρεται ότι διεξήχθησαν στους Χ.Υ.Τ.Α. Tri-Cities, Altamont και Redwood (Zekkos, 2005) σε 14 διαφορετικές θέσεις. Τα αποτελέσματα των αναλύσεων δείχνουν ότι η ταχύτητα διάδοσης διατμητικού κύματος λαμβάνει τιμές από 75m/sec στην επιφάνεια έως 250m/sec σε βάθος ίσο με 30m.

### **Απομείωση του μέτρου διάτμησης – Αύξηση του λόγου απόσβεσης**

Οι Singh and Murphy (1990) βασίστηκαν στα αποτελέσματα επιτόπου δοκιμών downhole στους Χ.Υ.Τ.Α. Richmond και Redwood, για να εκτιμήσουν τις χαρακτηριστικές καμπύλες απομείωσης του μέτρου διάτμησης – αύξησης του λόγου απόσβεσης του απορριμματικού υλικού. Αφού προσδιορίστηκε η αρχική ταχύτητα διάδοσης διατμητικού κύματος (274m/sec) τροποποιήθηκαν καταλλήλως οι αντίστοιχες καμπύλες που έχουν προταθεί για ιλύες και αργίλους και προσδιορίστηκε το ζητούμενο ζεύγος καμπυλών.

Οι Idriss et al. (1995) χρησιμοποίησαν τις καταγραφές τεσσάρων σεισμικών γεγονότων στον Χ.Υ.Τ.Α. Ο.Ι.Ι. για να προσδιορίσουν τις καμπύλες απομείωσης του μέτρου διάτμησης – αύξησης του λόγου απόσβεσης του απορριμματικού υλικού. Διδιάστατες αριθμητικές αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων εκτελέστηκαν για μια τυπική διατομή του Χ.Υ.Τ.Α. που περιελάμβανε και τους επιταχυνσιογράφους, θεωρώντας μέση τιμή διάδοσης του διατμητικού κύματος για το απορριμματικό υλικό ίση με 365m/sec. Το προτεινόμενο ζεύγος καμπυλών για το απορριμματικό υλικό, προέβλεψε με ικανοποιητική ακρίβεια την απόκριση στην επιφάνεια του Χ.Υ.Τ.Α. για τις εξεταζόμενες περιπτώσεις και ειδικά για την καταγραφή έπειτα από το σεισμό Pasadena (1988). Επίσης, παρατηρήθηκε ότι τα αποτελέσματα μονοδιάστατων αναλύσεων παρουσιάζουν μεγαλύτερη απόκριση από τις μετρήσεις για το ίδιο ζεύγος καμπυλών.

Ανάστροφες αναλύσεις στον Χ.Υ.Τ.Α. Ο.Ι.Ι. χρησιμοποίησαν και οι Kavazanjian and Matasovic (1995) για την εκτίμηση των καμπυλών απομείωσης του μέτρου διάτμησης – αύξησης του λόγου απόσβεσης του απορριμματικού υλικού. Για τον σκοπό αυτό

διενεργήθηκαν ισοδύναμα γραμμικές αναλύσεις για δύο σεισμικά γεγονότα, δηλαδή τις καταγεγραμμένες χρονοϊστορίες επιτάχυνσης των σεισμών Landers και Northridge.

Οι Matasovic and Kavazanjian (1998) προτείνουν ένα ζεύγος καμπυλών απομείωσης του μέτρου διάτμησης - αύξησης του λόγου απόσβεσης οι οποίες προέκυψαν από τον συγκερασμό των αποτελεσμάτων ανάστροφων αναλύσεων στον Χ.Υ.Τ.Α. Ο.Ι.Ι. και δοκιμών μεγάλης κλίμακας ανακυκλικής άμεσης απλής διάτμησης. Οι εργαστηριακές δοκιμές εκτελέστηκαν σε ανακατασκευασμένα δοκίμια απορριμματικού υλικού διαμέτρου 457mm με περιεκτικότητα σε εδαφοειδές υλικό μεγαλύτερη ή ίση του 65%, από τα αποτελέσματά τους συμπεραίνεται δε ότι τα κριτήρια Masing για τη δυναμική συμπεριφορά εδαφικού υλικού ισχύουν και για τα στερεά απόβλητα. Καθώς οι πειραματικές τιμές του μέτρου διάτμησης και του λόγου απόσβεσης αντιστοιχούσαν σε εύρος διατμητικών παραμορφώσεων από 0.1% έως 10%, για μικρότερο μέγεθος παραμορφώσεων οι αντίστοιχες τιμές εκτιμήθηκαν έπειτα από ανάστροφες δυναμικές αναλύσεις διδιάστατων προσομοιωμάτων πεπερασμένων στοιχείων. Προκειμένου να υπολογιστεί η χρονοϊστορία επιτάχυνσης του βραχώδους υποβάθρου αρχικά διεξήχθησαν μονοδιάστατες αναλύσεις (Schnabel et al., 1972) για πέντε καταγραφές και οι υπολογισθείσες χρονοϊστορίες επιτάχυνσης χρησιμοποιήθηκαν ως επιβαλλόμενη επιτάχυνση. Συγκρίνοντας ποιοτικά τα φάσματα απόκρισης των καταγραφών και των αριθμητικών αναλύσεων διαμορφώθηκαν τρία ζεύγη καμπυλών. Οι συγγραφείς προτείνουν την χρήση της καμπύλης που προκύπτει ως άνω όριο για το μέτρο διάτμησης, ενώ αντιθέτως για το λόγο απόσβεσης την καμπύλη που αποτελεί το κάτω όριο των αποτελεσμάτων θεωρώντας αυτήν την προσέγγιση ως συντηρητική.

Οι προτεινόμενες από τους Augello et al. (1998) καμπύλες βασίστηκαν σε ανάστροφες αναλύσεις του Χ.Υ.Τ.Α. Ο.Ι.Ι. Οι δυναμικές αναλύσεις έγιναν για δύο διατομές (που αντιστοιχούν στις δύο βασικές διευθύνσεις) και για τις καταγραφές από πέντε σεισμούς, με χρήση διδιάστατων προσομοιωμάτων πεπερασμένων στοιχείων. Εξέτασαν επίσης την επίδραση παραμέτρων, όπως η ταχύτητα διάδοσης του διατμητικού κύματος, ο λόγος του Poisson και οι καμπύλες απομείωσης του μέτρου διάτμησης και αύξησης του λόγου απόσβεσης. Τα αποτελέσματα της στατιστικής επεξεργασίας των καταγραφών και των αριθμητικών αναλύσεων δείχνουν ότι η επιλογή των καμπυλών έχει τη μεγαλύτερη επίδραση στον υπολογισμό την απόκρισης. Η καλύτερη σύγκλιση επιτυγχάνεται για εύρος διακύμανσης των καμπυλών μεταξύ των

καμπυλών για δείκτη πλαστιμότητας ίσο με 30 και 100 που έχουν προταθεί από τους Vucetic and Dobry (1991).

Οι Morochnic et al. (1998) χρησιμοποίησαν τις καταγεγραμμένες χρονοϊστορίες επιταχύνσεων του Χ.Υ.Τ.Α. Ο.Ι.Ι. και υποθέτοντας γραμμική ιξωδο-ελαστική συμπεριφορά των στερεών αποβλήτων διατύπωσαν απλά μονοδιάστατα προσομοιώματα για την εξέταση των ιδιοτήτων της απόσβεσης σε σχέση με το βάθος και την συχνότητα. Επιπλέον, συμπέραναν ότι για διατμητικές παραμορφώσεις της τάξης του 0.08% το απορριμματικό υλικό έχει γραμμική ιξωδο-ελαστική συμπεριφορά, και ότι η απόσβεσή του εξαρτάται από τη συχνότητα, ειδικά εντός του εύρους 0.1–10Hz.

Τέλος, ο Zekkos (2005) προσδιόρισε τις δυναμικές ιδιότητες του απορριμματικού υλικού του Χ.Υ.Τ.Α Tri-Cities, εκτελώντας κυκλικές τριαξονικές δοκιμές μεγάλης κλίμακας. Τα δοκίμια είχαν διάμετρο 300mm και ύψος 600–630mm. Εξετάστηκαν η επίδραση της σύστασης του δοκιμίου, του ειδικού βάρους, της ορθής τάσης, της διάρκειας της συμπίεσης και της συχνότητας της φόρτισης στις καμπύλες απομείωσης του μέτρου διάτμησης-αύξησης του λόγου απόσβεσης. Από τις προαναφερθείσες παραμέτρους, την πιο σημαντική επίδραση την είχε η σύσταση του δοκιμίου. Επίσης και το μέγεθος της ορθής τάσης επηρέασε τα αποτελέσματα αν και σε πιο περιορισμένο εύρος. Για το λόγο αυτό προτείνονται τρία διαφορετικά ζεύγη καμπυλών απομείωσης του μέτρου διάτμησης-αύξησης του λόγου απόσβεσης, καθεμία από τις οποίες αντιστοιχεί σε διαφορετικό ποσοστό εδαφοειδούς υλικού με κόκκους μικρότερους από 20mm.

#### **2.4.4 Ανασκόπηση των χαρακτηριστικών της μηχανικής συμπεριφοράς**

Οι βασικότερες ιδιότητες του απορριμματικού υλικού οι οποίες σχετίζονται με την εκτίμηση της σεισμικής συμπεριφοράς του, δηλαδή η πυκνότητα, η διατμητική αντοχή, η ταχύτητα διάδοσης του διατμητικού κύματος και οι σχέσεις απομείωσης του μέτρου διάτμησης-αύξησης του λόγου απόσβεσης, όπως αποδείχτηκε και από την προηγούμενη βιβλιογραφική ανασκόπηση παρουσιάζουν μεγάλη διασπορά. Συγκεκριμένα το ειδικό βάρος αναφέρεται ότι λαμβάνει τιμές από 5kN/m<sup>3</sup> έως 20kN/m<sup>3</sup>, ενώ αποδείχτηκε ότι εξαρτάται από πολλές παραμέτρους, συμπεριλαμβανομένων της σύστασης και της ηλικίας των απορριμμάτων, της ποσότητας του εδάφους καθημερινής κάλυψης, του ποσοστού υγρασίας, της πίεσης συμπόκνωσης και του βάθους. Μία μέση

αντιπροσωπευτική τιμή που ανταποκρίνεται σε αντίστοιχη εκτίμηση των παραμέτρων αυτών θεωρείται η  $10\text{kN/m}^3$ .

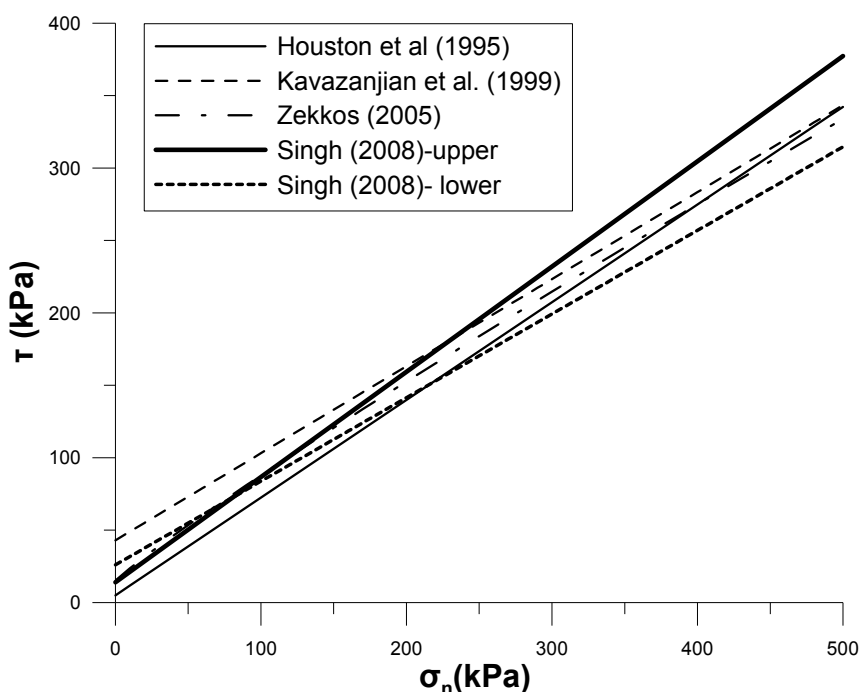
Στον Πίνακα 2.3 παρατίθενται συνοπτικά οι τιμές της γωνίας εσωτερικής τριβής και της συνοχής που αναφέρονται στη βιβλιογραφία για απορριμματικό υλικό. Εν γένει η συνοχή λαμβάνει τιμές από 0 έως 80 kPa ενώ η γωνία τριβής από  $10^\circ$  έως  $59^\circ$ . Εκτός των χαρακτηριστικών του απορριμματικού υλικού, οι τιμές των παραμέτρων διατμητικής αντοχής εξαρτώνται επιπλέον από τη σχετική διεύθυνση των ινωδών συστατικών σε σχέση με το επίπεδο αστοχίας, την ορθή τάση αλλά και την χρησιμοποιούμενη μέθοδο εκτίμησης.

**Πίνακας 2.3.** Συγκεντρωτικά στοιχεία παραμέτρων διατμητικής αντοχής για απορριμματικό υλικό. Παρατίθενται αποτελέσματα από δημοσιευμένα στοιχεία (Δ.Σ.), ανάστροφες αναλύσεις (Α.Α.), δοκιμές άμεσης διάτμησης (Α.Δ.), δοκιμές άμεσης απλής διάτμησης (Α.Α.Δ.), τριαξονικές δοκιμές (Τ.Δ.), αστράγγιστες τριαξονικές δοκιμές (Α.Τ.Δ.) και αστράγγιστες τριαξονικές δοκιμές συμπίεσης (Α.Τ.Δ.Σ.).

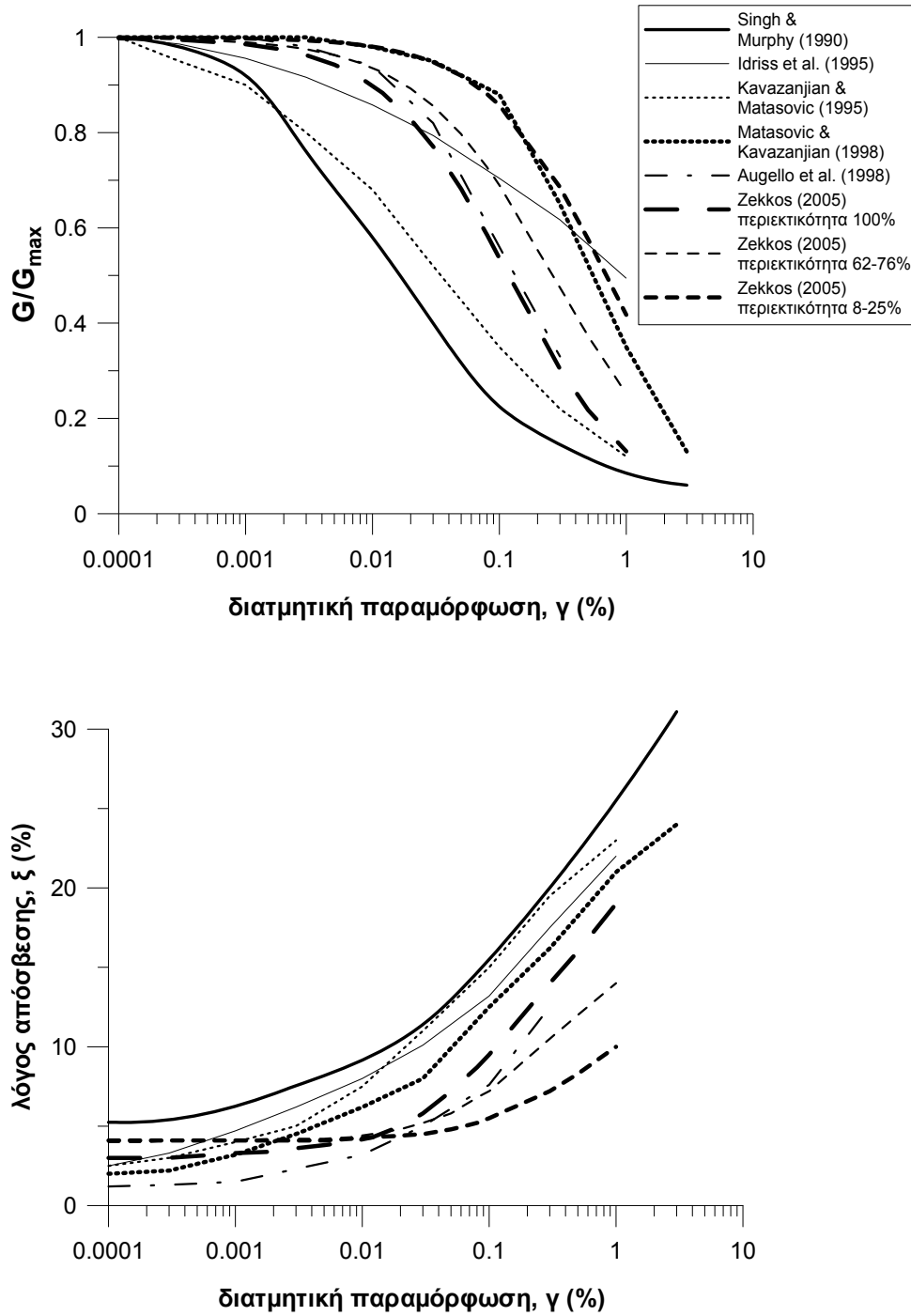
| Αναφορά                    | Μέθοδος     | Συνοχή<br>(kPa) | Γωνία τριβής                              | Στοιχεία                                    |
|----------------------------|-------------|-----------------|-------------------------------------------|---------------------------------------------|
| Augello et al. (1995)      | Α.Α.        | -               | $19^\circ$ - $39^\circ$                   |                                             |
| Kavazanjian et al. (1995b) | Δ.Σ. & Α.Α. | 24              | 0                                         | $\sigma < 30\text{kPa}$                     |
|                            |             | 0               | $33^\circ$                                | $\sigma > 30\text{kPa}$                     |
| Eid et al. (2000)          | Δ.Σ. & Α.Α. | 25              | $35^\circ$                                |                                             |
| Dixon & Jones (2005)       | Δ.Σ. & Α.Α. | 10              | $15^\circ$ - $25^\circ$                   |                                             |
| Palaypayon & Ohta (2007)   | Δ.Σ. & Α.Α. | 3-19            | $20^\circ$ - $40^\circ$                   |                                             |
| Houston et al. (1995)      | Α.Δ.        | 5               | $34^\circ$                                | επί τόπου                                   |
| Kölsch (1995)              | Α.Δ.        | 15              | $30^\circ$ - $57^\circ$                   |                                             |
|                            | Α.Δ.        | 43              | $31^\circ$                                |                                             |
|                            | Α.Α.Δ       | 0               | $30^\circ$                                |                                             |
| Kavazanjian et al. (1999)  | Α.Α.Δ.      | 16,30           | $33^\circ$ , $59^\circ$                   | διεύθυνση<br>ινών                           |
|                            |             |                 |                                           | $\varepsilon = 20\%$                        |
| Machado et al. (2002)      | Τ.Δ.        | 50-80           | $20^\circ$ - $28^\circ$                   |                                             |
|                            | Α.Δ.        | 6.4-31.4        | $40.4^\circ$ - $46.6^\circ$               |                                             |
| Zhu et al. (2003)          | Α.Τ.Δ.      | 0-10.2          | $10.5^\circ$ - $19^\circ$                 |                                             |
|                            | Α.Τ.Δ.Σ.    | 0-12.8          | $21^\circ$ - $29.5^\circ$                 |                                             |
| Vilar & Carvahlo (2005)    | Τ.Δ.        | 20, 71          | $22^\circ$ , $33^\circ$                   | $\varepsilon = 10\%$ . $\varepsilon = 30\%$ |
| Dixon & Jones (2005)       | Δ.Σ. & Τ.Δ. | 0-23.5          | $21^\circ$ - $42^\circ$                   |                                             |
| Zekkos (2005)              | Α.Δ.        | 15              | $36^\circ$ - $5^\circ \log(\sigma_n/P_a)$ |                                             |
|                            |             | 8.4             | $47^\circ$                                | άνω όριο                                    |
| Singh (2008)               | Τ.Δ.        | 0               | $35^\circ$                                | κάτω όριο                                   |
|                            | Α.Δ.        | 14,26           | $36^\circ$ , $30^\circ$                   |                                             |

Επιπλέον, ακόμη και για ίδιου τύπου εργαστηριακές δοκιμές το διαφορετικό μέγεθος των δοκιμίων φαίνεται ότι επιδρά στα αποτελέσματα, αν και λόγω της ανομοιογένειας του απορριμματικού οι μεγάλης κλίμακας εργαστηριακές δοκιμές θεωρούνται πιο αντιπροσωπευτικές. Η χρήση ανακατασκευασμένων ή αδιατάρακτων δοκιμίων δεν φάνηκε να επηρεάζει τις παραμέτρους διατμητικής αντοχής. Επίσης, παρατηρήθηκε ότι η συνεισφορά των ινωδών συστατικών στη διατμητική αντοχή του απορριμματικού υλικού είναι σημαντική και σε αυτήν οφείλονται πιθανώς οι αυξημένες τιμές των παραμέτρων για μεγαλύτερες τιμές παραμορφώσεων.

Καθώς οι δοκιμές άμεσης διάτμησης χρησιμοποιούνται πιο συχνά και επιπλέον θεωρούνται και πιο αντιπροσωπευτικές, επιλέγονται οι περιβάλλουσες αστοχίας που αντιστοιχούν σε αυτές και παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.7. Παρατηρείται ότι το εύρος των παραμέτρων αντοχής συρρικνώνεται και παρουσιάζουν διακύμανση από 5 έως 43kPa για τη συνοχή, και από 30° έως 36° για τη γωνία τριβής. Δεδομένων όλων των αβεβαιοτήτων που σχετίζονται με τις μηχανικές ιδιότητες του απορριμματικού υλικού, η διασπορά αυτή κρίνεται ικανοποιητική. Εκτός αυτού θα ήταν μη ρεαλιστικό να προτείνεται πιο περιορισμένο εύρος, αφού ακόμη και τα εδαφικά υλικά που είναι πιο ομοιογενή δεν χαρακτηρίζονται από συγκεκριμένες τιμές παραμέτρων αντοχής.



**Σχήμα 2.7.** Περιβάλλουσες αστοχίας σύμφωνα με αποτελέσματα δοκιμών άμεσης διάτμησης μεγάλης κλίμακας.



**Σχήμα 2.8.** Προτεινόμενες καμπύλες απομείωσης του μέτρου διάτμησης-αύξησης του λόγου απόσβεσης για το απορριμματικό υλικό.

Η ταχύτητα διάδοσης του διατμητικού κύματος προέκυψε ότι αυξάνει με το βάθος, και πιο συγκεκριμένα στην επιφάνεια μπορεί να λαμβάνει τιμές από 75 έως 200m/sec ενώ για το χαρακτηριστικό βάθος των 30m το εύρος αυτό αυξάνει σε 195 έως 400m/sec. Επίσης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.8, η διακύμανση είναι αρκετά μεγάλη και για τις καμπύλες απομείωσης μέτρου διάτμησης-αύξησης του λόγου απόσβεσης που



προέκυψαν από την βιβλιογραφική ανασκόπηση,. Πιο συγκεκριμένα, οι καμπόλες που προτείνονται από τον Zekkos (2005) καλύπτουν και τις προτεινόμενες από τους Matasovic and Kavazanjian (1998) και Augello et al. (1998). Αντιθέτως, πιο απότομη απομείωση του μέτρου διάτμησης και μεγαλύτερες τιμές του λόγου απόσβεσης προτάθηκαν από τους Singh and Murphy (1990) και Kavazanjian and Matasovic (1995), συνιστώντας έτσι το κάτω όριο των προτεινόμενων καμπυλών.

## 2.5 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΣΤΕΓΑΝΩΣΗΣ ΚΑΙ ΑΠΟΣΤΡΑΓΓΙΣΗΣ

Οι σύγχρονοι διεθνείς κανονισμοί έχουν καταστήσει σαφή την αναγκαιότητα κατασκευής ενός συστήματος στεγάνωσης και αποστράγγισης στη βάση του Χ.Υ.Τ.Α., καθώς και ενός συστήματος τελικής κάλυψης μετά το πέρας λειτουργίας του. Η τήρηση των ελάχιστων προδιαγραφόμενων απαιτήσεων έχει ως αποτέλεσμα την διαμόρφωση διεπιφανειών μεταξύ των διαφορετικών εδαφικών τύπων και διαφορετικών τύπων γεωσυνθετικών που απαρτίζουν τα συστήματα αυτά. Η στατική ευστάθεια των Χ.Υ.Τ.Α. καθορίζεται από τη διατμητική αντοχή που δύνανται να αναπτυχθεί κατά μήκος των διεπιφανειών αυτών, ενώ δεν είναι λίγες οι περιπτώσεις αστοχίας που έχουν αποδοθεί σε ανάπτυξη μετακινήσεων κατά μήκος τους (π.χ. Seed et al., 1990 και Koerner and Soong, 2000). Παράλληλα, αποτελεί κοινή πρακτική αντισεισμικού σχεδιασμού Χ.Υ.Τ.Α. η θεώρηση ότι οι διεπιφάνειες αυτές είναι οι πλέον κρίσιμες στον υπολογισμό της σεισμικής ευστάθειας τέτοιων γεωκατασκευών.

Στη συνέχεια θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα μίας εκτενούς βιβλιογραφικής διερεύνησης, μέσω της οποίας συγκεντρώθηκαν στοιχεία για τη διατμητική αντοχή των διεπιφανειών που σχηματίζονται μεταξύ εδαφικών στρώσεων και γεωσυνθετικών, καθώς και μεταξύ διαφορετικών τύπων γεωσυνθετικών. Σκοπός της επισκόπησης ήταν αφενός ο προσδιορισμός των παραμέτρων διατμητικής αντοχής για την κάθε πιθανή περίπτωση, αφετέρου η εκτίμηση της επίδρασης των σημαντικότερων παραμέτρων στη μηχανική συμπεριφορά των διεπιφανειών. Επειδή σε πολλούς Χ.Υ.Τ.Α. παρατηρείται μεγαλύτερη χρήση γεωσυνθετικών, τα οποία αποσκοπούν στον περιορισμό των απαιτούμενων εδαφικών υλικών, θα παρουσιαστούν και τα αποτελέσματα περιπτώσεων, οι οποίες δεν εμπίπτουν στις ελάχιστες προδιαγραφές αλλά η διερεύνηση της διατμητικής αντοχής τους έχει αναφερθεί στον σχεδιασμό υφιστάμενων Χ.Υ.Τ.Α. Σημειώνεται ότι στην παρακάτω ανάλυση αναφέρονται οι εξής συντομεύσεις που χρησιμοποιούνται στη διεθνή βιβλιογραφία για τα γεωσυνθετικά υλικά:

- PE: πολυαιθυλένιο
- PET: πολυεστέρας
- PP: πολυπροπυλένιο
- PVC: πολυ-βινυλοχλωρίδιο
- HDPE: υψηλής πυκνότητας πολυαιθυλένιο
- MDPE: μέσης πυκνότητας πολυαιθυλένιο
- VFPE: πολύ εύκαμπτο πολυαιθυλένιο
- CSPE: χλωροθειωμένο πολυαιθυλένιο
- CPE: χλωριωμένο πολυαιθυλένιο
- EPDM: μονομερές διένιο αιθυλενίου προπυλενίου
- GCL: γεωσυνθετικός αργιλικός φραγμός.

### 2.5.1 Διεπιφάνειες εδάφους - γεωσυνθετικών

Οι εδαφικές στρώσεις που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή του συστήματος στεγάνωσης και αποστράγγισης είναι: (α) συμπυκνωμένη αργιλική στρώση (β) αποστραγγιστική στρώση αποτελούμενη από κοκκώδες έδαφος, και (γ) στρώση φίλτρου αποτελούμενη από υλικό υψηλής διαπερατότητας. Για το λόγο αυτό οι διαμορφούμενες διεπιφάνειες, των οποίων η διατμητική αντοχή θα εξεταστεί είναι οι εξής: (α) συμπυκνωμένη άργιλος με γεωμεμβράνη, η οποία αποτελεί και την ελάχιστη απαίτηση σύμφωνα με τους κανονισμούς, και (β) κοκκώδες έδαφος με γεωμεμβράνη ή/και με γεωύφασμα, το οποίο τοποθετείται για την προστασία της γεωμεμβράνης.

#### Άργιλος με γεωμεμβράνη

Οι Koerner et al. (1986) αναφέρουν ότι εκτελέστηκαν στραγγιζόμενες δοκιμές άμεσης διάτμησης και διαμέσου αυτών προσδιορίστηκε η μηχανική συμπεριφορά των διεπιφανειών πέντε διαφορετικών ειδών γεωμεμβρανών (PVC, CPE, EPDM, HDPE και τραχείας επιφάνειας HDPE) με πέντε διαφορετικού τύπου συνεκτικά εδάφη χαμηλής διαπερατότητας. Τα μηχανικά χαρακτηριστικά των διαφορετικών τύπων εδάφους προσδιορίστηκαν ως εξής: συνοχή που κυμαίνεται από 9kPa έως 28kPa, και γωνία εσωτερικής τριβής από 22° έως 38°. Οι παράμετροι του κριτηρίου αστοχίας της διεπιφάνειας, οι οποίες προέκυψαν έπειτα από τις εργαστηριακές δοκιμές, λαμβάνουν τιμές φαινόμενης συνοχής από 5kPa έως 18kPa και γωνίας τριβής από 15° έως 40°. Η σημαντικότερη μείωση της διατμητικής αντοχής παρατηρήθηκε για την λεία γεωμεμβράνη HDPE, ενώ υψηλότερη αντοχή μετρήθηκε για την πιο δύσκαμπτη

γεωμεμβράνη από PVC. Εν γένει μεγάλες τιμές αντοχής προέκυψαν για τη γεωμεμβράνη HDPE τραχείας επιφάνειας, όπου και πιθανολογείται ότι η επιφάνεια αστοχίας ήταν εντός του εδάφους.

Οι Stark and Poerpel (1994) παρουσιάζουν τα αποτελέσματα στρεπτικών δοκιμών δακτυλιοειδούς διάτμησης σε διεπιφάνεια αργίλου με λεία γεωμεμβράνη HDPE. Λόγω του ποσοστού υγρασίας και της αμελητέας εκτόνωσης της υπερπίεσης πόρων που αναπτύχθηκε, προσδιορίστηκε η αστράγγιστη τιμή της διατμητικής αντοχής. Σύμφωνα με την εργασία αυτή, τόσο η μέγιστη όσο και η απομένουσα διατμητική αντοχή χαρακτηρίζονται από μη γραμμική συμπεριφορά, η οποία εξαρτάται από το ποσοστό υγρασίας και την ορθή τάση, ενώ παράλληλα αποτελούν το 55% και το 35% της μέγιστης και απομένουσας διατμητικής αντοχής της αργίλου αντίστοιχα.

Οι Fishman and Pal (1994) εξέτασαν την επίδραση του ρυθμού επιβαλλόμενων παραμορφώσεων κατά τη διεξαγωγή στραγγιζόμενων και αστράγγιστων δοκιμών άμεσης διάτμησης, για τον υπολογισμό της διατμητικής αντοχής των διεπιφανειών τριών τύπων αργίλου με γεωμεμβράνες HDPE λείας και τραχείας επιφάνειας. Πιο συγκεκριμένα, στην εργασία αυτή αποδείχτηκε ότι για την επίτευξη στραγγιζόμενων συνθηκών απαιτείται εξαιρετικά μικρός ρυθμός επιβαλλόμενων διατμητικών μετακινήσεων ( $10^{-4}$  mm/min). Οι διεπιφάνειες HDPE γεωμεμβρανών λείας επιφάνειας χαρακτηρίζονται πάντα από μικρότερη διατμητική αντοχή σε σχέση με αυτήν της αργίλου, επίσης η συμπεριφορά τάσεων-παραμορφώσεων είναι ελαστική-απολύτως πλαστική και δεν εξαρτάται από το ρυθμό επιβολής των παραμορφώσεων. Πιο πλάσטיμη συμπεριφορά χαρακτηρίζει τη διεπιφάνεια αργίλου με HDPE γεωμεμβράνη τραχείας επιφάνειας, η οποία είναι παρόμοια με την μηχανική συμπεριφορά της αργίλου για μικρούς ρυθμούς επιβολής των παραμορφώσεων. Αντιθέτως, όταν ο ρυθμός επιβολή παραμορφώσεων λαμβάνει μεγάλες τιμές (αστράγγιστες συνθήκες), η διεπιφάνεια μπορεί να χαρακτηρίζεται και από μεγαλύτερη διατμητική αντοχή σε σύγκριση με της αργίλου, η οποία εκφράζεται μέσω αυξημένης τιμής της φαινόμενης συνοχής. Επιπλέον, για την περίπτωση αυτή παρατηρήθηκε και ανάπτυξη απομένουσας διατμητικής αντοχής.

Παρομοίως, οι Bergado et al (2006) δεν παρατήρησαν χαλάρωση στην σχέση τάσεων-παραμορφώσεων της διεπιφάνειας αργίλου με λείας επιφάνειας γεωμεμβράνη. Στην εργασία αυτή διεξήχθησαν δοκιμές άμεσης διάτμησης σε σχετικά μικρό ρυθμό

επιβολής παραμορφώσεων, ο οποίος θεωρείται αντιπροσωπευτικός μερικώς στραγγιζόμενων συνθηκών. Από τα αποτελέσματα προκύπτουν υψηλότερες τιμές αντοχής σε ξηρό έδαφος, όπως άλλωστε ήταν και το αναμενόμενο. Οι Yegian and Harb (1995) προσδιόρισαν έπειτα από πειράματα σε σεισμική τράπεζα την κρίσιμη επιτάχυνση, δηλαδή την εφαπτομένη της δυναμικής γωνίας τριβής, για τρεις διεπιφάνειες μπετονίτη με γεωμεμβράνη. Η διατμητική αντοχή προέκυψε μεγαλύτερη για γεωμεμβράνη τραχείας επιφάνειας και για ξηρό έδαφος, αποτελέσματα που συμφωνούν και με τις προαναφερθείσες έρευνες.

Τα αποτελέσματα των εργαστηριακών δοκιμών που προαναφέρθηκαν παρατίθενται συγκεντρωτικά στον Πίνακα 2.4.

**Πίνακας 2.4.** Συγκεντρωτικά στοιχεία παραμέτρων διατμητικής αντοχής για διεπιφάνεια αργίλου με γεωμεμβράνη.

| Αναφορά                | c (kPa) | $\phi$ (°) | Γεωμεμβράνη              | Συνοχή (kPa)   | Γωνία τριβής (°) |
|------------------------|---------|------------|--------------------------|----------------|------------------|
| Stark & Poeppel (1994) | -       | -          | λεία HDPE                | -              | 6                |
| Koerner et al. (1986)  | 9       | 38         | PVC,CPE,EPDM,HDPE,t-HDPE | 8.5,8,5,5,9    | 39,40,33,26,35   |
|                        | 12      | 34         | PVC,CPE,EPDM,HDPE,t-HDPE | 3.7,3.2,5,2,11 | 23,24,23,23,29   |
|                        | 20      | 30         | PVC,CPE,EPDM,HDPE,t-HDPE | 14,13,8,14,18  | 16,17,23,15,27   |
|                        | 25      | 24         | PVC,CPE,EPDM,HDPE,t-HDPE | 7,8,7.5,3,15   | 24,23,20,21,26   |
|                        | 28      | 22         | PVC,CPE,EPDM,HDPE,t-HDPE | 12,10,9,14,16  | 17,19,18,15,25   |
| Fishman & Pal (1994)   | 21      | 22         | λεία HDPE                | 0              | 11               |
|                        | 21      | 22         | τραχεία HDPE             | 34             | 19               |
|                        | 28      | 31         | λεία HDPE                | 7              | 16               |
|                        | 35      | 16         | λεία HDPE                | 9              | 14               |
| Bergado et al. (2006)  | 35      | 16         | τραχεία HDPE             | 48             | 24               |
|                        | 46      | 33         | λεία HDPE                | -              | 10.5-8.2         |
| Yegian & Harb (1995)   | -       | -          | λεία HDPE                | -              | 10.2             |
|                        | -       | -          | λεία HDPE                | -              | 16.7             |
|                        | -       | -          | τραχεία HDPE             | -              | 14.6             |

Συμπερασματικά διαπιστώθηκε ότι η διατμητική αντοχή της διεπιφάνειας συνεκτικού εδάφους (αργίλου) με γεωμεμβράνη εξαρτάται από το είδος του υλικού της γεωμεμβράνης, την τραχύτητα της επιφάνειάς της, την διατμητική αντοχή της ίδιας της

αργίλου και τη διαδικασία δοκιμής. Πιο συγκεκριμένα, οι τιμές των παραμέτρων αντοχής που προκύπτουν από αστράγγιστες δοκιμές μπορεί να είναι μικρότερες από τις αντίστοιχες στραγγιζόμενες, ενώ τα αποτελέσματα των δυναμικών δοκιμών είναι παραπλήσια των αστράγγιστων δοκιμών. Επιπλέον, οι γεωμεμβράνες με λεία επιφάνεια χαρακτηρίζονται από μεγαλύτερη μείωση της διατμητικής αντοχής της αργίλου, ενώ οι διεπιφάνειες με γεωμεμβράνες με τραχεία επιφάνεια χαρακτηρίζονται από παραπλήσια ή/και μεγαλύτερη αντοχή (υπό αστράγγιστες συνθήκες) σε σχέση με αυτή του αργιλικού υλικού.

### **Κοκκώδες έδαφος με γεωμεμβράνη ή γεωόφασμα**

Αρχικά θα παρουσιαστεί η διατμητική αντοχή διεπιφάνειας άμμου και γεωμεμβράνης. Οι Martin et al. (1984) εξέτασαν τη διατμητική αντοχή της διεπιφάνειας τριών διαφορετικών αμμωδών εδαφών (διατμητική αντοχή και σχήμα κόκκων) με τέσσερις τύπους γεωμεμβράνης (HDPE, PVC, EPDM, και CSPE) μέσω δοκιμών άμεσης διάτμησης. Οι υπολογισθείσες τιμές της γωνίας τριβής κυμαίνονταν μεταξύ 17° και 27°, όπου οι χαμηλότερες τιμές αντιστοιχούν σε γεωμεμβράνη HDPE με λεία επιφάνεια (17°-18°) και οι μεγαλύτερες τιμές σε γεωμεμβράνη PVC (21°-27°).

Επιπλέον, οι Vaid and Rinne (1995) και για την ίδια περίπτωση διεπιφάνειας εξέτασαν την επίδραση της ορθής τάσης, του σχήματος των εδαφικών κόκκων και της σχετικής μετακίνησης για τρεις τύπους γεωμεμβράνης, δηλαδή HDPE με λεία και τραχεία επιφάνεια και PVC. Μολονότι το πάχος της γεωμεμβράνης αποδείχτηκε ότι δεν επηρεάζει τη μηχανική συμπεριφορά της διεπιφάνειας, ο τύπος της γεωμεμβράνης αποδείχτηκε σημαντική παράμετρος. Πιο συγκεκριμένα, μόνο η γεωμεμβράνη HDPE με λεία επιφάνεια χαρακτηρίζεται από μέγιστη και απομένουσα διατμητική αντοχή, ενώ οι αντίστοιχες τιμές της γωνίας τριβής είναι 20° και 14° για άμμο με στρογγυλεμένους κόκκους και 28° και 23° για άμμο με γωνιώδεις κόκκους, αντίστοιχα. Για γεωμεμβράνες PVC και HDPE με τραχεία επιφάνεια η διατμητική αντοχή της διεπιφάνειας διαφέρει ελάχιστα από την αντίστοιχη γωνία εσωτερικής τριβής της άμμου, είτε χαρακτηρίζεται από στρογγυλεμένους είτε από γωνιώδεις κόκκους. Εν γένει η διατμητική αντοχή της διεπιφάνειας δε βρέθηκε να εξαρτάται από το μέγεθος της ορθής τάσης, εκτός από την περίπτωση γεωμεμβράνης HDPE με λεία επιφάνεια όπου η γωνία τριβής μειώνεται ελαφρώς σε μεγάλες τιμές ορθής τάσης.

Δοκιμές κεκλιμένου επιπέδου χρησιμοποίησαν οι Izgin and Wasti (1998), προκειμένου να εξετάσουν την διατμητική αντοχή της διεπιφάνειας άμμου με γεωμεμβράνη για χαμηλά επίπεδα εφαρμοζόμενης ορθής τάσης. Από τα αποτελέσματα της διερεύνησής τους συνάγεται το συμπέρασμα ότι η αναπτυσσόμενη γωνία τριβής λαμβάνει μεγαλύτερες τιμές για γωνιώδεις άμμους και για γεωμεμβράνες με τραχεία επιφάνεια, ενώ η επίδραση της τραχύτητας της επιφάνειας της γεωμεμβράνης αποδείχτηκε πιο σημαντική για την περίπτωση άμμου με στρογγυλεμένους αντί με γωνιώδεις κόκκους. Επιπροσθέτως, δοκιμές σε σεισμική τράπεζα εκτελέστηκαν από τους Yegian et al. (1995), προκειμένου να προσδιοριστεί η δυναμική γωνία τριβής της διεπιφάνειας άμμου Ottawa με γεωμεμβράνη HDPE. Οι δοκιμές έγιναν για δύο διαφορετικές τιμές της συχνότητας (2Hz και 5Hz) και η κρίσιμη επιτάχυνση προέκυψε ίση με 0.3g ενώ η γωνία τριβής ίση με 16.7°.

Οι Martin et al. (1984) έπειτα από δοκιμές άμεσης διάτμησης σε διεπιφάνειες άμμου με γεωφάσμα, αναφέρουν ότι ο τύπος του γεωφάσματος παίζει καθοριστικό ρόλο. Οι υπολογισθείσες γωνίες τριβής κυμαίνονταν μεταξύ 23° και 30°, ενώ η μείωση σε σχέση με την εσωτερική γωνία τριβής της άμμου είναι περιορισμένη. Οι μεγαλύτερες τιμές της γωνία τριβής αντιστοιχούν σε μη υφασμένα γεωφάσματα, ενώ οι μικρότερες σε υφασμένα. Για πιο αδρό κοκκώδες έδαφος (χαλίκι) αναφέρεται από τους Bergado et al (2006) ότι, η διατμητική αντοχή της διεπιφάνειας με μη-υφασμένο γεωφάσμα εξαρτάται από την εφαρμοζόμενη ορθή τάση.

Τα αποτελέσματα των εργασιών στις οποίες εξετάζεται η διατμητική αντοχή της διεπιφάνειας κοκκώδους εδάφους με γεωσυνθετικό παρατίθενται συνοπτικά στον Πίνακα 2.5. Παρατηρείται ότι η διατμητική αντοχή της διεπιφάνειας άμμου με γεωμεμβράνη εξαρτάται από τον τύπο του πολυμερούς και την τραχύτητα της επιφάνειας της γεωμεμβράνης, την διατμητική αντοχή και το σχήμα των κόκκων της άμμου αλλά και την εφαρμοζόμενη ορθή τάση. Πιο συγκεκριμένα, η διεπιφάνεια στρογγυλεμένης άμμου με γεωμεμβράνη χαρακτηρίζεται από μεγαλύτερη μείωση της εσωτερικής γωνίας τριβής της άμμου συγκριτικά με την πιο γωνιώδη άμμο. Η τραχύτητα της επιφάνειας της γεωμεμβράνης είναι πιο σημαντική για την περίπτωση της διατμητικής αντοχής της διεπιφάνειας με άμμο στρογγυλεμένων κόκκων παρά γωνιωδών. Επίσης μόνο για γεωμεμβράνες HDPE με λεία επιφάνεια παρατηρήθηκε ανάπτυξη απομένουσας διατμητικής αντοχής. Τέλος, το μέγεθος της εφαρμοζόμενης ορθής τάσης αποτελεί κρίσιμη παράμετρο στον υπολογισμό της διατμητικής αντοχής

των διεπιφανειών κοκκώδους εδάφους με γεωσυνθετικό, ειδικά όταν η ορθή τάση είναι μικρότερη από 100kPa στην περίπτωση αμμόδους εδάφους και μεγαλύτερη από 100kPa στην περίπτωση χαλικώδους εδάφους.

**Πίνακας 2.5.** Συγκεντρωτικά στοιχεία παραμέτρων διατμητικής αντοχής για διεπιφάνεια κοκκώδους εδάφους με γεωμεμβράνη ή γεωφάσμα.

| Αναφορά               | Κόκκοι | $\phi$ (°) | Γεωσυνθετικό       | Γωνία τριβής (°) |            |
|-----------------------|--------|------------|--------------------|------------------|------------|
|                       |        |            |                    | μέγιστη          | απομένουσα |
| Martin et al. (1984)  |        | 30,28,26   | HDPE,EPDM,PVC,CSPE | 17-27            |            |
|                       |        | 30,28,26   | Γεωφάσμα           | 23-30            |            |
| Bergado et al. (2006) |        | 36.8-33.4  | Γεωφάσμα           | 18.8-42          | 9.0-41.0   |
| Vaid & Rinne (1995)   | στρογ. | 29         | PVC ,τραχεία HDPE  | 28               |            |
|                       | στρογ. | 29         | λεία HDPE          | 20               | 14         |
|                       | γων.   | 33         | PVC, τραχεία HDPE  | 30               |            |
|                       | γων.   | 33         | λεία HDPE          | 28               | 23         |
| Izgin & Wasti (1998)  |        | 38         | λεία HDPE          | 16.5-18.5        |            |
|                       |        | 38         | τραχεία HDPE       | 24-28            |            |
|                       | γων.   | 46         | λεία HDPE          | 23.5-26.5        |            |
|                       | γων.   | 46         | τραχεία HDPE       | 27.5-31.5        |            |
| Yegian et al. (1995)  |        |            | λεία HDPE          | 16.7             |            |

## 2.5.2 Διεπιφάνειες γεωσυνθετικών

Η πιο χαρακτηριστική περίπτωση διεπιφάνειας μεταξύ διαφορετικών τύπων γεωσυνθετικών είναι η επαφή γεωμεμβράνης με γεωφάσμα το οποίο τοποθετείται για την προστασία της. Η χρήση επιπλέον των ελαχίστων απαιτούμενων γεωσυνθετικών είναι συχνή καθώς είναι γνωστά τα πλεονεκτήματα των γεωσυνθετικών και ειδικά των γεωδικτύων όσον αφορά την αποστράγγιση. Για τον λόγο αυτό η στρώση αποστράγγισης, η οποία αποτελείται συχνά από άμμο, αντικαθίσταται από γεωδίκτυα ή εναλλακτικά από χαλίκι το οποίο τοποθετείται επί μη υφασμένου γεωφάσματος. Η δυσχέρεια εύρεσης εδαφικού υλικού με τόσο μικρή διαπερατότητα ώστε να κατασκευαστεί η συμποκνωμένη στρώση αργίλου, συχνά οδηγεί στην χρήση γεωσυνθετικού αργλικού φραγμού (GCL), το οποίο αποτελείται από μπεντονίτη εγκιβωτισμένο μεταξύ δύο μη-υφασμένων γεωφασμάτων. Συνεπώς η βιβλιογραφική διερεύνηση που θα ακολουθήσει εξετάζει τα αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών για

τον υπολογισμό της διατμητικής αντοχής διεπιφανειών: (α) γεωμεμβράνης με γεωφάσμα, (β) γεωδικτύου με γεωμεμβράνη, (γ) γεωδικτύου με γεωφάσμα, και (δ) GCL με γεωμεμβράνη.

### **Γεωφάσμα με γεωμεμβράνη**

Είναι αξιοσημείωτο το γεγονός ότι, παρατηρείται αρκετά έντονο ερευνητικό ενδιαφέρον για τη διερεύνηση της διατμητικής αντοχής της διεπιφάνειας γεωφάσματος με γεωμεμβράνες. Έχουν διεξαχθεί διάφορων τύπων πειράματα, όπως τροποποιημένες και μεγάλης κλίμακας δοκιμές άμεσης διάτμησης, στρεπτικές δοκιμές δακτυλιοειδούς διάτμησης και δοκιμές κεκλιμένου επιπέδου, οι οποίες εξετάζουν το ρόλο των επιμέρους παραμέτρων στην αναπτυσσόμενη γωνία τριβής.

Οι Martin et al (1984) εξέτασαν την διατμητική αντοχή της διεπιφάνειας τεσσάρων τύπων γεωμεμβράνης (HDPE, PVC, EPDM, και CSPE) με τέσσερις τύπους γεωφασμάτων (υφασμένα και μη). Οι μικρότερες τιμές γωνίας τριβής (6°-11°) αντιστοιχούν σε διεπιφάνειες γεωμεμβρανών HDPE ενώ το αντίστοιχο εύρος τιμών για τις πιο δύσκαμπτες γεωμεμβράνες PVC είναι 10°-28°.

Έπειτα από στρεπτικές δοκιμές δακτυλιοειδούς διάτμησης οι Stark and Poeppel (1994) αναφέρουν ότι τόσο η μέγιστη όσο και η απομένουσα διατμητική αντοχή χαρακτηρίζεται από γραμμικό κριτήριο αστοχίας με γωνία τριβής 9° και 6° αντίστοιχα, για την περίπτωση διεπιφάνειας μη υφασμένου γεωφάσματος επί γεωμεμβράνης HDPE λείας επιφάνειας. Σε μεταγενέστερη εργασία, οι Stark et al. (1996) εξέτασαν την διατμητική αντοχή διεπιφάνειας γεωμεμβράνης HDPE λείας και τραχείας επιφάνειας διάφορων τύπων ύφανσης, με μη υφασμένα βελονοδιάτρητα γεωφάσματα από διαφορετικό υλικό, με διαφορετική μάζα ανά μονάδα επιφάνειας, με διαφορετικό είδος ίνας και με διαφορετικό τύπο ύφανσης. Οι στρεπτικές δοκιμές δακτυλιοειδούς διάτμησης που εκτελέστηκαν έδειξαν ότι, ο ρυθμός επιβολής διατμητικών παραμορφώσεων δεν επηρεάζει ούτε τη μέγιστη ούτε την απομένουσα διατμητική αντοχή των εξεταζόμενων διεπιφανειών.

Στην πλειονότητα των δοκιμών που διενεργήθηκαν, παρατηρήθηκε ότι η σχέση τάσεων-παραμορφώσεων για τις διεπιφάνειες γεωμεμβράνης τραχείας επιφάνειας με μη υφασμένο γεωφάσμα ήταν μη γραμμική, οπότε προτείνεται κατά τον υπολογισμό της ευστάθειας να λαμβάνονται τιμές τριβής που αντιστοιχούν στην αναμενόμενη ορθή τάση στο πεδίο. Καθώς οι διεπιφάνειες γεωμεμβρανών με τραχεία επιφάνεια



χαρακτηρίζονται από υψηλότερες τιμές διατμητικής αντοχής σε σύγκριση με τις αντίστοιχες λείας επιφάνειας, η επίδραση των επιμέρους παραμέτρων που χαρακτηρίζουν ένα μη υφασμένο γεωϋφάσμα εκτιμήθηκαν από τους Stark et al. (1996) μόνο για γεωμεμβράνες με τραχεία επιφάνεια. Πιο συγκεκριμένα, η διατμητική αντοχή των διεπιφανειών αυτών χαρακτηρίζεται από μείωση με την ανάπτυξη σχετικών μετακινήσεων, η οποία αποδίδεται στην λείανση της επιφάνειας της γεωμεμβράνης, στην εξόλκευση και στο σχίσσιμο των ινών του γεωυφάσματος και στην αναδόμησή τους μέσω της αλλαγής της διεύθυνσής τους κατά την εκτέλεση της δοκιμής.

Όσον αφορά στην επίδραση των παραμέτρων που σχετίζονται με το γεωϋφάσμα (πολυμερές, μάζα ανά μονάδα επιφάνειας, είδος ίνας και τύπος ύφανσης) διαπιστώθηκαν τα εξής:

- τα γεωυφάσματα από πολυεστέρα χαρακτηρίζονται από μεγαλύτερες τιμές μέγιστης και απομένουσας διατμητικής αντοχής σε σύγκριση με τα αντίστοιχα από πολυπροπυλένιο,
- η μείωση της μάζας ανά μονάδα επιφάνειας του γεωυφάσματος σχετίζεται με αύξηση της μέγιστης τιμής της διατμητικής αντοχής της διεπιφάνειας,
- υψηλότερη μέγιστη τιμή της διατμητικής αντοχής χαρακτηρίζει τα γεωυφάσματα που αποτελούνται από συνεχή μονόκλωνα νήματα σε σύγκριση με εκείνα που χρησιμοποιούνται κλωστές για την κατασκευή τους, ενώ η απομένουσα τιμή της διατμητικής αντοχής δεν επηρεάζεται από το είδος την ίνας και τον τύπο της ύφανσης,
- ο κυλινδρισμός ενός μη-υφασμένου γεωυφάσματος κατασκευασμένου από κλωστές μπορεί να αυξήσει τη διατμητική αντοχή (μέγιστη και απομένουσα) της διεπιφάνειάς του.

Τη διατμητική αντοχή γεωσυνθετικών διεπιφανειών διερεύννησαν και οι Jones and Dixon (1998) μέσω δοκιμών άμεσης διάτμησης και στρεπτικής δακτυλιοειδούς διάτμησης για ορθές τάσεις μεταξύ 25kPa και 200kPa, λαμβάνοντας ταυτόχρονα υπόψη και την επίδραση του εδάφους κάλυψης. Οι παράμετροι που εξετάστηκαν στην εργασία αυτή είναι η τραχύτητα της επιφάνειας της γεωμεμβράνης, ο τύπος του πολυμερούς της γεωμεμβράνης, ο τύπος του εδάφους κάλυψης, το πάχος και το βάρος του γεωυφάσματος, το είδος των ινών και ο τύπος πολυμερούς του γεωυφάσματος. Παρατηρήθηκε ότι, οι διεπιφάνειες των HDPE γεωμεμβρανών λείας επιφάνειας παρουσιάζουν τη μέγιστη διατμητική αντοχή τους σε πολύ μικρή επιβαλλόμενη

παραμόρφωση σε αντίθεση με τις αντίστοιχες HDPE γεωμεμβρανών τραχείας επιφάνειας. Παρά ταύτα η διατμητική αντοχή των διεπιφανειών HDPE γεωμεμβρανών τραχείας επιφάνειας είναι μεγαλύτερη και παρατηρείται επίσης πιο έντονη μείωσή της καθώς αυξάνουν οι επιβαλλόμενες παραμορφώσεις.

Όσον αφορά στην επίδραση του τύπου του εδάφους κάλυψης, παρατηρήθηκε ότι η εφαρμογή του κατά την εκτέλεση των δοκιμών είχε μεγαλύτερη επίδραση στην εκτίμηση της διατμητικής αντοχής των γεωμεμβρανών με τραχεία επιφάνεια. Για τις περιπτώσεις αυτές υπολογίστηκαν ιδιαίτερα υψηλές τιμές φαινόμενης συνοχής, ειδικά για τις γεωμεμβράνες που έχουν κατασκευαστεί με την τεχνική της προσκόλλησης θερμών σωματιδίων. Κατάληξαν επίσης ότι, η χρήση ενός τεμαχίου από νάιλον αντί για έδαφος για την εκτέλεση της δοκιμής άμεσης διάτμησης μπορεί μεν να εφαρμοστεί αλλά με προσοχή, καθώς τα αποτελέσματα είναι συντηρητικά μόνο για την περίπτωση γεωμεμβρανών τραχείας επιφάνειας. Επιπροσθέτως, το βάρος των γεωφασμάτων επηρεάζει σε μικρό βαθμό την αναπτυσσόμενη διατμητική αντοχή στη διεπιφάνεια με γεωμεμβράνη, ενώ τα γεωφάσματα από HDPE παρουσιάζουν ελάχιστα μεγαλύτερη διατμητική αντοχή στην διεπιφάνεια με γεωμεμβράνη σε σύγκριση με τα γεωφάσματα πολυπροπυλενίου, ειδικά για την περίπτωση γεωμεμβρανών με τραχεία επιφάνεια.

Οι παράμετροι διατμητικής αντοχής που αναφέρονται από τους Jones and Dixon (1998) υπολογίστηκαν θεωρώντας γραμμική σχέση διατμητικών και ορθών τάσεων και για τη διεπιφάνεια γεωμεμβράνης λείας επιφάνειας με γεωφάσμα η γωνία τριβής κυμαίνεται μεταξύ 5.5° και 11°. Υψηλότερες τιμές της γωνίας τριβής αναφέρονται για τις διεπιφάνειες των γεωμεμβρανών με τραχεία επιφάνεια, δηλαδή 22.3°-29.7° και 23.8°-31.6° για γεωμεμβράνες κατασκευασμένες με την τεχνική της προσκόλλησης και της εξώθησης αντίστοιχα. Τέλος, οι απομένουσες τιμές της γωνίας τριβής των εξεταζόμενων διεπιφανειών παρουσίασαν αντίστοιχα χαρακτηριστικά με αυτά των μέγιστων.

Τα αποτελέσματα δοκιμών στρεπτικής δακτυλιοειδούς διάτμησης και μεγάλης κλίμακας άμεσης διάτμησης συσχετίστηκαν και από τους Hillman and Stark (2001), οι οποίοι κατέληξαν ότι από την κάθε διαδικασία προκύπτουν διαφορετικές τιμές απομένουσας διατμητικής αντοχής και επιπλέον οι τελευταίες επιτυγχάνονται σε διαφορετικό επίπεδο μετακίνησης. Στη διερεύνηση αυτή εκτελέστηκε ένα ικανό πλήθος δοκιμών στρεπτικής δακτυλιοειδούς διάτμησης εξετάζοντας τις διάφορες επιμέρους παραμέτρους. Μελετώντας τη διατμητική αντοχή διεπιφανειών γεωμεμβρανών PVC με

γεωφάσματα, συμπέραναν ότι λαμβάνει μικρότερες τιμές για την τραχεία επιφάνεια σε σύγκριση με την λεία επιφάνεια και μάλιστα η τελευταία φαίνεται ότι δεν παρουσιάζει μείωση της διατμητικής αντοχής της με την αύξηση των επιβαλλόμενων παραμορφώσεων. Η συμπεριφορά αυτή αποδόθηκε στη μεγαλύτερη ευκαμψία και τη μεγαλύτερη επιφάνεια επαφής, η οποία μπορεί να συντελέσει στην τράχυνση της επιφάνειας και την εισχώρηση εντός της επιφάνειας του γεωφάσματος καθώς και την αποτροπή της εξόλκευσης των ινών του γεωφάσματος.

Περαιτέρω διερευνήθηκε η επίδραση του τύπου της γεωμεμβράνης στην εκτίμηση της διατμητικής αντοχής των διεπιφανειών με γεωφάσμα. Πιο συγκεκριμένα, εκτελέστηκαν πειράματα για τρεις διαφορετικές γεωμεμβράνες (PVC, HDPE, και VFPE) με λεία και τραχεία επιφάνεια και μη-υφασμένο γεωφάσμα πολυεστέρα. Οι διεπιφάνειες γεωμεμβρανών HDPE με τραχεία επιφάνεια με γεωφάσμα χαρακτηρίζονται από συγκρίσιμη διατμητική αντοχή με τις αντίστοιχες των γεωμεμβρανών PVC αλλά παρατηρείται μεγαλύτερη απομείωση λόγω αύξησης των επιβαλλόμενων παραμορφώσεων. Το φαινόμενο αυτό αποδόθηκε από τους συγγραφείς στο σχίσμο ή στην εξόλκευση των ινών του γεωφάσματος αλλά και στην λείανση της επιφάνειας της γεωμεμβράνης. Επιπλέον, οι διεπιφάνειες γεωμεμβρανών VFPE με τραχεία επιφάνεια με γεωφάσμα χαρακτηρίζονται από μικρότερη τιμή μέγιστης και απομένουσας διατμητικής αντοχής σε σύγκριση με τις αντίστοιχες των γεωμεμβρανών PVC. Παρατηρείται σημαντική μείωση τόσο της μέγιστης όσο και της απομένουσας διατμητικής αντοχής της διεπιφάνειας στην περίπτωση γεωμεμβρανών HDPE και VFPE με λεία επιφάνεια.

Στην εργασία αυτή εξετάστηκε και ο ρόλος των διαφορετικών χαρακτηριστικών των γεωφασμάτων, δηλαδή το είδος της ίνας, η μάζα ανά μονάδα επιφάνειας, το πολυμερές και ο τύπος ύφανσης, στη διατμητική αντοχή της διεπιφάνειας με μία γεωμεμβράνη PVC τραχείας επιφάνειας. Σε σχέση με τα χαρακτηριστικά αυτά προέκυψε ότι η διατμητική αντοχή της διεπιφάνειας με γεωμεμβράνη PVC τραχείας επιφάνειας έχει εν γένει αντίστοιχη συμπεριφορά με γεωμεμβράνη HDPE τραχείας επιφάνειας όπως αναφέρεται από τους Stark et al. (1996). Μικρότερη μέγιστη τιμή της διατμητικής αντοχής χαρακτηρίζει τα γεωφάσματα τα οποία αποτελούνται από συνεχή μονόκλινα νήματα σε σύγκριση εκείνα που χρησιμοποιούνται κλωστές για την κατασκευή τους.

Οι Wasti and Ozdüzgün (2001) εκτίμησαν την αντοχή διεπιφανειών γεωφάσματος με γεωμεμβράνη έπειτα από δοκιμές άμεσης διάτμησης και δοκιμές κεκλιμένου επιπέδου. Παράλληλα, εξετάστηκε και η επίδραση της τραχύτητας της επιφάνειας της γεωμεμβράνης και του τύπου του πολυμερούς των γεωσυνθετικών στην αντοχή της διεπιφάνειας. Πιο συγκεκριμένα, αποδείχτηκε ότι για μικρές τιμές της ορθής τάσης η διατμητική αντοχή της διεπιφάνειας HDPE γεωμεμβράνης λείας επιφάνειας με γεώφασμα προσδιορίζεται από τιμές φαινόμενης συνοχής εντός του εύρους των 0.4 - 1.3kPa και γωνιών τριβής από 10.3° έως 13°, ενώ οι αντίστοιχες τιμές για διεπιφάνειες HDPE γεωμεμβράνης με τραχεία επιφάνεια είναι 0.7-2.7kPa και 25.6 - 27.9°. Για τις διεπιφάνειες γεωμεμβρανών PVC προέκυψε ότι οι παράμετροι του κριτηρίου αστοχίας λαμβάνουν τιμές 1kPa και 18.5° για τη συνοχή και τη γωνία τριβής αντίστοιχα. Η σύγκριση των δύο διαφορετικών τύπων δοκιμών έδειξε ότι για την περίπτωση γεωμεμβρανών τραχείας επιφάνειας παρατηρείται απόκλιση μεταξύ των αποτελεσμάτων τους και επιπλέον η διατμητική αντοχή των διεπιφανειών τους εξαρτάται από την εφαρμοζόμενη ορθή τάση.

Δοκιμές άμεσης διάτμησης αναφέρονται και από τους Bergado et al. (2006) για τον προσδιορισμό της διατμητικής αντοχής της διεπιφάνειας HDPE γεωμεμβράνης με λεία επιφάνεια και μη-υφασμένων βελονοδιάτρητων γεωφασμάτων. Οι τιμές της μέγιστης και απομένουσας γωνίας τριβής που προέκυψαν είναι 6.8-9.9° και 6.5-9.4° αντίστοιχα. Τη δυναμική γωνία τριβής για την αντίστοιχη διεπιφάνεια προσδιόρισαν και οι De and Zimmie (1998) διαμέσου δοκιμών ανακυκλικής άμεσης διάτμησης. Η συχνότητα της διέγερσης ή το μέγεθος της ορθής τάσης δεν αποδείχτηκαν ότι επηρεάζουν την παράμετρο αυτή. Μια μικρή μείωση της δυναμικής γωνίας τριβής παρατηρήθηκε μόνο με την αύξηση του αριθμού των κύκλων της επιβαλλόμενης φόρτισης. Δοκιμές σε σεισμική τράπεζα των Yegian and Kadakal (1998) και των Yegian and Lahlaf (1992) έδειξαν ότι οι διεπιφάνειες HDPE γεωμεμβρανών λείας επιφάνειας με μη υφασμένα θερμικά συγκολλημένα γεωφάσματα χαρακτηρίζονται από υψηλότερες τιμές γωνίας δυναμικής τριβής (15.6°) σε σύγκριση με τις αντίστοιχες για βελονοδιάτρητα γεωφάσματα (10.7° - 11.3°).

Στον Πίνακα 2.6 παρατίθενται οι τιμές των παραμέτρων διατμητικής αντοχής που αναφέρονται στις προαναφερθείσες εργασίες. Συμπερασματικά, οι σχετικές εργασίες ανέδειξαν την σημαντική επίδραση των διαφόρων παραμέτρων στην εκτίμηση της διατμητικής αντοχής των διεπιφανειών γεωμεμβράνης με γεώφασμα. Σε σχέση με τη

γεωμεμβράνη, τόσο ο τύπος του υλικού όσο και η τραχύτητα της επιφάνειας μπορεί να επηρεάσουν τη συμπεριφορά της διεπιφάνειας. Πιο συγκεκριμένα, οι γεωμεμβράνες HDPE και VFPE χαρακτηρίζονται από χαμηλότερες τιμές της διατμητικής αντοχής της διεπιφάνειας σε σύγκριση με τις αντίστοιχες των γεωμεμβρανών PVC. Η τελευταία δεν χαρακτηρίζεται από σημαντική απομείωση της διατμητικής αντοχής με την αύξηση των επιβαλλόμενων παραμορφώσεων εν αντιθέσει με τις γεωμεμβράνες από πολυαιθυλένιο. Επιπλέον, η τραχύτητα της επιφάνειας επιδρά σε μεγάλο βαθμό στην προκύπτουσα διατμητική αντοχή της διεπιφάνειας. Οι διεπιφάνειες γεωμεμβρανών λείας επιφάνειας χαρακτηρίζονται από χαμηλότερες τιμές γωνίας τριβής σε σύγκριση με τις αντίστοιχες τραχείας επιφάνειας, ενώ και ο τρόπος διαμόρφωσης της επιφάνειας παίζει ρόλο στη διατμητική αντοχή.

Οι προαναφερθείσες εργασίες συμφωνούν ότι οι ιδιότητες του γεωφάσματος που επιδρούν στη διατμητική αντοχή της διεπιφάνειας είναι κυρίως το είδος του πολυμερούς, το είδος της ίνας, η μάζα ανά μονάδα επιφάνειας και ο τύπος ύφανσης. Πιο συγκεκριμένα, για μη-υφασμένα βελονοδιάτρητα γεωφάσματα προέκυψε ότι η αύξηση της μάζας ανά μονάδα επιφάνειας και ο μη κυλινδρισμός των γεωφασμάτων συνεπάγεται μικρότερη διατμητική αντοχή της διεπιφάνειας. Επίσης, τα γεωφάσματα πολυαιθυλενίου χαρακτηρίζονται από υψηλότερες τιμές της διατμητικής αντοχής της διεπιφάνειας εν συγκρίσει με του πολυπροπυλενίου.

### **Γεωδίκτο / γεωσύνθετο με γεωμεμβράνη**

Οι Stark and Roeppe (1994) αναφέρουν τα αποτελέσματα δοκιμών στρεπτικής δακτυλοειδούς διάτμησης σε διεπιφάνεια HDPE γεωδικτύου επί HDPE γεωμεμβράνης, σύμφωνα με τα οποία η μέγιστη και η απομένουσα γωνία τριβής ισούνται με  $12^\circ$  και  $7.5^\circ$ , αντίστοιχα. Για την ίδια περίπτωση διεπιφάνειας οι Bergado et al. (2006) έδειξαν ότι από δοκιμές άμεσης διάτμησης η γωνία τριβής υπολογίστηκε ίση με  $13.2^\circ$ .

**Πίνακας 2.6.** Συγκεντρωτικά στοιχεία παραμέτρων διατμητικής αντοχής για διεπιφάνεια γεωμεμβράνης με γεωύφασμα. Οι συντομογραφίες αναφέρονται σε Μ: μονόκλωνο, Τ: ταινία, Κ: κλωστή, Υ: υφασμένο, Μ.Υ.: μη-υφασμένο, Β: βελονοδιάτρητο, ΚΥ: κυλινδρισμός, Θ.Σ.: θερμικά συγκολλημένα.

| Αναφορά                | Γεωμεμβράνη        | Γεωύφασμα |      |           | Γωνία τριβής (°)          |                    |
|------------------------|--------------------|-----------|------|-----------|---------------------------|--------------------|
|                        |                    | Υλικό     | Τύπο | Υφανση    | Βάρος (g/m <sup>2</sup> ) | μέγιστη απομένουσα |
| Martin et al., (1984)  | HDPE,EPDM,PVC,CSPE | PP        | M    | Υ.        | -                         | 6,17,11,9          |
|                        | HDPE,EPDM,PVC,CSPE | PP        | T.   | Υ.        | -                         | 10,21,28,13        |
|                        | HDPE,EPDM,PVC,CSPE | PP        |      | M.Y.      | -                         | 11,18,20,21        |
|                        | HDPE,EPDM,PVC,CSPE | PP        |      | B.        | -                         | 8,23,23,15         |
|                        | τραχεία -PVC       | PP        |      | M.Y.      | 540                       | 28,28,27,25,29     |
|                        | τραχεία -PVC       | PET       |      | M.Y.      | 540                       | 37,33,31,32,33     |
|                        | τραχεία -PVC       | PP        |      | M.Y.      | 205                       | 25,26,28,28,27     |
|                        | τραχεία -PVC       | PP        |      | M.Y.      | 540                       | 20,21,22,23,22     |
| Hillman & Stark (2001) | λεία - PVC         | PP        |      | M.Y.      | 540                       | 29,30,32,30,26     |
|                        | τραχεία -PVC       | PP        |      | M.Y., ΚΥ. | 540                       | 32,30,29,31,31     |
|                        | λεία -HDPE         | PET       |      | M.Y.      | 540                       | 11,10,11,9,9       |
|                        | τραχεία - HDPE     | PET       |      | M.Y.      | 540                       | 55,39,32,33,31     |
|                        | λεία -VFPE         | PET       |      | M.Y.      | 540                       | 11,9,10,7,7        |
|                        | τραχεία - VFPE     | PET       |      | M.Y.      | 540                       | 42,32,30,27,27     |
|                        | Smooth-HDPE        | PP        |      | B.        | 9                         | 6                  |
|                        | Coextr - HDPE      | PP        | M.   | B.        | 270                       | 32                 |
| Stark & Poeppel (1994) | Coextr - HDPE      | PP        | K.   | B.        | 540                       | 26                 |
|                        | Coextr - HDPE      | PET       | M.   | B.        | 540                       | 31                 |
|                        | Coextr - HDPE      | PP        | M.   | B.        | 540                       | 28                 |
|                        | Lam -HDPE          | PP        | K.   | B., ΚΥ.   | 540                       | 33,28              |
|                        |                    |           |      |           |                           | 15,11              |
|                        |                    |           |      |           |                           |                    |

| Αναφορά                | Γεωμεμβράνη  | Γεωόφρασμα |       |                              | Συνοχή<br>(kPa) | Γωνία τριβής (°) |            |
|------------------------|--------------|------------|-------|------------------------------|-----------------|------------------|------------|
|                        |              | Υλικό      | Τύπος | Υφανση                       |                 | μέγιστη          | απομένουσα |
|                        |              |            |       | Βάρος<br>(g/m <sup>2</sup> ) |                 |                  |            |
| Jones & Dixon (1998)   | λεία HDPE    | PP         | B.    | 750                          | 0-2             | 7.2-8.4          | 6.2        |
|                        | λεία HDPE    | PP         | B.    | 1200                         | 0-1.6           | 5.3-8.0          | 4.8        |
|                        | λεία HDPE    | HDPE       | B.    | 800                          | 0-0.8           | 6.6-10.1         | 6.2        |
|                        | Imp- HDPE    | PP         | B.    | 750                          | 2.5-26.2        | 23-28.5          | 10.5       |
|                        | Imp-HDPE     | PP         | B.    | 1200                         | 3.7-22          | 22.3-26.2        | 10         |
|                        | Imp- HDPE    | HDPE       | B.    | 800                          | 3.2-23.3        | 24.5-29.7        | 14.4       |
|                        | Coextr- HDPE | PP         | B.    | 750                          | 3.9-9.6         | 23.8-25.5        | 10.7       |
|                        | Coextr- HDPE | PP         | B.    | 1200                         | 2.8-5.3         | 23.9-27.4        | 11.5       |
|                        | Coextr- HDPE | HDPE       | B.    | 800                          | 0-6.6           | 24.6-31.6        | 14.2       |
| Wasti & Ozdugun (2001) | λεία HDPE    | PP         | B.    | 500                          | 0.4-0.97        | 10.3-11.5        |            |
|                        | λεία HDPE    | PET        | B.    | 500                          | 0.9-1.3         | 12.4-12.9        |            |
|                        | τραχεία HDPE | PP         | B.    | 500                          | 0.7-1.8         | 25.6-27.6        |            |
|                        | τραχεία HDPE | PET        | B.    | 500                          | 1.7-2.7         | 26-28            |            |
|                        | PVC          | PP         | B.    | 500                          | 1               | 18.3-18.8        |            |
|                        | λεία HDPE    | PP         | B.    | 500                          |                 | 7.8-9.5          | 7.4-9.0    |
|                        | λεία HDPE    | PP         | B.    | 250                          |                 | 6.8-9.9          | 6.6-9.4    |
|                        | λεία HDPE    | PP         | B     | -                            |                 | 10.7-11.3        |            |
|                        | λεία HDPE    |            | Θ.Σ.  | -                            |                 | 15.6             |            |
| De & Zimmie (1998)     | λεία HDPE    | PP         | B.    | 270                          |                 | 10.5-12.5        |            |

Εν συνεχεία, οι Stark et al. (1996) προσδιόρισαν τη διατμητική αντοχή της διεπιφάνειας γεωμεμβράνης με τραχεία επιφάνεια με γεωσύνθετο αποστράγγισης. Το γεωσύνθετο αποτελούνταν από δύο βελονοδιάτρητα γεωφάσματα πολυεστέρα επί των οποίων ήταν συνδεδεμένο ένα γεωδίκτυ MDPE με θερμική συγκόλληση. Οι συγγραφείς συμπέραναν ότι η παρουσία του γεωδικτύου δεν επιδρά στις εκτιμώμενες τιμές διατμητικής αντοχής της διεπιφάνειας αφού οι τιμές της γωνίας τριβής που προέκυψαν για το γεωσύνθετο είναι παραπλήσιες με τις αντίστοιχες των γεωφασμάτων.

Οι Hillman and Stark (2001) συνέκριναν τα χαρακτηριστικά των διεπιφανειών γεωμεμβρανών με τραχεία επιφάνεια επί γεωσύνθετου αλλά και επί γεωδικτύου. Μεγαλύτερη τιμή της διατμητικής αντοχής παρατηρήθηκε για το γεωσύνθετο αποστράγγισης σε σύγκριση με το γεωδίκτυ, γεγονός που αποδόθηκε στην μεγαλύτερη επιφάνεια επαφής που χαρακτηρίζει το γεωφάσμα του γεωσύνθετου. Σημαντική μείωση της διατμητικής αντοχής παρατηρήθηκε και για τις δύο εξεταζόμενες περιπτώσεις διεπιφανειών για μεγάλες επιβαλλόμενες παραμορφώσεις.

Όπως απέδειξαν οι De and Zimmie (1998) η δυναμική γωνία τριβής της διεπιφάνειας γεωδικτύου με γεωμεμβράνη λείας επιφάνειας σχετίζεται και με τη διεύθυνση του καννάβου του γεωδικτύου σχετικά με τη διεύθυνση της επιβαλλόμενης διάτμησης. Τρεις περιπτώσεις προσανατολισμού του γεωδικτύου εξετάστηκαν: (α) στην εγκάρσια διεύθυνση, (β) στη διαμήκη διεύθυνση, και (γ) παράλληλα. Επιπροσθέτως, δεν φάνηκε να συσχετίζεται η τιμή της δυναμικής γωνίας τριβής με τη συχνότητα της επιβαλλόμενης διέγερσης, αντιθέτως η αύξηση των κύκλων φόρτισης συνέβαλλε στη μείωση της δυναμικής γωνίας τριβής της υπό εξέταση διεπιφάνειας.

### **Γεωδίκτυ με γεωφάσμα**

Οι Bergado et al. (2006) εκτίμησαν τη διατμητική αντοχή διεπιφάνειας HDPE γεωδικτύου με μη-υφασμένα γεωφάσματα. Όπως προέκυψε και για τις διεπιφάνειες γεωμεμβρανών με γεωφάσματα, η διατμητική αντοχή αυξάνει καθώς το πάχος του γεωφάσματος μειώνεται. Η δυναμική γωνία τριβής διεπιφάνειας μη-υφασμένου βελονοδιάτρητου γεωφάσματος επί γεωδικτύου MDPE προσδιορίστηκε από τους De and Zimmie (1998). Η δυναμική γωνία τριβής προέκυψε ότι εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την επιβαλλόμενη ορθή τάση, η οποία μάλιστα ήταν πιο έντονη για την εγκάρσια τοποθέτηση του γεωδικτύου σε σύγκριση με την διαμήκη. Αντιθέτως, ούτε ο αριθμός των



κύκλων φόρτισης ούτε η συχνότητα της επιβαλλόμενης διέγερσης φάνηκε να επηρεάζουν τη διατμητική αντοχή των διεπιφανειών υπό δυναμικές συνθήκες.

### **GCL με γεωμεμβράνη**

Οι Triplett and Fox (2001) εξέτασαν τη διατμητική αντοχή διεπιφανειών HDPE γεωμεμβρανών λείας και τραχείας επιφάνειας επί οπλισμένων (βελονοδιατήρητων) γεωσυνθετικών αργλικών μεμβρανών (GCL). Οι επιφάνειες αστοχίας παρατηρήθηκαν στη διεπιφάνεια γεωμεμβράνης με GCL, ενώ οι διεπιφάνειες γεωμεμβρανών τραχείας επιφάνειας χαρακτηρίζονται από μεγαλύτερη απομείωση της διατμητικής αντοχής κατά την επιβολή μεγάλου μεγέθους μετακινήσεων. Οι Bergado et al. (2006) έπειτα από δοκιμές άμεσης διάτμησης σε διεπιφάνειες HDPE γεωμεμβράνης λείας επιφάνειας με οπλισμένη GCL, υπολόγισαν παρόμοιες τιμές μέγιστης γωνίας τριβής.

### **2.5.3 Συγκεντρωτικά στοιχεία – Προτάσεις**

Η προηγηθείσα διερεύνηση κατέστησε σαφές ότι υπάρχει έντονη ερευνητική δραστηριότητα στον τομέα του προσδιορισμού της διατμητικής αντοχής των διεπιφανειών εδάφους με γεωσυνθετικό ή γεωσυνθετικών μεταξύ τους. Στον Πίνακα 2.7 παρατίθενται τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα που περιλαμβάνουν το εύρος των αναφερόμενων παραμέτρων της διατμητικής αντοχής για κάθε εξεταζόμενη περίπτωση και τις παραμέτρους που επηρεάζουν το πρόβλημα. Παρατηρείται ότι δεν είναι δυνατός ο προσδιορισμός της κρίσιμης επιφάνειας, δηλαδή της διεπιφάνειας με τη χαμηλότερη διατμητική αντοχή, καθώς το προτεινόμενο εύρος από την βιβλιογραφική ανασκόπηση είναι αρκετά ευρύ. Αυτό οφείλεται κυρίως στο πλήθος των παραμέτρων που υπεισέρχονται κατά τον προσδιορισμό της διατμητικής αντοχής και αφορούν τόσο τη πειραματική διαδικασία, όπως π.χ. για την περίπτωση αργίλου με γεωμεμβράνη οι αστράγγιστες ή οι στραγγιζόμενες συνθήκες, όσο και τις μηχανικές ιδιότητες των δύο διαφορετικών υλικών, όπως π.χ. η διατμητική αντοχή του εδάφους, η τραχύτητα της επιφάνειας της γεωμεμβράνης, ο τύπος τους πολυμερούς και το βάρος του γεωυφάσματος.

Σε μια προσπάθεια να περιοριστεί αυτό το εύρος των προτεινόμενων παραμέτρων διατμητικής αντοχής, αλλά και να προσεγγιστεί η κοινή πρακτική θεωρείται αρχικά ότι οι ελάχιστες αναπτυσσόμενες διεπιφάνειες είναι και αυτές που προτείνονται από τους κανονισμούς, δηλαδή: (α) συμπυκνωμένη άργιλος με γεωμεμβράνη, (β) γεωμεμβράνη

με γεωύφασμα, και (γ) γεωύφασμα με κοκκώδες έδαφος. Επιπροσθέτως, θεωρείται ότι η γεωμεμβράνη στεγάνωσης είναι HDPE με πάχος 1.5mm, σύμφωνα με την κοινή πρακτική αλλά και τη συχνότερη χρήση τους συγκριτικά με τις γεωμεμβράνες PVC (Koerner, 1994). Με αυτές τις παραδοχές το εύρος των εξεταζόμενων διεπιφανειών αλλά και των παραμέτρων διατμητικής αντοχής μειώνεται, όπως φαίνεται και στον Πίνακα 2.8.

**Πίνακας 2.7.** Συγκεντρωτικά στοιχεία παραμέτρων διατμητικής αντοχής για τις πιθανές διεπιφάνειες ενός σύνθετου συστήματος στεγάνωσης Χ.Υ.Τ.Α.

| Διεπιφάνεια                        | Παράμετροι                                                                      |                                              | Συνοχή<br>(kPa) | Γωνία<br>τριβής (°) |
|------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|-----------------|---------------------|
|                                    | Υλικό 1                                                                         | Υλικό 2                                      |                 |                     |
| Αργίλος (1) -<br>Γεωμεμβράνη (2)   | διατμητική αντοχή,<br>διαδικασία δοκιμής<br>(αστράγγιστη ή μη )                 | είδος πολυμερούς,<br>τραχύτητα<br>επιφανείας | 0-48            | 6-40                |
| άμμος (1) -<br>Γεωμεμβράνη (2)     | διατμητική αντοχή,<br>σχήμα κόκκων, ορθή<br>τάση                                | είδος πολυμερούς,<br>τραχύτητα<br>επιφανείας |                 | 17-33               |
| χαλίκι (1) -<br>Γεωύφασμα (2)      | διατμητική αντοχή,<br>ορθή τάση                                                 | ύφανση, ορθή τάση                            |                 | 19-42               |
| Γεωύφασμα (1) -<br>Γεωμεμβράνη (2) | μάζα ανά επιφάνεια,<br>είδος ίνας, τύπος<br>ύφανσης, πολυμερές,<br>κυλινδρισμός | είδος πολυμερούς,<br>τραχύτητα<br>επιφανείας | 0-26            | 6-42                |
| Γεωδίκτυο (1) -<br>Γεωύφασμα (2)   | είδος πολυμερούς,<br>διεύθυνση, ορθή τάση                                       | μάζα ανά επιφάνεια,<br>ορθή τάση             |                 | 9-24                |
| Γεωδίκτυο (1) -<br>Γεωμεμβράνη (2) | Είδος πολυμερούς,<br>διεύθυνση                                                  | είδος πολυμερούς,<br>τραχύτητα<br>επιφανείας |                 | 7.5-26              |
| GCL (1) -<br>Γεωμεμβράνη (2)       | τραχύτητα επιφανείας                                                            | είδος πολυμερούς,<br>τραχύτητα<br>επιφανείας |                 | 10-32               |

Παρόλα αυτά θα πρέπει να τονιστεί ότι σε καμία περίπτωση η ανωτέρω ανάλυση δεν πρέπει να αντικαθιστά τον προσδιορισμό των παραμέτρων διατμητικής αντοχής ανά περίπτωση. Όπως άλλωστε προτείνεται από πολλούς ερευνητές (Bergado et al., 2006, Hillman and Stark, 2001, Stark and Poeppel, 1994, και Stark et al., 1996), ο προσδιορισμός των παραμέτρων διατμητικής αντοχής των σχηματιζόμενων

διεπιφανειών πρέπει να γίνεται σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά του έργου και των χρησιμοποιούμενων υλικών. Δηλαδή θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη τόσο οι επιτόπου συνθήκες (π.χ. ορθή τάση), όσο και οι μηχανικές ιδιότητες των επιτόπου εδαφικών και γεωσυνθετικών υλικών.

**Πίνακας 2.8.** Συγκεντρωτικά στοιχεία παραμέτρων διατμητικής αντοχής για τις τρεις κυριότερες διεπιφάνειες ενός σύνθετου συστήματος στεγάνωσης Χ.Υ.Τ.Α.

| Διεπιφάνεια                  | Συνοχή<br>(kPa) | Γωνία τριβής<br>(°) |
|------------------------------|-----------------|---------------------|
| Άργιλος - HDPE Γεωμεμβράνη   | 0-48            | 6-26                |
| χαλίκι - Γεωόφασμα           |                 | 19-42               |
| Γεωόφασμα - HDPE Γεωμεμβράνη | 0-26            | 6-33                |

## 2.6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στις προηγούμενες ενότητες πραγματοποιήθηκε μια εκτενής βιβλιογραφική ανασκόπηση όσον αφορά στο κανονιστικό πλαίσιο που διέπει το σχεδιασμό των Χ.Υ.Τ.Α., την κοινή πρακτική αλλά και τα σύγχρονα ερευνητικά αποτελέσματα που αφορούν στη σεισμική συμπεριφορά των Χ.Υ.Τ.Α., τις βλάβες λόγω σεισμικής καταπόνησης, καθώς και τις μηχανικές παραμέτρους του απορριμματικού υλικού και των διεπιφανειών του σύνθετου συστήματος στεγάνωσης.

Διαπιστώθηκε αρχικά ότι ενώ οι κανονισμοί είναι αρκετά σαφείς όσον αφορά στις τεχνικές προδιαγραφές του Χ.Υ.Τ.Α., δηλαδή την κατασκευή ενός σύνθετου συστήματος στεγάνωσης και ενός συστήματος συλλογής στραγγίσματος και μετά το πέρας λειτουργίας του ενός συστήματος τελικής κάλυψης, δεν παρατηρείται αντίστοιχη αντιμετώπιση για τις διαδικασίες σχεδιασμού. Συγκεκριμένα, εν γένει απαιτούνται συντελεστές ασφαλείας έναντι ευστάθειας πρανών οι οποίοι όμως αφενός δεν είναι ξεκάθαρο ότι αφορούν απορριμματικά πρανή, αφετέρου δε εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την αβεβαιότητα των παραμέτρων διατμητικής αντοχής. Όμως όπως παρατηρήθηκε, η διασπορά των προτεινόμενων παραμέτρων για το απορριμματικό υλικό είναι μεγάλη. Επιπροσθέτως, ενώ απαιτείται ο ασφαλής σχεδιασμός των επιμέρους συστημάτων, δεν προσδιορίζεται ούτε μεθοδολογία σχεδιασμού ούτε ανεκτά όρια αναπτυσσόμενων παραμορφώσεων.

Αντίστοιχη είναι και η αντιμετώπιση του εν λόγω θέματος, της σεισμικής καταπόνησης του συστήματος στεγάνωσης, από την κοινή πρακτική αντισεισμικού σχεδιασμού. Η κοινή πρακτική συνήθως αγνοεί την επίδραση των φαινομένων τοπογραφικής επιδείνωσης προτείνοντας τη διεξαγωγή μονοδιάστατων αναλύσεων κυματικής διάδοσης με την ισοδύναμη γραμμική μέθοδο.

Παρατηρήθηκε επίσης, έντονη ερευνητική δραστηριότητα στον τομέα του προσδιορισμού των παραμέτρων διατμητικής αντοχής του απορριμματικού υλικού, αλλά και των σχηματιζόμενων διεπιφανειών εντός του σύνθετου συστήματος στεγάνωσης. Τα αποτελέσματα της βιβλιογραφικής ανασκόπησης των δημοσιευμένων εργασιών παρουσίασαν μεγάλη διασπορά, καθιστώντας κρίσιμη την σχετική επίδρασή τους στην εκτιμώμενη δυναμική απόκριση και ευστάθεια των Χ.Υ.Τ.Α.

Αντιθέτως, παρατηρήθηκε μειωμένη ερευνητική δραστηριότητα για την εκτίμηση της σεισμικής καταπόνησης του συστήματος στεγάνωσης και τουλάχιστον μέχρι τη συγγραφή της παρούσας διατριβής δεν υφίσταται κάποια εργασία που να πραγματεύεται την καταπόνηση των Χ.Υ.Τ.Α. λόγω επιβολής μόνιμων εδαφικών παραμορφώσεων κατά τη διάρρηξη τεκτονικού ρήγματος. Πιθανολογείται ότι η τελευταία παρατήρηση οφείλεται στις διατάξεις των κανονισμών για τήρηση αποστάσεων ασφαλείας, αν και τελικά κατά τον σεισμό του Chi-Chi (1999) διαπιστώθηκε μετακίνηση σεισμικού ρήγματος σε κοντινή θέση ενός Χ.Υ.Τ.Α. με συνεπαγόμενη ανάπτυξη ικανού μεγέθους μετακινήσεων στα πρανή.

## 2.7 ΑΝΑΦΟΡΕΣ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

- Anderson, R.L., (1995) "Earthquake related damage and landfill performance", in Earthquake Design and Performance of Solid Waste Landfills-Geotechnical special publication No54, ed. M.K. Yegian and W.D.L. Finn, ASCE, New York, 1-16.
- Anderson, R., (2000) "Notes Regarding Infrastructure Performance and Disaster Recovery, Kocaeli, Turkey and Chi-Chi, Taiwan Earthquakes August 17 and September 21, 1999", Partnership 2000, <http://www.ciwmb.ca.gov/Part2000>.
- Augello, A.J., Bray, J.D., Abrahamson, N.A., and Seed, R.B., (1998) "Dynamic properties of solid waste based on back analysis of OII landfill", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 124(3), 211-222.
- Augello, A.J., Matasovic, N., Bray, J.D., Kavazanjian, E. and Seed, R.B., (1995) "Evaluation of solid waste landfill performance during the Northridge earthquake", in Earthquake Design and Performance of Solid Waste Landfills-Geotechnical special publication No54, ed. M.K. Yegian and W.D.L. Finn, ASCE, New York, 17-50.

- Bergado, D.T., Ramana, G.V., Sia, H.I., Varun, (2006) "Evaluation of interface shear strength of composite liner system and stability analysis for a landfill lining system in Thailand", *Geotextiles and Geomembranes* 24, 371-393.
- Biondi G., Lo Grasso, A.S., and Maugeri, M., (2008) "Displacement based analysis of waste landfill cover systems", in *Proceedings of the 4<sup>th</sup> European Geosynthetics Conference*, Scotland, Paper No 133.
- Bray, J.D., and Rathje, E.M., (1998) "Earthquake induced displacements of solid waste landfills", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 124(3), 242-253.
- Bray, J.D., and Repetto, P.C., (1994) "Seismic design considerations for lined solid waste landfills", *Geotextiles and Geomembranes*, 13, 497 - 518.
- Bray, J.D., Augello, A.J., Leonards, G.A., Repetto, P.C., and Byrne R.J., (1995) "Seismic stability procedures for solid - waste landfills", *Journal of Geotechnical Engineering*, 121(2), 139 - 151.
- Bray, J.D., Rathje, E.M., Augello, A.J., and Merry, S.M., (1998) "Simplified seismic design procedure for geosynthetic - lined, solid-waste landfills", *Geosynthetics International*, 5(1-2), 203-235.
- Bray, J.D., Sancio, R.B., Kammerer, A.M., Merry, S., Rodriguez-Marek, A., Khazai, B., Chang, S., Bastani, A., Collins, B., Hausler, E., Dreger, D., Perkins, W.J. and Nykamp, M., (2001) "Some Observations of Geotechnical Aspects of the February 28, 2001, Nisqually Earthquake in Olympia, South Seattle, and Tacoma, Washington", A report sponsored by the National Science Foundation, Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California at Berkeley, University of Arizona, Washington State University, Shannon & Wilson, Inc., and Leighton and Associates.
- Chopra, A.K., and Zhang, L., (1991) "Earthquake-induced base sliding on concrete gravity dams", *Journal of Structural Engineering*, 117 (12), 3698-3719.
- De, A., Zimmie, T.F., (1998) "Estimation of dynamic interfacial properties of geosynthetics", *Geosynthetics International*, 5, 17-39.
- Del Nero, D.E., Corcoran B.W., and Bhatia, S.K., (1995) "Seismic analysis of solid waste landfills", in *Earthquake Design and Performance of Solid Waste Landfills-Geotechnical special publication No54*, ed. M.K. Yegian and W.D.L. Finn (American Society of Civil Engineers, New York), 61-72.
- Dixon, N., and Jones, D.R., (2005) "Engineering properties of municipal solid waste", *Geotextiles and Geomembranes*, 23, 205-233.
- EC, (1999) "On the landfill of waste-Council Directive 1999/31/EC", *Official Journal of the European Communities* L 182, 0001 - 0019.
- Eid, H.T., Stark, T.D., Evans, W.D., and Sherry, P.E., (2000) "Municipal solid waste slope failure. I: Waste and foundation soil properties", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 126(5), 397-407.
- EPA, (1993) "MSW landfill criteria technical manual", Environmental Protection Agency, USA.
- Estrin, D., and Rowe, R.K., (1995) "Landfill design and the regulatory system", *Proceedings of Sardinia '95, International Landfill Symposium*, Cagliari, Italy.

- Fassett, J.B., Leonards, G.A., and Repetto, P.C., (1994) "Geotechnical properties of municipal solid wastes and their use in landfill design", in Waste Tech '94, Landfill technology technical proceedings, Charleston, SC (USA).
- Fishman, K.L., Pal, S., (1994) "Further study of geomembrane/cohesive soil interface shear behavior", *Geotextiles and Geomembranes*, 13 (9), 571-590.
- Gunturi, V.R., and Elgamal, A.-W.M., (1998) "A class of inhomogeneous shear models for seismic analysis of landfills", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 17, 197-209.
- Hillman, R.P., and Stark, T.D., (2001) "Shear strength characteristics of PVC geomembrane-geosynthetic interfaces", *Geosynthetics International*, 8 (2), 135-162.
- Houston, W.N., Houston, S.L., Liu, J.W., Elsayed, A. and Sanders, C.O., (1995) "In-situ testing methods for dynamic properties of MSW landfills", in *Earthquake Design and Performance of Solid Waste Landfills-Geotechnical special publication No54*, ed. M.K. Yegian and W.D.L. Finn, American Society of Civil Engineers, New York, 73-82.
- Idriss, I.M., Fiegel, G., Hudson, M.B., Mundy, P.K., and Herzig, R., (1995) "Seismic response of the Operating Industries Landfill", in *Earthquake Design and Performance of Solid Waste Landfills-Geotechnical special publication No.54*, ed. M.K. Yegian and W.D.L. Finn, American Society of Civil Engineers, New York, 83-118.
- Izgin, M., and Wasti, Y., (1998) "Geomembrane-sand interface frictional properties as determined by inclined board and shear box tests", *Geotextiles and Geomembranes*, 16, 207-219.
- Jones, D.R.V., and Dixon, N., (1998) "Shear strength properties of geomembrane/geotextile interfaces", *Geotextiles and Geomembranes*, 16 (4), 45-71.
- Kavazanjian, E. Jr., Bonaparte, R., Johnson, G.W., Martin, G.R., and Matasovic, N., (1995a) "Hazard analysis of a large regional landfill", in *Earthquake Design and Performance of Solid Waste Landfills-Geotechnical special publication No54*, ed. M.K. Yegian and W.D.L. Finn, American Society of Civil Engineers, New York, 119-141.
- Kavazanjian, E.Jr., and Matasovic, N., (1995) "Seismic analysis of solid waste landfills", in *Proceedings of Geoenvironment 2000-ASCE Geotechnical special publication No.46*, (American Society of Civil Engineers, New York), 1066-1080.
- Kavazanjian, E.Jr., and Matasovic, N., (2001) "Seismic design of mixed and hazardous waste landfills", in *Proceedings of Fourth International conference on recent advances in geotechnical earthquake engineering and soil dynamics and symposium in honor of professor W.D. Liam Finn*.
- Kavazanjian, E.Jr., Matasovic, N. and Bachus, R.C., (1999) "Large diameter static and cyclic laboratory testing of municipal solid waste", in *Proceedings of the seventh international waste management and landfill symposium*, S.Margherita di Pula, Cagliari, Italy.
- Kavazanjian, E.Jr., Matasovic, N., Bonaparte, R., and Schmertmann, G.R., (1995b) "Evaluation of MSW properties for seismic analysis", in *Proceedings of Geoenvironment 2000-ASCE Geotechnical special publication No.46*, American Society of Civil Engineers, New York, 1126-1141.
- Koerner, R.M., Martin, J.P., Koerner, G.R., (1986) "Shear strength parameters between geomembranes and cohesive soils", *Geotextiles and Geomembranes*, 4, 21-30.

- Koerner, R.M., and Soong, T.-Y., (2000) "Leachate in landfills: the stability issues", *Geotextiles and Geomembranes*, 18, 293-309.
- Kölsch, F., (1995) "Material values for some mechanical properties of domestic waste", in *Proceeding of Sardinia '95, Fifth International Landfill Symposium*, S.Margherita di Pula, Cagliari, Italy, 711 - 729.
- Kramer, S.L. and Smith, M.W., (1997) "Modified Newmark model for seismic displacements of compliant slopes", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 123(7), 635-644.
- Krinitzsky, E.L., Hynes, M.E., and Franklin, A.G., (1997) "Earthquake safety evaluation of sanitary landfills", *Engineering Geology*, 46, 143 - 156.
- KYA 114218/97, (1997) "Κατάρτιση πλαισίου Προδιαγραφών και γενικών προγραμμάτων διαχείρισης στερεών αποβλήτων", ΦΕΚ 1016 Β.
- KYA Η.Π. 29407/3508, (2002) "Μέτρα και όροι για την υγειονομική ταφή αποβλήτων", Φ.Ε.Κ. 1572Β/16-12-02.
- Ling, H.I., and Leshchinsky, D., (1997) "Seismic stability and permanent displacement of landfill cover systems", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 123(2), 113-122.
- Machado, S.L., Carvalho, M.F. and Vilar, O.M., (2002) "Constitutive model for municipal solid waste", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 128(11), 940-951.
- Martin, J.P., Koerner, R.M., Whitty, J.E., (1984) "Experimental friction evaluation of slippage between geomembranes, geotextiles and soils", In *Proceedings of the International Conference on Geomembranes*, Denver, CO, June 20-23, 191-196.
- Matasovic, N., and Kavazanjian, E.Jr., (1998) "Cyclic characterization of OII landfill solid waste", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 124(3), 197-210.
- Matasovic, N., Kavazanjian, E. Jr. and Anderson, R., (1998a) "Performance of solid waste landfills in earthquakes", *Earthquake Spectra* 14(2), 319-334.
- Matasovic, N., Kavazanjian, E.Jr., and Giroud, J.P., (1998b) "Newmark seismic deformation analysis for geosynthetic covers", *Geosynthetics International*, 5, 237-264.
- Matasovic, N., Kavazanjian, E.Jr., De, A., and Dunn, J., (2006) "CPT based seismic stability assessment of hazardous waste site", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 26, 201-208.
- Morochnik, V., Bardet, J.P., and Hushmand, B., (1998) "Identification of dynamic properties of OII landfill", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 124(3), 186-196.
- Newmark, N.M., (1965) "Effect of earthquakes on dams and embankments", *Geotechnique*, 15(2), 139-160.
- Palaypayon, M., and Ohta, H., (2007) "Estimation of shear strength parameters of municipal solid waste in landfills", Report submitted in participation to the JSPS Core University Program Group 3.
- Psarropoulos, P.N., Tsompanakis, Y., and Karabatsos, Y., (2007) "Effects of local site conditions on the seismic response of municipal solid waste landfills", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 27, 553 - 563.
- Rathje, E.M., and Bray, J.D., (2001) "One- and two-dimensional seismic analysis of solid-waste landfills", *Canadian Geotechnical Journal*, 38, 850-862.

- Repetto, P., and Bray, J.D., (1992) "Considerations for seismic analysis of landfills", Workshop of the Technical committee on foundation performance during earthquakes and its influence on building codes, Mexico.
- Rix G.J. (1998) "Dynamic properties of municipal solid waste landfills for site response analysis".
- Schnabel, P., Lysmer, J., and Seed, H.B., (1972) "SHAKE: A computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites", Report No. EERC 72-2, Earthquake Engineering Research Centre, University of California at Berkeley.
- Sêco e Pinto, P.S., (2004) "Dynamic analysis of solid waste landfills and lining systems", in Recent advances in Earthquake Geotechnical Engineering and Microzonation, ed. A. Ansal, 267 – 284.
- Seed, R.B., Mitchell, J.K., Seed, H.B., (1990) "Kettleman Hills Waste Landfill Slope Failure. II: Stability analysis", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 116 (4), 669-691.
- Sharma, H., and Lewis, S.P., (1994) "Waste containment systems, waste stabilization and landfills: design and evaluation", John Wiley & Sons, Inc., USA.
- Shewbridge, S.E., (1996) "Yield acceleration of lined landfills", Journal of Geotechnical Engineering, 122(2), 156-158.
- Singh, M.K., (2008) "Characterization of stress-deformation behavior of municipal solid waste", Dissertation, Doctor of Philosophy, Department of Civil and Geological Engineering, University of Saskatchewan, Saskatoon, Canada.
- Singh, S. and Murphy, B., (1990) "Evaluation of the Stability of Sanitary Landfills", in Geotechnics of Waste Fills – Theory and Practice, eds. A. Landya and G.D. Knowles (Philadelphia: American Society for Testing and Materials), 240-258.
- Singh, S., and Sun, J.I., (1995) "Seismic evaluation of Municipal Solid waste landfills", in Proceedings of Geoenvironment 2000-ASCE Geotechnical special publication No.46, (American Society of Civil Engineers, New York), 1081-1096.
- Stark, T.D., and Poeppel, A.R., (1994) "Landfill liner interface strengths from torsional-ring-shear tests", Journal of Geotechnical Engineering, 120(3), 597 – 615.
- Stark, T.D., Williamson, T.A., Eid, H.T., (1996) "HDPE Geomembrane/Geotextile interface shear strength", Journal of Geotechnical Engineering, 122 (3), 197-203.
- Thusyanthan, I., Madabhushi, G., Singh, S., Haigh, S., and Brennan A., (2004) "Seismic behaviour of municipal solid waste (MSW) landfills", in Proceedings of the 13<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, Canada, Paper No. 2702.
- Thusyanthan, N.I., Madabhushi, S.P.G., and Singh, S., (2007) "Tension in geomembranes on landfill slopes under static and earthquake loading-Centrifuge study", Geotextiles and Geomembranes, 25, 78-95.
- Triplett, E.J., and Fox, P.J., (2001) "Shear strength of HDPE geomembrane/geosynthetic clay liner interfaces", Journal of Geotechnical and geoenvironmental engineering, 127(6), 543-552.
- Vaid, Y.P., and Rinne, N., (1995) "Geomembrane coefficients of interface friction", Geosynthetics International, 2(1), 309-325.
- Vilar, O.M., and Carvalho, M.F., (2005) "Shear strength and consolidation properties of mynicipal solid waste", International Workshop Hydro-Physico-Mechanics of landfills, Grenoble, France.



- Vucetic, M., and Dobry, R., (1991) "Effect of soil plasticity on cyclic response", *Journal of Geotechnical Engineering*, 117(1), 89-107.
- Wasti, Y, and Ozduzgun, Z.B., (2001) "Geomembrane - geotextile interface shear properties as determined by inclined board and direct shear tests", *Geotextiles and Geomembranes*, 19, 45 - 57.
- Westermo, B., and Udwadia, F., (1983) "Periodic response of a sliding oscillator system to harmonic excitation", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 11, 135-146.
- Yegian M.K., Yee, Z.Y., and Harb, J.N., (1995) "Seismic response of geosynthetic/soil systems", in *Proceedings of Geoenvironment 2000-ASCE Geotechnical special publication No.46*, (American Society of Civil Engineers, New York), 1113-1125.
- Yegian, M.K., and Harb, J.N. (1995) "Slip displacements of geosynthetic systems under dynamic excitation", in *Earthquake Design and Performance of Solid Waste Landfills-Geotechnical special publication No.54*, ed. M.K. Yegian and W.D.L. Finn (American Society of Civil Engineers, New York), 212-235.
- Yegian, M.K., and Kadakal, U., (1998) "Geosynthetic interface behaviour under dynamic loading", *Geosynthetics International*, 5 (1-2), 1-16.
- Yegian, M.K., and Lahlaf, A.M., (1992) "Dynamic interface shear strength properties of geomembranes and geotextiles", *Journal of Geotechnical Engineering*, 118 (5), 760-778.
- Yegian, M.K., Harb, J.N., Kadakal, U., (1998) "Dynamic response analysis procedure for landfills with geosynthetic liners", *Journal of Geotechnical Engineering*, 124 (10), 1027-1033.
- Zekkos, D.P., (2005) "Evaluation of static and dynamic properties of municipal solid waste", Dissertation, Doctor of Philosophy, Department of Civil and Environmental Engineering, University of California, Berkeley, California, USA.
- Zhu, X.-R., Jin, J.-M. and Fang, P.-F., (2003) "Geotechnical behaviour of the MSW in Tianziling landfill", *Journal of Zhejiang University* 4(3), 324-330.



### Καταπόνηση Χ.Υ.Τ.Α. λόγω ενεργοποίησης υποκείμενου ρήγματος

#### 3.1 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

Η σεισμική καταπόνηση οποιασδήποτε κατασκευής μπορεί να προκύψει ως αποτέλεσμα μίας ή και των δύο πρωτογενών συνεπειών εκδήλωσης ενός σεισμικού γεγονότος, δηλαδή της μετακίνησης του ενεργού ρήγματος και της διάδοσης των σεισμικών κυμάτων. Η πρώτη σχετίζεται με την ανάπτυξη μόνιμων εδαφικών παραμορφώσεων που προκαλούνται λόγω της διάδοσης της τεκτονικής διάρρηξης. Σε αρκετούς σύγχρονους, αλλά και παλαιότερους σεισμούς, έχει παρατηρηθεί ότι πολλές κατασκευές, όπως για παράδειγμα αγωγοί, γέφυρες, επιχώματα αλλά και κτιριακά έργα, εμφανίζουν αυξημένη τρωτότητα έναντι μεγάλων επιβαλλόμενων μετακινήσεων οι οποίες αναπτύσσονται κατά τη διάρρηξη ενός ρήγματος.

Πιο συγκεκριμένα, η δυσμενής επίδραση του ρήγματος οριζόντιας ολίσθησης, που ενεργοποιήθηκε κατά τον σεισμό του San Francisco (1906, Καλιφόρνια) σε αγωγούς ύδρευσης, επιχώματα, φράγματα και κτιριακά έργα έχει αναλυθεί από τους Bray and Kelson (2006). Βάσει παρατηρήσεων πεδίου του προαναφερθέντος σεισμού αναφέρεται ότι, τα επιχώματα μικρότερου ύψους αναμένεται να παρουσιάσουν πιο έντονες μόνιμες παραμορφώσεις εν συγκρίσει με τα αντίστοιχα μεγαλύτερου ύψους. Εκτός από τα στοιχεία για την επιφανειακή εκδήλωση του ρήγματος οριζόντιας ολίσθησης κατά τον σεισμό Landers (1992, Καλιφόρνια) που παρατίθενται από τον Bray (2001), αναφέρεται επιπροσθέτως η κατάρρευση πολλών κτιριακών έργων, αλλά και βλάβες σε γέφυρες λόγω των επιβαλλόμενων μετακινήσεων ρήγματος κατά τους σεισμούς Kocaeli και Duzce (1999, Τουρκία).

Έπειτα από τον σεισμό του Kocaeli, ο οποίος προκλήθηκε από διάρρηξη ρήγματος οριζόντιας ολίσθησης (Ανατολίας), παρατηρήθηκαν επίσης επιφανειακές παραμορφώσεις κανονικής διάρρηξης, οι οποίες αφενός προκάλεσαν αστοχίες σε κτιριακές κατασκευές αφετέρου ανέδειξαν την ικανοποιητική συμπεριφορά τους σε άλλες περιπτώσεις (Anastasopoulos and Gazetas, 2007). Η αντικρουόμενη αυτή παρατήρηση αποδόθηκε από τους συγγραφείς κυρίως στον τύπο της θεμελίωσης και τη δυσκαμψία της κατασκευής, καθώς και τη σχετική θέση της κατασκευής ως προς τη διάδοση της διάρρηξης. Οι διαφορετικοί τύποι εδαφικής παραμόρφωσης που αναπτύχθηκαν κατά μήκος του ανάστροφου ρήγματος Chelungpu κατά τον σεισμό του Chi-Chi (1999, Ταϊβάν) εξετάστηκαν από τους Kelson et al. (2001). Στα γενικά χαρακτηριστικά της επιφανειακής εκδήλωσης του ρήγματος αναφέρονται η μικρή έως ανύπαρκτη παραμόρφωση του αμετακίνητου τεμάχους του ρήγματος, η οριζόντια εξάπλωση του εδάφους με τη συνεπαγόμενη κάλυψη της αιχμής του αμετακίνητου τεμάχους κατά τη συμπίεση του κινούμενου τεμάχους και η δημιουργία δευτερογενών κανονικών ή ανάστροφων ρηγμάτων και κατακρημνισμάτων. Επιπλέον, παρατηρήθηκε ότι οι βλάβες σε κτιριακά έργα εντοπιζόνταν κυρίως σε απόσταση 5-10m από τη θέση του ίχνους του ρήγματος πριν τη διάρρηξη και συσχετιζόνταν με την εδαφική παραμόρφωση (κλίση και κατακόρυφη μετακίνηση) που αναπτύχθηκε κατά την ανάδυση του ρήγματος.

Ένα από τα πιο σημαντικά θέματα που ανακύπτουν σε σχέση με την τεκτονική διάρρηξη είναι, ο προσδιορισμός των χαρακτηριστικών της διάδοσής τους εντός των επιφανειακών εδαφικών αποθέσεων. Η ερευνητική δραστηριότητα σε αυτό το πεδίο υπήρξε αρκετά έντονη και βασίζεται στην εφαρμογή κυρίως τριών μεθοδολογιών: (α) μελέτες βασιζόμενες σε παρατηρήσεις ελεύθερου πεδίου, (β) εργαστηριακά πειράματα μικρής κλίμακας και σε φυγοκεντριστή, και (γ) αριθμητικές αναλύσεις. Σημαντικά ευρήματα έχουν βοηθήσει στην κατανόηση του μηχανισμού διάδοσης των ρηγμάτων, ενώ οι κυριότερες παράμετροι που επηρεάζουν τη συμπεριφορά αυτή σχετίζονται με τα χαρακτηριστικά του ρήγματος (τύπος, γωνία βύθισης και μέγεθος της μετακίνησης) και τις μηχανικές ιδιότητες του εδάφους (τύπος εδάφους, γωνία εσωτερικής τριβής και πάχος του εδαφικού σχηματισμού).

Όσον αφορά τον τύπο του ρήγματος, εργασίες που βασίστηκαν σε παρατηρήσεις πεδίου (Bray et al., 1994a) αναφέρουν ότι τα ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης διαδίδονται κατακόρυφα εντός της εδαφικής στρώσης και οι σχετικές μετακινήσεις περιορίζονται σε

μικρού εύρους ζώνη. Οι παρατηρήσεις πεδίου έπειτα από τον σεισμό του San Fernando (1906), που αναφέρονται από τους Bray and Kelson (2006), συνηγορούν επίσης σε αυτήν τη μορφή εδαφικής παραμόρφωσης, τονίζοντας παράλληλα την επίδραση του είδους των επιφανειακών εδαφικών υλικών στο εύρος της ζώνης ανάπτυξης των παραμορφώσεων. Επίσης, έχει παρατηρηθεί ότι στα ανάστροφα ρήγματα η γωνία διάδοσης μειώνεται κοντά στην επιφάνεια, το αμετακίνητο τέμαχος δεν εμφανίζει εδαφικές παραμορφώσεις, ενώ οι επιφανειακές παραμορφώσεις του κινούμενου τεμάχους, λόγω της κάμψης του προς το αμετακίνητο, μπορεί να είναι σημαντικές (Bray et al., 1994a). Στα κανονικά ρήγματα η κλίση αυξάνει κατά τη διάδοση εντός της εδαφικής στρώσης ακολουθώντας σχεδόν κατακόρυφη πορεία, ενώ όταν η γωνία της διάρρηξης είναι μικρή και το έδαφος σχετικά σφιγρό, αναπτύσσεται μία δευτερεύουσα επιφάνεια αστοχίας, σχηματίζοντας ένα «κατακρήμνισμα» στην επιφάνεια (Bray et al., 1994a και Lade et al., 1984).

Τα τελευταία συμπεράσματα συμφωνούν και με τα αποτελέσματα πειραμάτων μικρής κλίμακας σε αμμώδη εδάφη (χαλαρή και πυκνή άμμο) των Cole and Lade (1984). Στην εργασία αυτή προτείνεται επιπροσθέτως μία συσχέτιση του λόγου της απόστασης της επιφανειακής εκδήλωσης του ρήγματος από το ίχνος του προς το πάχος της εδαφικής στρώσης ( $W/H$ ), συναρτήσεως της γωνίας βύθισης του ρήγματος. Τα αποτελέσματα πειραμάτων μικρής κλίμακας των Lin et al. (2006) για ανάστροφα ρήγματα συγκρίνονται ικανοποιητικά με την προαναφερθείσα συσχέτιση. Επιπλέον, επισημαίνεται από τους Cole και Lade ότι μεγαλύτερη σχετική μετακίνηση (ως προς το πάχος της εδαφικής στρώσης) απαιτείται για την ανάδυση ενός ανάστροφου ρήγματος συγκριτικά με ένα κανονικό ρήγμα στην επιφάνεια.

Στο ίδιο συμπέρασμα κατέληξαν έπειτα από αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων και οι Duncan and Lefebvre (1983), αντιστοιχίζοντας την παθητική και ενεργητική αντίσταση του εδάφους με τη διάδοση του ανάστροφου και του κανονικού ρήγματος, αντίστοιχα. Οι Johansson and Konagai (2006), έπειτα από αξονο-συμμετρικά πειράματα για ρήγμα  $90^\circ$ , συμπεραίνουν ότι μεγαλύτερη μετακίνηση απαιτείται για την ανάδυση του ρήγματος εντός κορεσμένης άμμου σε σχέση με την αντίστοιχη της ξηρής. Όσον αφορά στο πάχος της εδαφικής στρώσης, οι Lee et al. (2004) διαπίστωσαν ότι για μικρές τιμές της παραμέτρου (έως 60cm) ο λόγος  $W/H$  μειώνεται αυξανόμενου του πάχους της εδαφικής στρώσης, ενώ αντιθέτως καμία επίδραση δεν παρατηρείται από τα

αποτελέσματα πειραμάτων σε φυγοκεντριστή τα οποία αντιπροσωπεύουν εδαφικές στρώσεις πάχους μεγαλύτερου από 5m.

Ιδιαίτερα διαδεδομένη είναι και η χρήση αριθμητικών μεθόδων για την εξέταση του μηχανισμού της σεισμικής διάρρηξης. Οι δημοσιευμένες εργασίες με χρήση είτε της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων (Bray et al., 1994b, Lin et al., 2006 και Anastasopoulos et al., 2007), είτε της μεθόδου των πεπερασμένων διαφορών (Loukidis and Bouckovalas, 2001 και Papadimitriou et al., 2007) έχουν αποδείξει ότι η σωστή εφαρμογή τους απαιτεί την ικανοποιητική προσομοίωση της μη-γραμμικής συμπεριφοράς του εδάφους, πυκνή διακριτοποίηση και ικανό μέγεθος καννάβου για την αποφυγή της επίδρασης των συνόρων. Στον αντίποδα, μη ρεαλιστικά αποτελέσματα προέκυψαν από τις πρώιμες αναλύσεις των Scott and Schoustra (1974) που χρησιμοποίησαν το τροποποιημένο κριτήριο Von Mises για την προσομοίωση της μη γραμμικής συμπεριφοράς του εδάφους.

Οι Bray et al. (1994b), αφού επαλήθευσαν την αριθμητική μεθοδολογία τους με πειράματα μικρής κλίμακας, απέδειξαν ότι η διάδοση ανάστροφων ρηγμάτων σε αργιλικά εδάφη συνοδεύεται από κάμψη της επιφάνειας του ανερχόμενου τεμάχους προς το κατερχόμενο και επιπλέον ότι το ύψος της αναπτυσσόμενης ζώνης διάτμησης εξαρτάται από την τιμή της παραμόρφωσης αστοχίας. Πειράματα μικρής κλίμακας χρησιμοποίησαν και οι Lin et al. (2006) για την επιβεβαίωση της ακρίβειας της αριθμητικής μεθοδολογίας τους, με την τελευταία να υπολογίζει λίγο μεγαλύτερες επιφανειακές κλίσεις από τις αντίστοιχες τιμές των πειραμάτων. Η παραμετρική διερεύνηση της διάδοσης ανάστροφων ρηγμάτων σε αμμώδη εδάφη ανέδειξε την σημαντική επίδραση της γωνίας διαστολικότητας και του μέτρου ελαστικότητας του εδάφους επί του εξεταζόμενου προβλήματος. Οι Anastasopoulos et al. (2007), αφού επαλήθευσαν τη διαδικασία της αριθμητικής προσομοίωσής τους με πειράματα σε φυγοκεντριστή, συμπέραναν ότι απαιτούνται μικρότερες σχετικές μετακινήσεις για τη διάδοση της σεισμικής διάρρηξης στην περίπτωση κανονικού ρήγματος ή στην περίπτωση πυκνής άμμου από ότι στην περίπτωση ανάστροφου ρήγματος ή χαλαρής άμμου, αντίστοιχα σε συμφωνία με τις παρατηρήσεις των Cole και Lade.

Το κριτήριο Mohr-Coulomb εφάρμοσαν οι Papadimitriou et al. (2007) για την προσομοίωση της ελαστο-πλαστικής συμπεριφοράς του εδάφους. Η εκτενής παραμετρική διερεύνηση που διεξήχθη έδειξε ότι στα ανάστροφα ρήγματα η

απαιτούμενη σχετική μετακίνηση για την επιφανειακή εκδήλωση του ρήγματος αυξάνει καθώς μειώνεται η γωνία βύθισης του ρήγματος, και ότι τα αντίστοιχα μεγέθη σε αργίλους είναι κατά πολύ μικρότερα από ότι σε πυκνές άμμους και είναι συγκρίσιμα με τα αποτελέσματα χαλαρών άμμων. Επίσης, οι συγγραφείς εξετάζοντας την επίδραση του πάχους της εδαφικής στρώσης, παρατήρησαν ότι τα αποτελέσματα της διάδοσης ρήγματος εντός μη συνεκτικού εδάφους εξαρτώνται από την παράμετρο αυτή, και μάλιστα τόσο το κανονικοποιημένο (με το πάχος της εδαφικής στρώσης) εύρος της ζώνης σημαντικών παραμορφώσεων ( $W/H$ ) όσο και η κανονικοποιημένη (με το πάχος της εδαφικής στρώσης) μετακίνηση του ρήγματος για την επιφανειακή εκδήλωση του ρήγματος ( $\delta/H$ ) αυξάνουν, καθώς αυξάνει το πάχος της εδαφικής στρώσης.

Εν γένει, ο πιο διαδεδομένος τρόπος αντιμετώπισης των δυσμενών συνεπειών της τεκτονικής διάρρηξης είναι η αποφυγή της διασταύρωσης με αυτήν ή η τήρηση κάποιων αποστάσεων ασφαλείας από το επιφανειακό ίχνος της. Όμως, αφενός η πρακτική αυτή μπορεί να εμποδίσει την ανάπτυξη περιοχών όπου υφίστανται ήδη χαρτογραφημένα ρήγματα, και αφετέρου σε αστικές περιοχές είναι πιθανό να μην είναι εφικτή η αποφυγή της γειτνίασης με ενεργό ρήγμα. Τη δυσχέρεια εφαρμογής αυτής της μεθόδου αυξάνουν οι αβεβαιότητες στον εντοπισμό των ενεργών ρηγμάτων. Για τον λόγο αυτό θα πρέπει να αναπτυχθούν και να επαληθευθούν τεχνικές αντιμετώπισης της ανάπτυξης μόνιμων εδαφικών παραμορφώσεων. Υπό αυτό το πρίσμα, διερευνήθηκε η χρήση εδαφικού επιχώματος οπλισμένου ή μη για την αντιμετώπιση της διάδοσης ρήγματος (Bray, 2001). Οι αριθμητικές αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων έδειξαν ότι ο γεωσυνθετικός οπλισμός συνετέλεσε στην μείωση των επιφανειακών παραμορφώσεων και την εξάπλωσή τους σε πιο ευρεία ζώνη.

Ειδικά για τους Χ.Υ.Τ.Α. ο αντισεισμικός σχεδιασμός απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή, κυρίως λόγω των δυσμενών περιβαλλοντικών και κοινωνικών επιπτώσεων που συνεπάγεται η εκδήλωση μίας ενδεχόμενης αστοχίας. Η επισκόπηση των κανονιστικών διατάξεων στο Κεφάλαιο 2 (π.χ. ΕΡΑ, 1993), έδειξε ότι η αντιμετώπιση της γειτνίασης με ενεργό ρήγμα ανάγεται σε πρόβλημα χωροθέτησης της γεωκατασκευής, θέτοντας ως όριο την απόσταση των 60m από ρήγμα της ολοκαινικής περιόδου. Όμως, εκτός των προαναφερθέντων προβλημάτων σχετικά με την τήρηση αποστάσεων ασφαλείας, στη χωροθέτηση ενός Χ.Υ.Τ.Α. απαιτείται η συνεκτίμηση πολλών παραγόντων (π.χ. πολιτιστικών, τοπογραφικών, γεωλογικών, υδρογεωλογικών και κοινωνικό-οικονομικών), καθιστώντας πιθανώς δυσχερή την ταυτόχρονη εκπλήρωση της

απαίτησης της μη γειτνίασης με ενεργό ρήγμα. Είναι συνεπώς ανάγκη να διερευνηθεί η επίδραση της ανάπτυξης μετακινήσεων ενεργού ρήγματος σε μεγάλης κλίμακας κατασκευές όπως είναι οι Χ.Υ.Τ.Α., καθώς και η αποτελεσματικότητα της εφαρμογής πρακτικών μεθόδων προστασίας των κατασκευών αυτών έναντι καταπόνησης λόγω τεκτονικής διάρρηξης.

### **3.2 ΔΙΑΔΟΣΗ ΡΗΓΜΑΤΟΣ ΕΝΤΟΣ ΤΗΣ ΑΠΟΡΡΙΜΜΑΤΙΚΗΣ ΜΑΖΑΣ**

Όπως προέκυψε από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση η χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων για τη διερεύνηση του μηχανισμού διάδοσης ενός τεκτονικού ρήγματος χρήζει ιδιαίτερης προσοχής. Προκειμένου να διαπιστωθεί η κατά το δυνατόν ακριβής εφαρμογή της, εξετάστηκε στο πλαίσιο της παρούσας διερεύνησης αρχικά η συσχέτιση των αποτελεσμάτων της μεθόδου με τα αντίστοιχα αποτελέσματα που αναφέρονται στη βιβλιογραφία. Επιπλέον, μελετήθηκε η επίδραση των κυριότερων εκ των παραμέτρων προσομοίωσης στη διάδοση ρήγματος εντός της απορριμματικής μάζας. Ακολούθως, διεξήχθησαν παραμετρικές αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων οι οποίες συνέβαλλαν στον προσδιορισμό της επίδρασης του τύπου του ρήγματος, της γωνίας βύθισης και της σχετικής θέσης του ίχνους του ρήγματος, στο μηχανισμό ανάπτυξης των μόνιμων παραμενουσών παραμορφώσεων. Σε αυτό το σημείο πρέπει να επισημανθεί ότι, τα ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης δεν περιλαμβάνονται στην παρούσα διερεύνηση, καθώς από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση προέκυψε ότι εν γένει σχετίζονται με παραμορφώσεις περιορισμένου εύρους. Επίσης, στην παραμετρική διερεύνηση δεν συμπεριλήφθηκε το πάχος του απορριμματικού όγκου, δεδομένου ότι τόσο πειραματικά αποτελέσματα (Lee et al., 2004) όσο και αποτελέσματα αριθμητικών αναλύσεων συνεκτικών εδαφών (Papadimitriou et al., 2007) συγκλίνουν στο συμπέρασμα της κανονικοποίησης των επιφανειακών παραμορφώσεων ως προς το πάχος της εδαφικής στρώσης (ειδικά για μεγάλες τιμές της παραμέτρου).

#### **3.2.1 Επαλήθευση της αριθμητικής προσομοίωσης**

Με σκοπό να ελεγχθεί η ακρίβεια των αποτελεσμάτων της αριθμητικής προσομοίωσης, χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS (2004) και αναλύθηκε η περίπτωση της διάδοσης ρήγματος σε μία εδαφική στρώση υπό «μονοδιάστατες» συνθήκες ελευθέρου πεδίου. Το αριθμητικό προσομοίωμα διακριτοποιήθηκε με τετραπλευρικά στοιχεία επίπεδης παραμόρφωσης μεγέθους



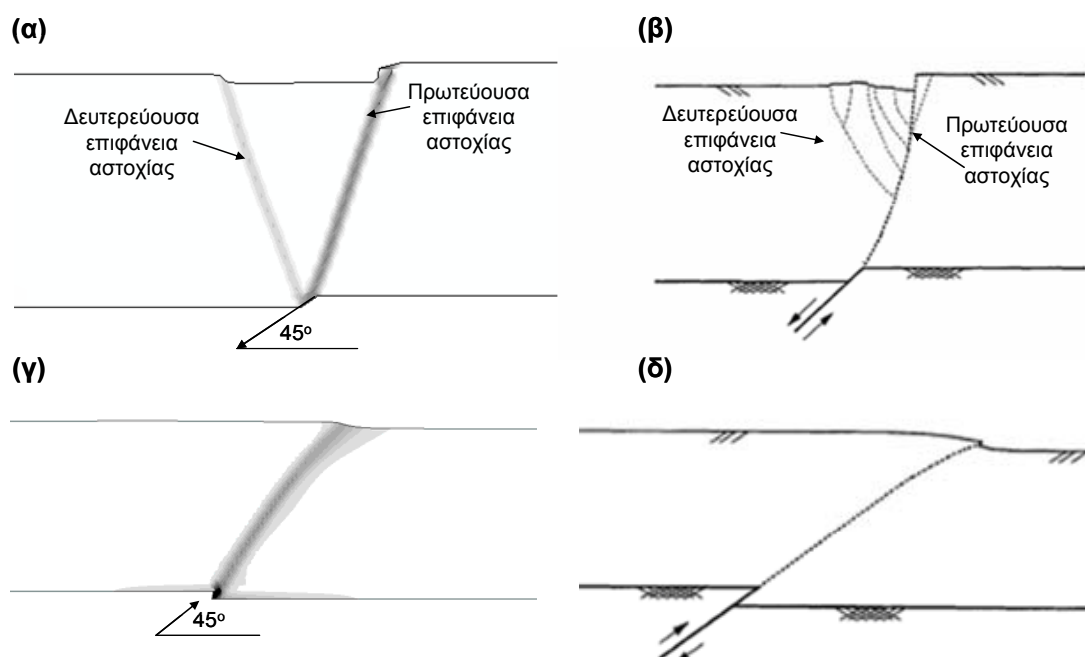
0.5m x 0.5m στο κεντρικό τμήμα, ενώ στα ακραία τμήματα χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία μεγέθους 0.5m x 1.0m. Οι διαφορετικές ζώνες διακριτοποίησης αποσκοπούν στην ακριβέστερη προσομοίωση χωρίς την ταυτόχρονη αύξηση του υπολογιστικού κόστους. Επιπλέον, για το μέγεθος του καννάβου τηρήθηκε η αναλογία 1:4 (V:H), η οποία εν γένει θεωρείται αποδεκτή και από αντίστοιχες αριθμητικές αναλύσεις της βιβλιογραφίας προκειμένου να αποφευχθεί η επίδραση των συνόρων της εδαφικής στρώσης (Bray et al., 1994b, Anastasopoulos et al., 2007, και Papadimitriou et al., 2007).

Η προσομοίωση της μη-γραμμικής συμπεριφοράς του εδάφους πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του κριτηρίου Mohr-Coulomb, ενώ με την εφαρμογή μίας κατάλληλης υπορουτίνας στο λογισμικό ABAQUS (2004) προσομοιώθηκε η χαλάρωση του εδαφικού υλικού συναρτήσει της αναπτυσσόμενης πλαστικής διατμητικής παραμόρφωσης. Πιο συγκεκριμένα, ο εδαφικός σχηματισμός συνίσταται από ομοιογενές στρώμα πυκνής άμμου με γωνία εσωτερικής τριβής  $50^\circ$  και γωνία διαστολικότητας  $20^\circ$ , ενώ οι απομένουσες τιμές τους είναι ίσες προς  $30^\circ$  και  $0^\circ$  αντίστοιχα. Οι απομένουσες τιμές των γωνιών εσωτερικής τριβής και διαστολικότητας θεωρήθηκε ότι αναπτύσσονται για τιμές της πλαστικής διατμητικής παραμόρφωσης μεγαλύτερες ή ίσες με 5%. Όσον αφορά τα χαρακτηριστικά του ρήγματος, διερευνώνται οι περιπτώσεις κανονικού και ανάστροφου ρήγματος με γωνία κλίσης  $45^\circ$  και μέγιστη κατακόρυφη μετακίνηση κατά μέγιστο ίση με 1m και για τις δύο περιπτώσεις ρηγμάτων.

Στο Σχήμα 3.1.α απεικονίζεται η επιφάνεια αστοχίας ενός κανονικού ρήγματος εντός του εδαφικού σχηματισμού, όπως προσδιορίστηκε από τις ισομεγέθεις καμπύλες των πλαστικών παραμορφώσεων. Παραπλεύρως (Σχήμα 3.1.β) παρουσιάζεται και η μορφή αστοχίας η οποία αναφέρεται για κανονικά ρήγματα μικρής κλίσης και δύσκαμπτα εδάφη έπειτα από παρατηρήσεις πεδίου (Bray et al., 1994a). Συμπεραίνεται ότι από τα αποτελέσματα της αριθμητικής ανάλυσης προσδιορίζεται με ικανοποιητική ακρίβεια η μορφή της επιφάνειας αστοχίας, κυρίως όσον αφορά την ανάπτυξη δευτερεύουσας επιφάνειας αστοχίας και του κατακρημνίσματος στην επιφάνεια του εδάφους. Επίσης, η κανονικοποιημένη μετακίνηση ( $\delta/H$ ) που απαιτείται για την ανάδυση του ρήγματος στην επιφάνεια υπολογίστηκε περίπου ίση με 0.8%, τιμή η οποία συμφωνεί με τα αποτελέσματα των Cole and Lade (1984) και των Lee et al. (2004), ενώ οι γωνίες πρόσπτωσης των επιφανειών αστοχίας στην επιφάνεια, όπως προέκυψαν από την αριθμητική ανάλυση, είναι μεγαλύτερες. Εν γένει, η μορφή της αστοχίας προσεγγίστηκε με ικανοποιητική ακρίβεια και επιπλέον η υπολογισθείσα παραμόρφωση

της επιφάνειας είναι ποιοτικά συγκρίσιμη με τα αποτελέσματα άλλων εργασιών βασισμένων σε αριθμητικές αναλύσεις, οι οποίες αναφέρονται στη διάδοση κανονικού ρήγματος  $45^\circ$  σε στρώμα πυκνής άμμου (Anastasopoulos et al., 2007 και Papadimitriou et al., 2007).

Αντίστοιχα ικανοποιητικά αποτελέσματα προέκυψαν και από την αριθμητική επίλυση της διάδοσης ανάστροφου ρήγματος, όπως διαπιστώνεται από τη σύγκριση των Σχημάτων 3.1.γ και 3.1.δ. Πιο συγκεκριμένα, η μορφή της επιφάνειας αστοχίας, η οποία προσδιορίστηκε βάσει των υπολογισθεισών πλαστικών παραμορφώσεων (Σχήμα 3.1.γ) συμφωνεί ποιοτικά με την προτεινόμενη έπειτα από παρατηρήσεις πεδίου (Σχήμα 3.1.δ). Επιπλέον, η απαιτούμενη παραμόρφωση για την ανάδυση του ρήγματος ( $\delta/H \approx 2\%$ ) είναι συγκρίσιμη με τα αντίστοιχα πειραματικά αποτελέσματα (Cole and Lade, 1984 και Lee et al., 2004). Τέλος, και η υπολογισθείσα παραμόρφωση της επιφάνειας είναι ποιοτικά συγκρίσιμη με τα αποτελέσματα παρεμφερών αριθμητικών αναλύσεων (Anastasopoulos et al., 2007 και Papadimitriou et al., 2007).

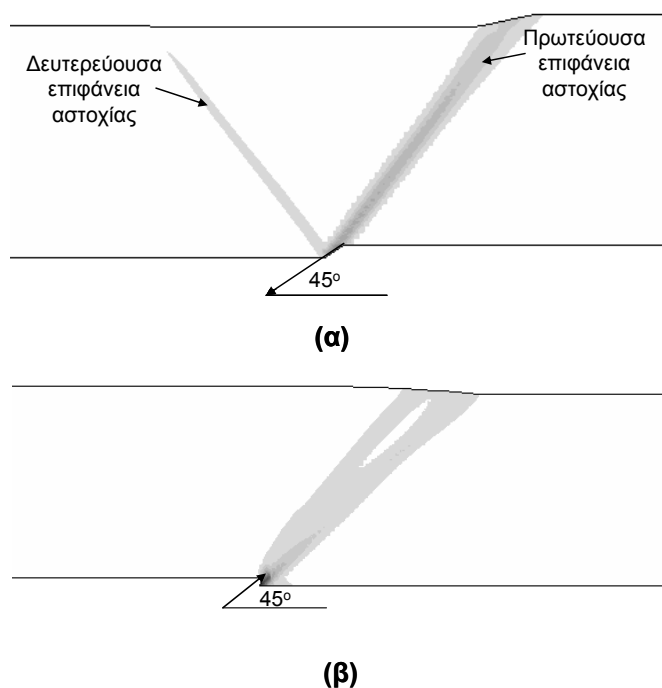


**Σχήμα 3.1.** Επιφάνειες αστοχίας λόγω διάδοσης ρήγματος εντός πυκνής άμμου όπως προέκυψαν για: (α) κανονικό ρήγμα σύμφωνα με τα αποτελέσματα της παρούσας αριθμητικής ανάλυσης, (β) κανονικό ρήγμα σύμφωνα με παρατηρήσεις πεδίου των Bray et al. (1994a), (γ) ανάστροφο ρήγμα σύμφωνα με τα αποτελέσματα της παρούσας αριθμητικής ανάλυσης, και (δ) ανάστροφο ρήγμα σύμφωνα με παρατηρήσεις πεδίου των Bray et al. (1994a).

Το πρόβλημα της διάδοσης ρήγματος υπό «μονοδιάστατες» συνθήκες ελευθέρου πεδίου εξετάστηκε στη συνέχεια και για την περίπτωση απορριμματικού υλικού. Όπως

έγινε σαφές από την εκτενή βιβλιογραφική ανασκόπηση του Κεφαλαίου 2, αφενός η σχέση τάσεων – παραμορφώσεων του απορριμματικού υλικού δεν χαρακτηρίζεται από χαλάρωση αφετέρου στην περιβάλλουσα αστοχίας εκτός από τη γωνία εσωτερικής τριβής συμμετέχει και η συνοχή. Για τον λόγο αυτό για τη προσομοίωση της μη-γραμμικής συμπεριφοράς του απορριμματικού υλικού θεωρήθηκαν οι εξής παράμετροι του κριτηρίου Mohr-Coulomb: συνοχή ίση με 15kPa και γωνία τριβής ίση με 36°. Πρέπει να σημειωθεί ότι οι εν λόγω τιμές των παραμέτρων βρίσκονται εντός του ορίου των προτεινόμενων από τη βιβλιογραφία αναφορών από μεγάλης κλίμακας δοκιμές άμεσης διάτμησης, οι οποίες κρίνονται αντιπροσωπευτικές για τον χαρακτηρισμό της διατμητικής αντοχής στο εξεταζόμενο πρόβλημα.

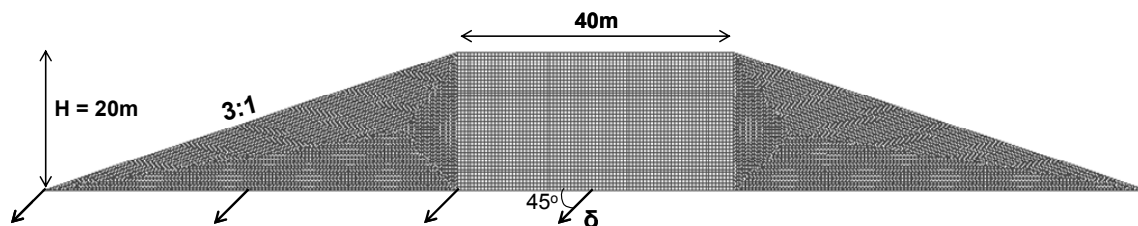
Από τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων για τη διάδοση κανονικού ρήγματος (βλ. Σχήμα 3.2α) προκύπτει ότι η παραμόρφωση της επιφάνειας είναι μικρότερου μεγέθους και σχετίζεται με πιο ευρεία ζώνη ανάπτυξης πλαστικών παραμορφώσεων σε σύγκριση με τα προαναφερθέντα αποτελέσματα για πυκνή άμμο, χαρακτηριστικά αντίστοιχα εκείνων που έχουν παρατηρηθεί για αργίλους (Papadimitriou et al., 2007).



**Σχήμα 3.2.** Επιφάνειες αστοχίας λόγω διάδοσης ρήγματος εντός απορριμματικού υλικού όπως προέκυψαν για: (α) κανονικό ρήγμα, και (β) ανάστροφο ρήγμα 45° σύμφωνα με τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων με θεώρηση μονοδιάστατων συνθηκών ελεύθερου πεδίου.

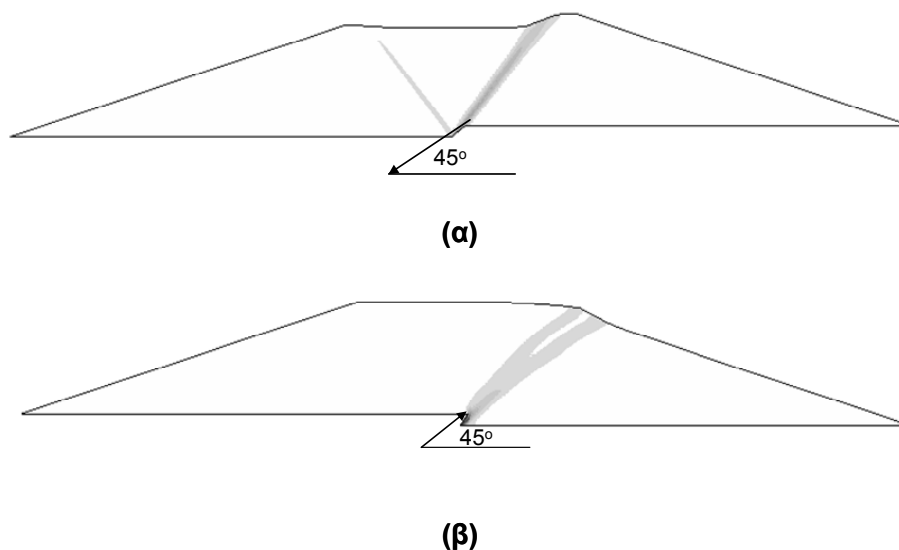
Συγκεκριμένα, η ανάπτυξη πλαστικών παραμορφώσεων σε μια δευτερεύουσα επιφάνεια αστοχίας είναι αισθητά μειωμένη, ενώ η πρωτεύουσα επιφάνεια χαρακτηρίζεται από κλίση μεγαλύτερη ( $60^\circ$ ) σε σχέση με την αρχική γωνία διάδοσης ( $45^\circ$ ) αλλά πάντως μικρότερη από την αντίστοιχη της πυκνής άμμου ( $68^\circ$ ). Για την περίπτωση ανάστροφου ρήγματος παρατηρήθηκε ότι η διεύθυνση διάδοσής του μεταβάλλεται με την αύξηση των επιβαλλόμενων μετακινήσεων προσεγγίζοντας την προβολή της διεύθυνσης της μετατόπισης, καταλήγοντας σε ευρεία ζώνη πλαστικών παραμορφώσεων (βλ. Σχήμα 3.2β). Για τον λόγο αυτό, πιθανολογείται ότι το μέγεθος των επιφανειακών παραμορφώσεων είναι μικρότερο της αντίστοιχης περίπτωσης πυκνής άμμου. Σημειώνεται δε ότι, η απαιτούμενη σχετική μετακίνηση για την ανάδυση του ρήγματος στην επιφάνεια είναι περίπου ίση με 0.4% για κανονικό ρήγμα, και ίση με 1.3% για ανάστροφο ρήγμα, δηλαδή της ίδιας τάξης μεγέθους με τις αντίστοιχες μετακινήσεις στην περίπτωση της πυκνής άμμου που εξετάστηκε προηγουμένως.

Είναι σαφές ότι η θεώρηση μονοδιάστατων συνθηκών διάδοσης της τεκτονικής διάρρηξης σε έναν Χ.Υ.Τ.Α. αποτελεί μία απλουστευτική παραδοχή, κυρίως λόγω των διαφορετικών τοπικών διατάξεων Χ.Υ.Τ.Α., οι οποίες παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 2. Το εξεταζόμενο πρόβλημα αναλύεται στη συνέχεια λαμβάνοντας ταυτόχρονα υπόψη και τη διδιάστατη γεωμετρία της γεωκατασκευής. Πιο συγκεκριμένα, κατά τη διενέργεια των αριθμητικών αναλύσεων προσομοιώθηκε ένας υπέργειος Χ.Υ.Τ.Α. τραπεζοειδούς μορφής, με ύψος ίσο με 20m και κλίση πρανών 3:1 (H:V). Προκειμένου να προσδιοριστεί η επιφάνεια αστοχίας με τη μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια, χρησιμοποιήθηκαν τετραπλευρικά στοιχεία και πυκνή διακριτοποίηση με μέγεθος στοιχείων  $0.5\text{m} \times 0.5\text{m}$  στην περιοχή διάδοσης της διάρρηξης, όπου αναμένεται να αναπτυχθούν μεγάλες πλαστικές παραμορφώσεις. Εξαιτίας της γεωμετρίας της κατασκευής, χρησιμοποιήθηκαν τριγωνικά στοιχεία κοντά στον πόδα του πρανούς και εκτός των ορίων των προαναφερθεισών περιοχών ώστε να μην επηρεάζονται δυσμενώς τα υπολογιζόμενα αποτελέσματα (βλ. Σχήμα 3.3). Ακόμη με σκοπό την άμεση σύγκριση με τις αριθμητικές αναλύσεις που βασίζονται στη θεώρηση μονοδιάστατων συνθηκών, εφαρμόστηκε κατά την αριθμητική επίλυση μία υπορουτίνα στο λογισμικό ABAQUS (2004), με την οποία επιτυγχάνεται η κατανομή των αρχικών γεωστατικών τάσεων χωρίς τη συνακόλουθη ανάπτυξη παραμορφώσεων.



**Σχήμα 3.3.** Κάνναβος πεπερασμένων στοιχείων και γεωμετρικά δεδομένα για τη διατομή του εξεταζόμενου Χ.Υ.Τ.Α.

Αρχικά, εξετάζεται η περίπτωση διάδοσης κανονικού και ανάστροφου ρήγματος με ίχνος στη βάση του Χ.Υ.Τ.Α. στη θέση του άξονα συμμετρίας (βλ. Σχήμα 3.3) και με γωνία βύθισης ίση με  $45^\circ$ . Στην περίπτωση αυτή, η ευθεία προβολή του ρήγματος αντιστοιχεί με την αιχμή του πρανού. Παρόλα αυτά στο Σχήμα 3.4 απεικονίζονται οι επιφάνειες αστοχίας όπως προέκυψαν από τις ισομεγέθεις καμπύλες των πλαστικών παραμορφώσεων για τις δύο εξεταζόμενες περιπτώσεις ρήγματος.

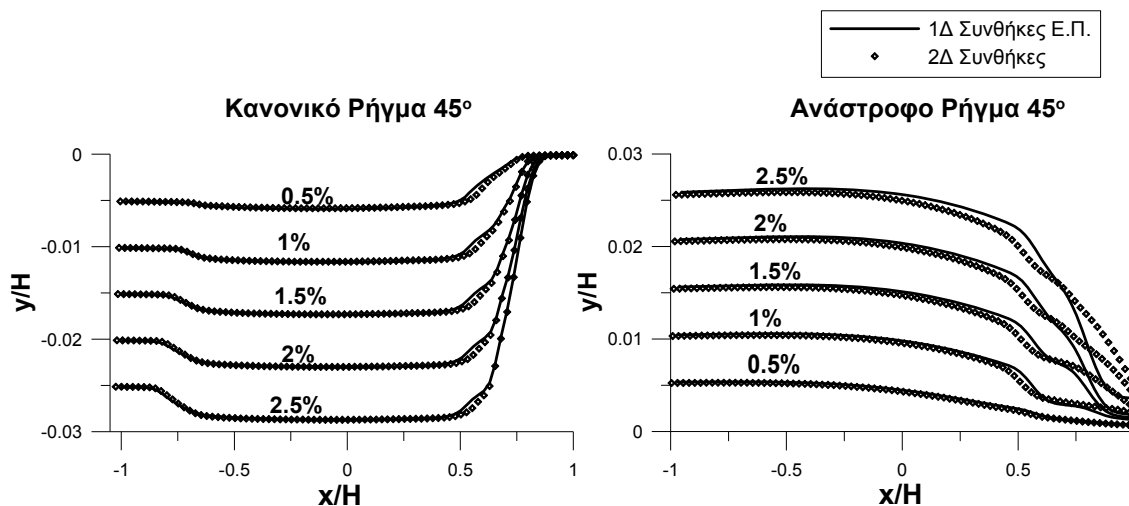


**Σχήμα 3.4.** Επιφάνειες αστοχίας λόγω διάδοσης ρήγματος εντός απορριμματικού υλικού όπως προέκυψαν για: (α) κανονικό ρήγμα, και (β) ανάστροφο ρήγμα  $45^\circ$  σύμφωνα με τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων με θεώρηση διδιάστατων συνθηκών.

Στο Σχήμα 3.5 απεικονίζεται η επιφανειακή παραμόρφωση όπως υπολογίστηκε αριθμητικά τόσο με τη θεώρηση διδιάστατων συνθηκών (με σύμβολα), όσο και με τη θεώρηση μονοδιάστατων συνθηκών ελευθέρου πεδίου (με συνεχείς γραμμές). Σημειώνεται ότι το ίχνος του ρήγματος εντοπίζεται στη θέση  $x/H=0$ . Παρατηρείται ότι για την περίπτωση του κανονικού ρήγματος, η κατανομή της κανονικοποιημένης κατακόρυφης μετακίνησης (συναρτήσει της παραμορφωμένης οριζόντιας συνιστώσας

της θέσης στην οποία αντιστοιχεί) παρουσιάζει αμυδρή διαφορά για τις δύο παραδοχές προσομοίωσης. Στην περίπτωση αυτή η δευτερεύουσα επιφάνεια αστοχίας διαμορφώνεται σε αρκετά σημαντικό επίπεδο κανονικοποιημένης μετακίνησης (περίπου στο 2.5%). Η περιοχή ανάπτυξης σημαντικών εδαφικών παραμορφώσεων εντοπίζεται στη ζώνη μεταξύ 0.85H και 0.5H.

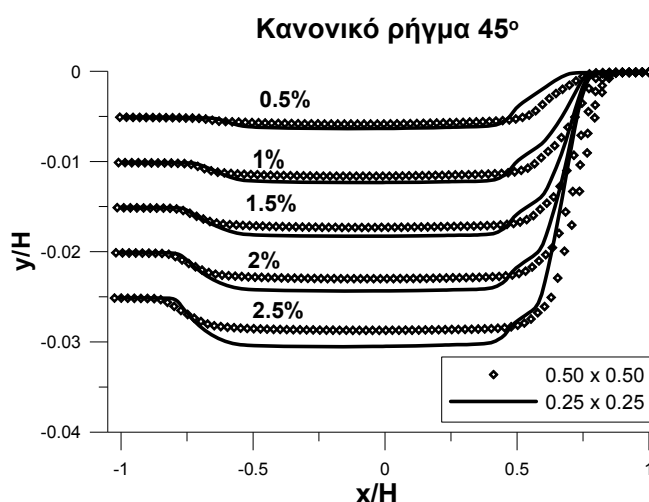
Αντιθέτως, για την περίπτωση ανάστροφου ρήγματος παρατηρείται πιο σημαντική επίδραση των παραδοχών προσομοίωσης, η οποία είναι ιδιαίτερως έντονη στην περιοχή που βρίσκεται κοντά στην αιχμή του πρानούς ( $x/H=1$ ) και για σημαντικό επίπεδο κανονικοποιημένης μετακίνησης ( $y/H>1.5\%$ ). Πιο συγκεκριμένα, με βάση τη θεώρηση διδιάστατων συνθηκών υπολογίζεται μεγαλύτερο μέγεθος κανονικοποιημένης μετακίνησης σε απόσταση έως και ίση με 0.25H από την αιχμή του πρानούς, η οποία όμως σχετίζεται με πιο μικρή κλίση της επιφάνειας και συνεπώς μικρότερες επιφανειακές παραμορφώσεις σε σχέση με τη θεώρηση μονοδιάστατων συνθηκών (βλ. Σχήμα 3.5). Το φαινόμενο αυτό αντιστρέφεται, δηλαδή παρατηρείται μεγαλύτερη επιφανειακή παραμόρφωση στην περίπτωση της διδιάστατης προσομοίωσης, σε απόσταση που κυμαίνεται από 0.25H έως 0.75H από την αιχμή του πρानούς.



**Σχήμα 3.5.** Σύγκριση μονοδιάστατων (1Δ), συνθηκών ελευθέρου πεδίου (Ε.Π.) και διδιάστατων (2Δ) συνθηκών προσομοίωσης για κανονικό και ανάστροφο ρήγμα 45°: κατανομή της κανονικοποιημένης ως προς το ύψος κατακόρυφης μετακίνησης ( $y/H$ ) συναρτήσει της κανονικοποιημένης ως προς το ύψος οριζόντιας συνιστώσας του παραμορφωμένου φορέα ( $x/H$ ).

Μία επιπλέον παραδοχή της προσομοίωσης αποτελεί και η πυκνότητα του καννάβου. Για την εξέταση της επίδρασης της διακριτοποίησης στις αναπτυσσόμενες επιφανειακές παραμορφώσεις, καταστρώθηκε ένα νέο προσομοίωμα αποτελούμενο από

τετραπλευρικά στοιχεία επίπεδης παραμόρφωσης μεγέθους  $0.25\text{m} \times 0.25\text{m}$  στην περιοχή διάδοσης της διάρρηξης, ενώ χρησιμοποιήθηκαν τριγωνικά στοιχεία κοντά στον πόδα του πρανούς και εκτός των ορίων των προαναφερθεισών περιοχών. Στο Σχήμα 3.6 παρατίθενται οι κατανομές της κανονικοποιημένης ως προς το ύψος κατακόρυφης μετακίνησης, συναρτήσει της κανονικοποιημένης ως προς το ύψος οριζόντιας συνιστώσας του παραμορφωμένου φορέα για τις δύο εξεταζόμενες περιπτώσεις και διάφορα επίπεδα επιβαλλόμενης μετακίνησης. Διαπιστώνεται ότι για την περίπτωση του πυκνότερου καννάβου η επιφανειακή εκδήλωση του ρήγματος λαμβάνει χώρα σε απόσταση μικρότερη κατά  $0.1H$  με συνεπαγόμενη αύξηση της επιφανειακής κλίσης, και των παραμορφώσεων. Επιπροσθέτως, η βύθιση στην περιοχή του κατακρημνίσματος λαμβάνει μεγαλύτερες τιμές για το προσομοίωμα με τον πυκνό κάνναβο εν συγκρίσει με το προσομοίωμα του αδρότερου καννάβου. Συνεπώς, η επίδραση της εξεταζόμενης παραδοχής της αριθμητικής προσομοίωσης, αποδείχτηκε αρκετά σημαντική όσον αφορά το μέγεθος των αναπτυσσόμενων επιφανειακών παραμορφώσεων, ενώ η διεύθυνση της διάδοσης των επιφανειών αστοχίας πρακτικά δεν μεταβάλλεται.



**Σχήμα 3.6.** Επίδραση της πυκνότητας της διακριτοποίησης για κανονικό ρήγμα  $45^\circ$ : κατανομή της κανονικοποιημένης ως προς το ύψος κατακόρυφης μετακίνησης ( $y/H$ ) συναρτήσει της κανονικοποιημένης ως προς το ύψος οριζόντιας συνιστώσας του παραμορφωμένου φορέα ( $x/H$ ). Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται για διάφορες τιμές της κατακόρυφης συνιστώσας της μετακίνησης του ρήγματος κανονικοποιημένης ως προς το ύψος του Χ.Υ.Τ.Α. (0.5%-2.5%).

### 3.2.2 Επίδραση των χαρακτηριστικών του ρήγματος

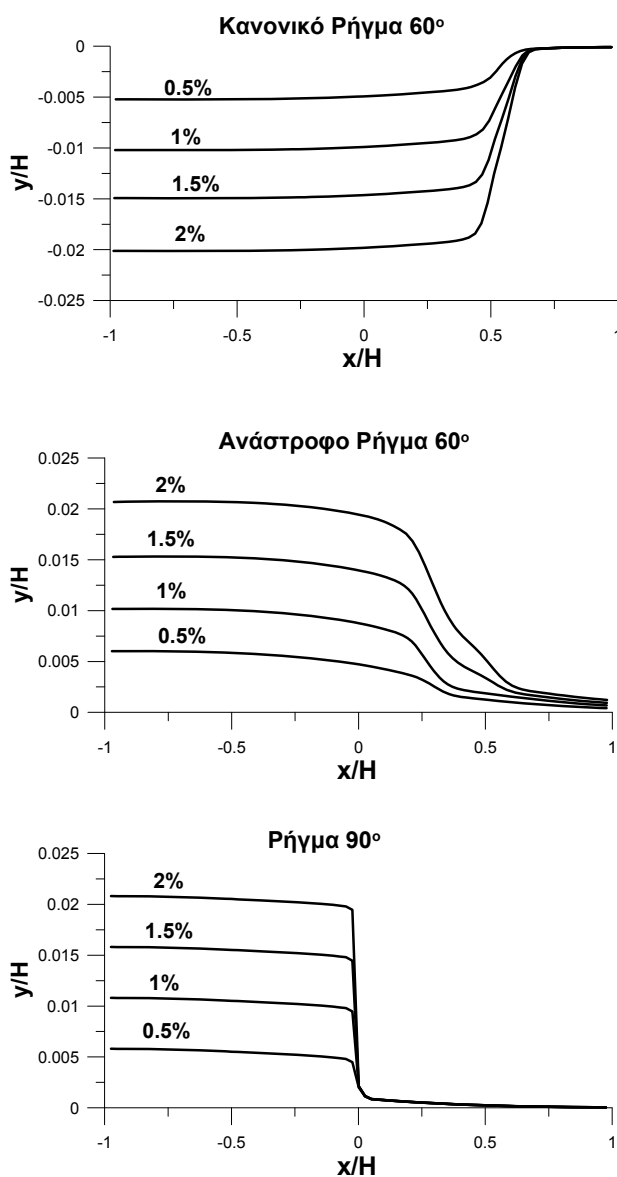
Προκειμένου να διερευνηθεί η επίδραση των χαρακτηριστικών του ρήγματος, δηλαδή η γωνία βύθισης και ο τύπος του ρήγματος, διεξήχθησαν αριθμητικές αναλύσεις βασιζόμενες στις παραδοχές που έχουν αναφερθεί και θεωρώντας διδιάστατες συνθήκες.

Επιπλέον, παρόλο που η εφαρμογή πυκνού καννάβου δείχνει να παρέχει πιο ρεαλιστικά αποτελέσματα, παρακάτω παρατίθενται αποτελέσματα αναλύσεων του προσομοιώματος του Σχήματος 3.3. Αυτό συμβαίνει για δύο λόγους, αφενός επιχειρείται μια συγκριτική παράθεση των αποτελεσμάτων τονίζοντας τα κύρια χαρακτηριστικά της κάθε περίπτωσης για την οποία δεν είναι απαραίτητη η απόλυτη τιμή των αναπτυσσόμενων παραμορφώσεων, αφετέρου ο υπολογιστικός χρόνος (ειδικά της εφαρμογής της υπορουτίνας επιβολής των αρχικών συνθηκών) αυξάνεται ανάλογα με τον αριθμό των χρησιμοποιούμενων στοιχείων. Οι αριθμητικές αναλύσεις περιλαμβάνουν τις περιπτώσεις κανονικού και ανάστροφου ρήγματος  $60^\circ$  και ρήγματος  $90^\circ$ , ενώ το ίχνος του ρήγματος θεωρείται ότι βρίσκεται στη θέση του άξονα συμμετρίας της κατασκευής στη βάση του Χ.Υ.Τ.Α. Η προσομοίωση του κάθε τύπου ρήγματος υλοποιήθηκε με την μεταβολή των συνιστωσών της επιβαλλόμενης μετακίνησης στα σύνορα του προσομοιώματος, δηλαδή προσαρμόζοντας καταλλήλως το διάνυσμα της μετατόπισης (βλ. Σχήμα 3.3)

Στο Σχήμα 3.7 απεικονίζεται η κατανομή της κανονικοποιημένης ως προς το ύψος κατακόρυφης μετακίνησης, συναρτήσει της κανονικοποιημένης ως προς το ύψος οριζόντιας συνιστώσας του παραμορφωμένου φορέα, για τις εξεταζόμενες περιπτώσεις ρηγμαίων και για διάφορα επίπεδα επιβαλλόμενης μετακίνησης. Παρατηρείται ότι κατά τη διάδοση του κανονικού ρήγματος με γωνία βύθισης  $60^\circ$  δεν σχηματίζεται δευτερεύουσα επιφάνεια αστοχίας, γεγονός που αναμενόταν βάσει των προαναφερθέντων στοιχείων στη βιβλιογραφική ανασκόπηση. Επίσης, η επιφάνεια αστοχίας είναι κυρτή με εφαιπομενική κλίση περίπου ίση με τη γωνία βύθισης του ρήγματος, δηλαδή  $60^\circ$ , ενώ κατά την επιφανειακή εκδήλωση του η γωνία ανάδυσης είναι περίπου ίση με  $45^\circ$ . Ακόμη διαπιστώνεται ότι η απαιτούμενη μετακίνηση του ρήγματος για την ανάδυση του ρήγματος είναι μεγαλύτερη σε σχέση με τα αντίστοιχα αποτελέσματα των  $45^\circ$ , σημειώνεται δε ότι η παρατήρηση αυτή συμφωνεί με την αντίστοιχη συμπεριφορά πυκνής άμμου (Lee et al., 2004). Η επιφανειακή εκδήλωσή του ρήγματος παρατηρείται σε απόσταση  $0.5H$  από τον άξονα συμμετρίας, η οποία συμπίπτει με την προέκταση του επιπέδου του ρήγματος. Επιπλέον, η ζώνη ανάπτυξης σημαντικών παραμορφώσεων έχει εύρος  $0.25H$ , εκτείνεται δηλαδή σε απόσταση από  $0.5H$  έως  $0.75H$  από το ίχνος του ρήγματος. Διαπιστώνεται ότι η αύξηση της γωνίας βύθισης του ρήγματος σε  $90^\circ$ , σχετίζεται με επιπρόσθετη αύξηση της απαιτούμενης μετακίνησης του ρήγματος για ανάδυση του ρήγματος στην επιφάνεια. Η διάδοση του



ρήγματος των  $90^\circ$  γίνεται σε σχεδόν κατακόρυφη διεύθυνση, οπότε οι αναπτυσσόμενες παραμορφώσεις περιορίζονται στη θέση του άξονα συμμετρίας.



**Σχήμα 3.7.** Επίδραση των χαρακτηριστικών του ρήγματος: κατανομή της κανονικοποιημένης ως προς το ύψος κατακόρυφης μετακίνησης ( $y/H$ ) συναρτήσει της κανονικοποιημένης ως προς το ύψος οριζόντιας συνιστώσας του παραμορφωμένου φορέα ( $x/H$ ) για κανονικό και ανάστροφο ρήγμα  $60^\circ$  και ρήγμα  $90^\circ$ . Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται για διάφορες τιμές της κατακόρυφης συνιστώσας της μετακίνησης του ρήγματος κανονικοποιημένης ως προς το ύψος του Χ.Υ.Τ.Α. (0.5%-2.5%).

Τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων του ανάστροφου ρήγματος  $60^\circ$ , έδειξαν ότι η απαιτούμενη μετακίνηση για την επιφανειακή εκδήλωση του ρήγματος είναι μεγαλύτερη σε σχέση με την περίπτωση ανάστροφου ρήγματος με γωνία βύθισης  $45^\circ$ . Παρατηρείται επίσης ότι για την περίπτωση του ανάστροφου ρήγματος με γωνία  $60^\circ$  η ζώνη σημαντικής παραμόρφωσης εκτείνεται σε απόσταση ίση με  $0.25H$  από τον

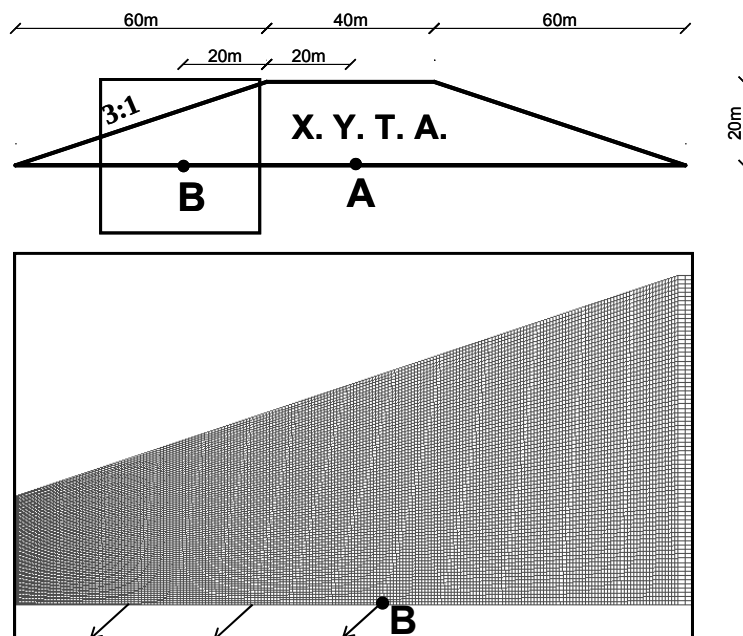
άξονα συμμετρίας έως την αιχμή του πρανούς, γεγονός που οφείλεται στον μηχανισμό ανάπτυξης των πλαστικών παραμορφώσεων. Αρχικά, για χαμηλές τιμές επιβαλλόμενης μετακίνησης ( $y/H \approx 1\%$ ) η ζώνη ανάπτυξης των πλαστικών παραμορφώσεων αναπτύσσεται με γωνία μεγαλύτερη της αρχικής (περίπου ίση με  $75^\circ$ ), όπως εύκολα προκύπτει και από το Σχήμα 3.7. Καθώς αυξάνεται η επιβαλλόμενη μετακίνηση, αρχίζουν και αναπτύσσονται πλαστικές παραμορφώσεις σε ζώνες με μικρότερη κλίση φτάνοντας μέχρι και την αιχμή του πρανούς, με αποτέλεσμα να διευρύνεται η ζώνη αστοχίας.

### 3.2.3 Επίδραση της θέσης του ίχνους του ρήγματος

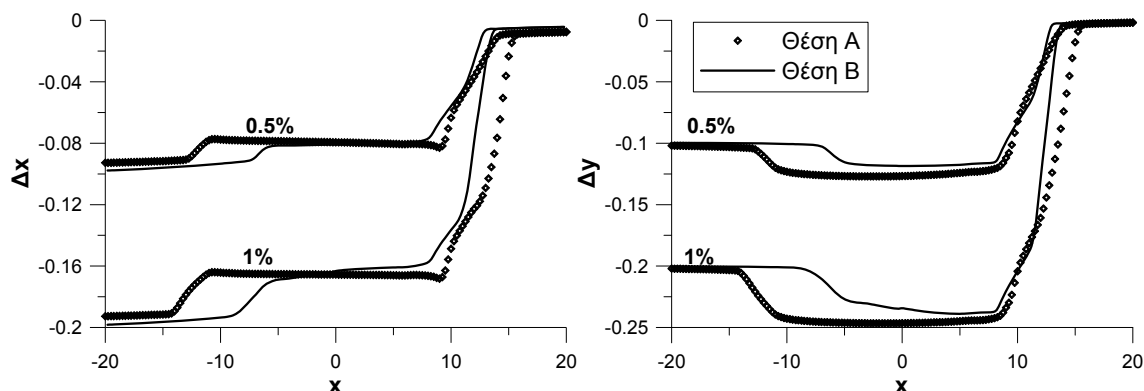
Στις προηγούμενες αναλύσεις η θέση του ίχνους του ρήγματος κείτονταν ουσιαστικά κάτω από το κατάστρωμα του Χ.Υ.Τ.Α. Συνεπώς δεν μπορεί να εκτιμηθεί η επίδραση της κεκλιμένης επιφάνειας των πρανών της γεωκατασκευής στη διάδοση της τεκτονικής διάρρηξης. Για τον σκοπό αυτό μορφώθηκε ένα νέο προσομοίωμα, στο οποίο θεωρήθηκε ότι το ίχνος του ρήγματος βρίσκεται στη θέση Β (βλ. Σχήμα 3.8). Η θέση Β βρίσκεται σε απόσταση 20m από την αιχμή του πρανούς, δηλαδή για την εξεταζόμενη περίπτωση κανονικού ρήγματος με γωνία βύθισης  $45^\circ$ , η ευθεία προβολή του ρήγματος αναμένεται στην αιχμή του πρανούς. Για το προσομοίωμα αυτό εκτελέστηκαν διάφορες αναλύσεις ευαισθησίας των αποτελεσμάτων σε σχέση με τη διακριτοποίησή του καννάβου των πεπερασμένων στοιχείων. Τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων ανέδειξαν τη σημασία όχι μόνον του μεγέθους των πεπερασμένων στοιχείων, αλλά και της δομής τους καννάβου. Πιο συγκεκριμένα, η χρήση δομημένου καννάβου με διεύθυνση των στοιχείων κατά το δυνατόν κατακόρυφη αποδείχτηκε πιο ακριβής. Με βάση την παρατήρηση αυτή χρησιμοποιήθηκε ο καννάβος του Σχήματος 3.8, ο οποίος αποτελείται από στοιχεία επίπεδης παραμόρφωσης και μεγέθους  $0.2m \times 0.2m$  στην περιοχή διάδοσης του ρήγματος.

Η διεύθυνση διάδοσης της κύριας επιφάνειας αστοχίας είναι περίπου ίση με  $63^\circ$ , ενώ η κανονικοποιημένη κατακόρυφη μετακίνηση ( $y/H$ ) που απαιτείται για την επιφανειακή εκδήλωση του ρήγματος είναι της τάξης του 1%. Τα στοιχεία αυτά συμφωνούν με τα αντίστοιχα αποτελέσματα που αναφέρθηκαν για την περίπτωση διάδοσης κανονικού ρήγματος  $45^\circ$  στη θέση Α. Επιπλέον, τα αποτελέσματα των δύο περιπτώσεων συσχετίζονται και σε όρους οριζόντιας και κατακόρυφης μετακίνησης, η κατανομή των οποίων παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.9. Για άμεση αντιπαραβολή,

παρατίθενται τα αποτελέσματα της διάδοσης ρήγματος με ίχνος στη θέση A για την περίπτωση πυκνού καννάβου.



**Σχήμα 3.8.** Σχηματική απεικόνιση της εξεταζόμενης γεωμετρίας και των δύο θέσεων του ίχνους του ρήγματος και λεπτομέρεια του δομημένου καννάβου στον πόδα του πρανούς.



**Σχήμα 3.9.** Επίδραση της θέσης του ρήγματος: κατανομή της οριζόντιας και της κατακόρυφης συνιστώσας της μετακίνησης για δύο επίπεδα κανονικοποιημένης επιβαλλόμενης μετακίνησης του ρήγματος. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται για πυκνή διακριτοποίηση και ίχνος του κανονικού ρήγματος  $45^\circ$  στις θέσεις A και B. Για λόγους άμεσης αντιπαραβολής και για τις δύο περιπτώσεις το ίχνος του ρήγματος κείται στη θέση  $x=0m$ .

Παρατηρείται ότι εν γένει οι επιφανειακές μετακινήσεις για τις δύο εξεταζόμενες περιπτώσεις δεν διαφέρουν δραματικά. Η σημαντικότερη διαφοροποίηση σχετίζεται με την απόσταση στην οποία αναπτύσσεται η δευτερεύουσα επιφάνεια αστοχίας, αφού η απόσταση μεταξύ των δύο επιφανειών αστοχίας είναι μικρότερη στην περίπτωση που το

ρήγμα βρίσκεται στη θέση Β. Η παρατήρηση αυτή όμως είναι αναμενόμενη αφού η επιφάνεια του απορριμματικού πρηνούς είναι κεκλιμένη και η διεύθυνση διάδοσης των δευτερευουσών επιφανειών αστοχίας για τις δύο περιπτώσεις είναι παρεμφερής. Επίσης, όταν το ίχνος του ρήγματος εντοπίζεται κάτω από τα πρηνή του Χ.Υ.Τ.Α. παρατηρείται μεγαλύτερη κλίση της επιφάνειας κοντά στην περιοχή ανάδυσης του ρήγματος, η οποία σχετίζεται με μεγαλύτερου μεγέθους πλαστικές παραμορφώσεις.

### **3.2.4 Συμπεράσματα για τη διάδοση ρήγματος εντός απορριμματικού υλικού**

Από τη διερεύνηση που προηγήθηκε συμπεραίνεται ότι οι παραδοχές της προσομοίωσης επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό τις υπολογισθείσες επιφανειακές παραμορφώσεις κατά τη διάδοση ρηγμάτων εντός της απορριμματικής μάζας. Πιο συγκεκριμένα, η χρήση πυκνού καννάβου και η θεώρηση μονοδιάστατων συνθηκών οδηγούν σε μεγαλύτερες αναπτυσσόμενες παραμορφώσεις. Επιπλέον, αντίστοιχη συμπεριφορά διαπιστώθηκε και για την περίπτωση που το ίχνος του ρήγματος εντοπίζεται κάτω από τα πρηνή. Όσον αφορά στα χαρακτηριστικά του ρήγματος, προέκυψαν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- η απαιτούμενη κανονικοποιημένη μετακίνηση για την επιφανειακή εκδήλωση του ρήγματος αυξάνεται καθώς αυξάνει η γωνία βύθισης του ρήγματος, τόσο για κανονικά όσο και για ανάστροφα ρήγματα,
- καθώς αυξάνεται η γωνία βύθισης του κανονικού ρήγματος δεν αναπτύσσεται δευτερεύουσα επιφάνεια αστοχίας και μειώνεται το εύρος της ζώνης ανάπτυξης σημαντικών παραμορφώσεων,
- καθώς αυξάνεται η γωνία βύθισης του ανάστροφου ρήγματος μειώνεται το εύρος της ζώνης ανάπτυξης σημαντικών παραμορφώσεων, μεγαλώνει η επιφανειακή κλίση και επομένως οι παραμορφώσεις.

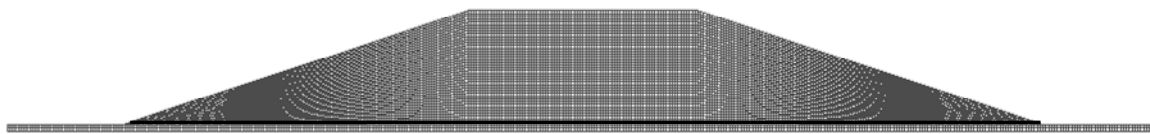
## **3.3 ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΣΤΕΓΑΝΩΣΗΣ**

Η γειτνίαση ενός Χ.Υ.Τ.Α. με ένα ενεργό ρήγμα σχετίζεται αφενός με την ανάπτυξη μόνιμων παραμορφώσεων και αφετέρου με την καταπόνηση που προκαλούν οι επιβαλλόμενες παραμορφώσεις στο σύνθετο σύστημα στεγάνωσης και το σύστημα συλλογής στραγγίσματος. Σε σχέση με τη δεύτερη περίπτωση έχει μεγάλη σημασία η διασφάλιση της επάρκειας του συστήματος στεγάνωσης έναντι της τεκτονικής διάρρηξης, καθώς ενδεχόμενη αστοχία του συνδέεται με ιδιαιτέρως δυσμενείς περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Για τον λόγο αυτό εξετάζεται παρακάτω η καταπόνηση που αναπτύσσεται

στο σύνθετο σύστημα στεγάνωσης λόγω της τεκτονικής διάρρηξης. Η διερεύνηση βασίζεται στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, συνεπώς αρχικά ελέγχεται η επίδραση των παραδοχών της προσομοίωσης. Επιπλέον, μελετάται ο ρόλος των χαρακτηριστικών του σύνθετου συστήματος στεγάνωσης. Σκοπός των αριθμητικών αναλύσεων είναι ο προσδιορισμός των επιπέδων των πιθανών βλαβών και η σχετική επίδραση της κάθε παραμέτρου στις διάφορες καταστάσεις βλαβών.

Το προσομοίωμα που εξετάζεται αφορά στη διατομή του Χ.Υ.Τ.Α. που προαναφέρθηκε και στην προηγούμενη παράγραφο και επιπλέον το απορριμματικό υλικό χαρακτηρίζεται από περιβάλλουσα αστοχίας με συνοχή 15kPa και γωνία εσωτερικής τριβής ίση με 36°. Το σύνθετο σύστημα στεγάνωσης αποτελείται από γεωμεμβράνη HDPE πάχους 1.5mm και εδαφική στρώση αργίλου πάχους ίσου με 1m, σύμφωνα με το κατώτατο όριο που προτείνεται από τις ευρωπαϊκές οδηγίες (EC, 1999). Η άργιλος θεωρείται μέσης στιφρότητας με αστράγγιστη διατμητική αντοχή ίση με 53kPa. Η διακριτοποίηση του προσομοιώματος πραγματοποιήθηκε με στοιχεία επίπεδης παραμόρφωσης για το απορριμματικό υλικό και τη στρώση της αργίλου και με γραμμικά στοιχεία αξονικής δυσκαμψίας για τη γεωμεμβράνη καθώς δε διαθέτει καμπτική δυσκαμψία. Για τη συμβατότητα των παραμορφώσεων του προσομοιώματος σε σχέση με τα τρία μέρη του καννάβου (απορριμματικός όγκος, γεωμεμβράνη και στρώση αργίλου) θεωρήθηκαν δύο ζεύγη επιφανειών επαφής: (α) άνω επιφάνεια της γεωμεμβράνης με κάτω όριο απορριμμάτων, και (β) κάτω επιφάνεια της γεωμεμβράνης με άνω επιφάνεια της αργλικής στρώσης.

Το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS (2004) χρησιμοποιεί έναν αλγόριθμο επίλυσης του προβλήματος επαφής, σύμφωνα με τον οποίο οι εξισώσεις επαφής διατυπώνονται πρώτα για την πρώτη επιφάνεια και εν συνεχεία εντοπίζεται το κοντινότερο σημείο στη δεύτερη επιφάνεια του ζεύγους, θεωρώντας την κάθετη απόσταση προς τον κόμβο της πρώτης. Ως πρώτη επιφάνεια επιλέγεται η πιο εύκαμπτη από τις δύο για κάθε ζεύγος των διεπιφανειών, δηλαδή στη συγκεκριμένη περίπτωση η κατώτερη επιφάνεια των απορριμμάτων και η ανώτερη της αργλικής στρώσης. Επιπροσθέτως, εφαρμόστηκε δύσκαμπτη κατακόρυφη συμπεριφορά της διεπιφάνειας, δηλαδή χωρίς μεταβίβαση ορθών τάσεων όταν υφίσταται κάθετη σχετική μετατόπιση, παραδοχή που ουσιαστικά αντιστοιχεί σε πλήρη επαφή των επιφανειών. Όσον αφορά στη διατμητική αντοχή των διεπιφανειών, αρχικά αποδόθηκε σε αυτήν αρκετά μεγάλη τιμή (άπειρη), έτσι ώστε να μην είναι δυνατή η ανάπτυξη της ολίσθησης.



**Σχήμα 3.10.** Διακριτοποίηση του εξεταζόμενου Χ.Υ.Τ.Α.. Με έντονη γραμμή σημειώνεται η θέση της γεωμεμβράνης στεγάνωσης στη βάση του.

Στο Σχήμα 3.10 παρουσιάζεται ο κώνναβος του προσομοιώματος για μέγεθος πεπερασμένων στοιχείων 0.5m. Για τη διεξαγωγή των αριθμητικών αναλύσεων θεωρείται η περίπτωση κανονικού ρήγματος, ως η πιο συχνά εμφανιζόμενη στον Ελλαδικό χώρο, και πιο συγκεκριμένα με γωνία βύθισης ίση με  $45^\circ$ .

### 3.3.1 Επίδραση των παραδοχών της αριθμητικής προσομοίωσης

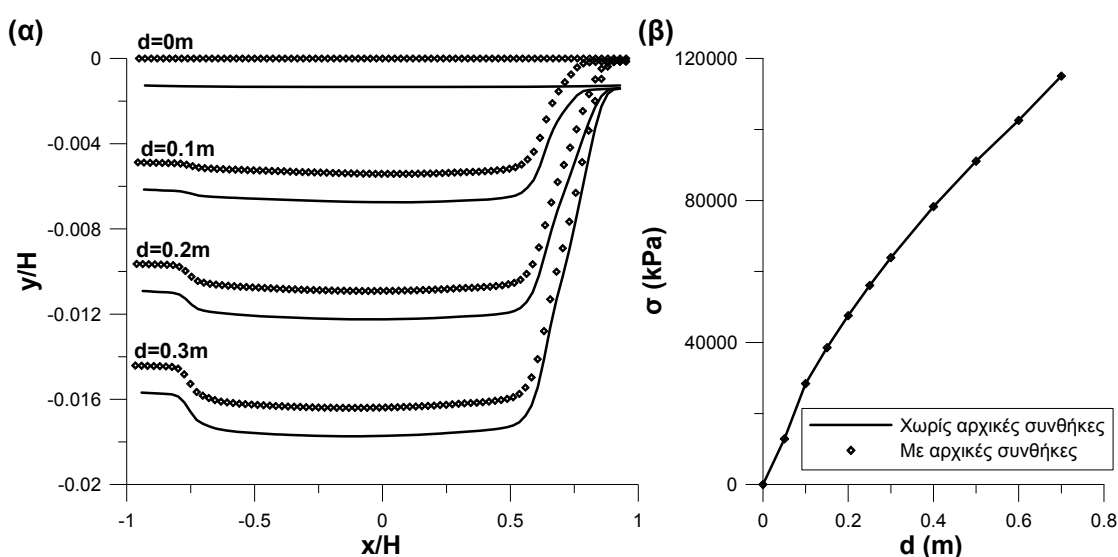
Όπως διαπιστώθηκε οι παραδοχές της αριθμητικής προσομοίωσης παίζουν σημαντικό ρόλο για την ανάλυση της διάδοσης της τεκτονικής διάρρηξης. Αρχικά εξετάστηκε η επίδραση των αρχικών συνθηκών, δηλαδή συγκρίνονται τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων για τις εξής περιπτώσεις:

- επιβολή της επιτάχυνσης της βαρύτητας και μετέπειτα επιβολή των μετακινήσεων του ρήγματος (θεώρηση χωρίς αρχικές συνθήκες),
- επιβολή του πεδίου των τάσεων λόγω βαρύτητας χωρίς την ανάπτυξη παραμορφώσεων και μετέπειτα επιβολή των μετακινήσεων του ρήγματος (θεώρηση με αρχικές συνθήκες).

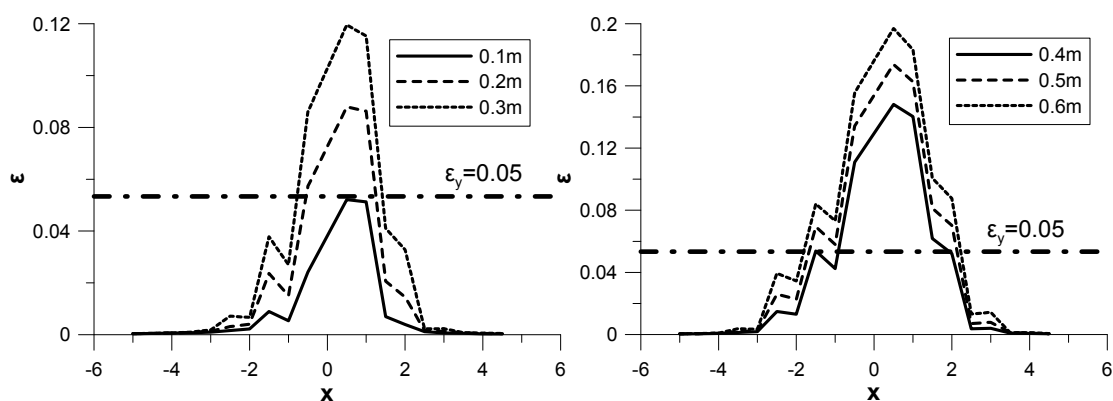
Εν γένει, όσον αφορά στον μηχανισμό διάδοσης του ρήγματος, τα αποτελέσματα των δύο αριθμητικών αναλύσεων συμφωνούν, δηλαδή η διάρρηξη έχει διαδοθεί μέχρι το επίπεδο της γεωμεμβράνης για τιμή της κατακόρυφης συνιστώσας της μετακίνησης ίση με 3.3cm, ενώ για την ανάδυση του ρήγματος στην επιφάνεια η αντίστοιχη τιμή είναι 5cm. Η διεύθυνση διάδοσης της πρωτεύουσας και της δευτερεύουσας επιφάνειας αστοχίας είναι  $60^\circ$  και  $55^\circ$  αντίστοιχα, ενώ 40cm κατακόρυφης μετακίνησης (d) προκαλούν την πλήρη διάδοση της δευτερεύουσας επιφάνειας. Παρατηρώντας το Σχήμα 3.11.α, όπου απεικονίζονται οι επιφανειακές μετακινήσεις για τις δύο εξεταζόμενες θεωρήσεις και διάφορα επίπεδα κατακόρυφης μετακίνησης, είναι φανερό ότι οι αναπτυσσόμενες παραμορφώσεις είναι μεγαλύτερες εάν δεν ληφθούν υπόψη οι αρχικές συνθήκες. Όμως, η διαφορά μεταξύ της κανονικοποιημένης κατακόρυφης μετακίνησης στα επιμέρους στάδια επιβολής της μετατόπισης του ρήγματος, φαίνεται

ότι ισούνται με την αντίστοιχη διαφορά για την περίπτωση μηδενικής επιβαλλόμενης μετακίνησης. Η παρατήρηση αυτή ερμηνεύεται θεωρώντας ότι οι στατικές παραμορφώσεις προστίθενται στις αντίστοιχες λόγω της τεκτονικής διάρρηξης. Επιπλέον, η μέγιστη αξονική τάση στη γεωμεμβράνη (Σχήμα 3.11.β) ταυτίζεται για τις δύο εξεταζόμενες περιπτώσεις.

Προκειμένου να εξεταστεί η καταπόνηση της γεωμεμβράνης, παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.12 η σχηματική απεικόνιση της κατανομής των αξονικών παραμορφώσεων κατά μήκος της γεωμεμβράνης για διάφορες τιμές της κατακόρυφης συνιστώσας της μετακίνησης του ρήγματος.

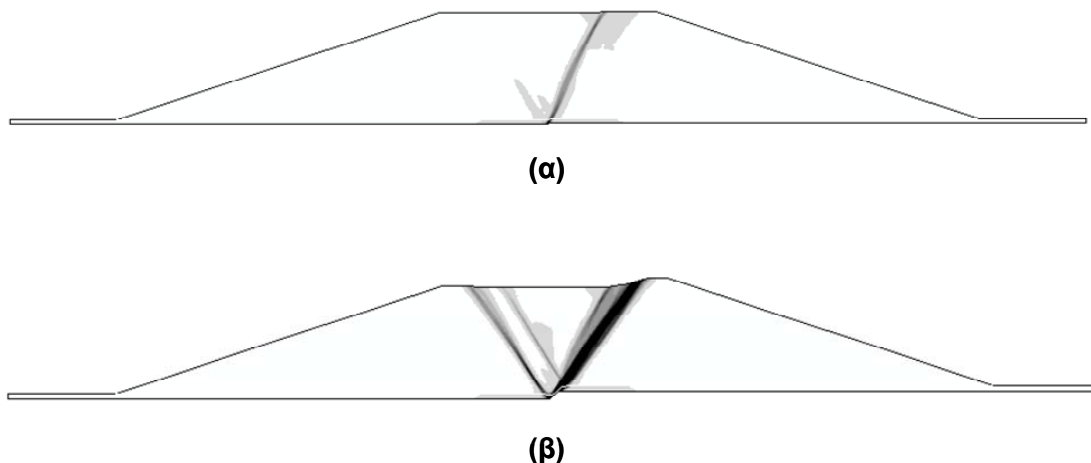


**Σχήμα 3.11.** Επίδραση της θεώρησης αρχικών συνθηκών: (α) κατανομή της κανονικοποιημένης ως προς το ύψος κατακόρυφης μετακίνησης ( $y/H$ ) συναρτήσει της κανονικοποιημένης ως προς το ύψος οριζόντιας συνιστώσας του παραμορφωμένου φορέα ( $x/H$ ), και (β) κατανομή της μέγιστης αξονικής τάσης συναρτήσει της κατακόρυφης συνιστώσας της μετακίνησης του ρήγματος.



**Σχήμα 3.12.** Κατανομή της αξονικής παραμόρφωσης κατά μήκος της γεωμεμβράνης, για διάφορα επίπεδα της κατακόρυφης συνιστώσας της μετακίνησης του ρήγματος (0.1-0.6m). Το ίχνος του ρήγματος βρίσκεται στον άξονα συμμετρίας ( $x=0m$ ).

Παρόλο που στην παρούσα διερεύνηση η μηχανική συμπεριφορά της γεωμεμβράνης θεωρείται ελαστική, στο Σχήμα 3.12 σημειώνεται και η παραμόρφωση που αντιστοιχεί στο όριο διαρροής της. Η παραμόρφωση που αντιστοιχεί στο όριο διαρροής αναπτύσσεται για πρώτη φορά για μικρή τιμή της κατακόρυφης μετακίνησης του ρήγματος και σε απόσταση περίπου ίση με 1m (ευθεία προβολή του ρήγματος) από το ίχνος του ρήγματος προς το αμετακίνητο τέμαχος. Η αύξηση των επιβαλλόμενων μετακινήσεων συμβάλλει στη διεύρυνση του τμήματος της γεωμεμβράνης που έχει υπερβεί το όριο διαρροής, ενώ για τιμή της κατακόρυφης συνιστώσας της μετακίνησης του ρήγματος ίση με 0.6m το εύρος του τμήματος αυτού είναι σχεδόν ίσο με 2m εκατέρωθεν του ίχνους του ρήγματος. Η αύξηση των αξονικών παραμορφώσεων του τμήματος της γεωμεμβράνης που κείται στο κινούμενο τέμαχος οφείλεται πιθανώς στη διάδοση της δευτερεύουσας επιφάνειας αστοχίας.



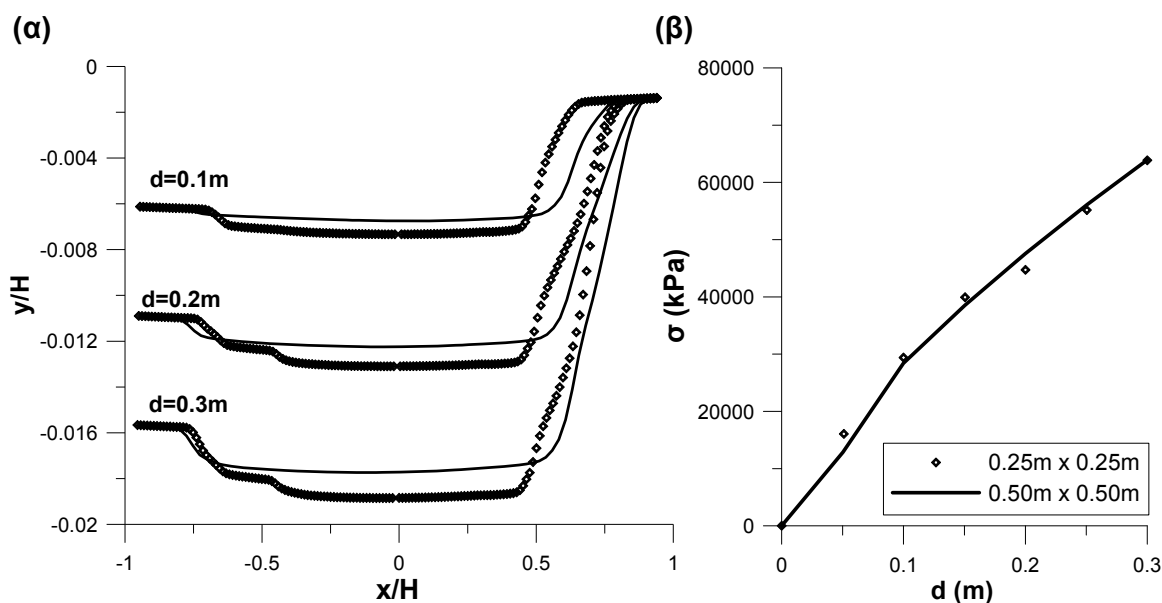
**Σχήμα 3.13.** Κατανομή των ισομεγέθων της πλαστικής παραμόρφωσης εντός του Χ.Υ.Τ.Α. για κατακόρυφη συνιστώσα της μετακίνησης ίση με: (α) 0.04m, δηλαδή την τιμή στην οποία παρατηρείται επιφανειακή εκδήλωση του ρήγματος και (β) 0.30m, δηλαδή την τιμή στην οποία αναπτύσσεται πλήρως και η δευτερογενής επιφάνεια αστοχίας.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, στον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS (2004) η εφαρμογή της υπορουτίνας επιβολής αρχικών συνθηκών είναι ιδιαιτέρως χρονοβόρα, οπότε είναι πολύ σημαντικό το γεγονός ότι η επίδρασή της προέκυψε από ασήμαντη (για τις επιφανειακές παραμορφώσεις) ως αμελητέα (για την ένταση του συστήματος στεγάνωσης). Με αυτό το σκεπτικό εξετάζεται η επίδραση της πυκνότητας της διακριτοποίησης χωρίς την εφαρμογή των αρχικών συνθηκών. Ένα νέο προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων καταστρώθηκε με τα χαρακτηριστικά που προαναφέρθηκαν, αλλά με μέγεθος πεπερασμένων στοιχείων ίσο προς 0.25m. Η επίδραση της διακριτοποίησης στη διάδοση του ρήγματος, αφορά τόσο τις απαιτούμενες μετακινήσεις



για τη διάδοση των επιφανειών αστοχίας του ρήγματος, οι οποίες μειώνονται σε 2.3cm (μέχρι το επίπεδο της γεωμεμβράνης), 4cm (μέχρι την επιφάνεια) και 30cm (για τη δευτερεύουσα επιφάνεια), όσο και τη γωνία διάδοσης της πρωτεύουσας επιφάνειας η οποία αυξάνεται στις 65°. Επιπλέον, παρατηρείται ότι σχηματίζεται και μια τρίτη επιφάνεια αστοχίας σε απόσταση περίπου 2m από το επίπεδο της γεωμεμβράνης και με κλίση παράλληλη προς αυτήν της δευτερεύουσας επιφάνειας (βλ. Σχήμα 3.13).

Αυτό γίνεται εύκολα αντιληπτό μελετώντας το Σχήμα 3.14.α, όπου παρουσιάζονται οι κανονικοποιημένες επιφανειακές μετακινήσεις για διάφορα επίπεδα της κατακόρυφης συνιστώσας της μετακίνησης και για τις δύο εξεταζόμενες περιπτώσεις διακριτοποίησης. Επιπροσθέτως, διαπιστώνεται ότι η πυκνότερη διακριτοποίηση σχετίζεται με μεγαλύτερες αναπτυσσόμενες επιφανειακές παραμορφώσεις κυρίως στην περιοχή του κατακρημνίσματος, ενώ ταυτόχρονα μειώνεται το εύρος της περιοχής των σημαντικών παραμορφώσεων το οποίο εντοπίζεται σε απόσταση ίση προς 0.75H έως 0.5H από το ίχνος του ρήγματος.



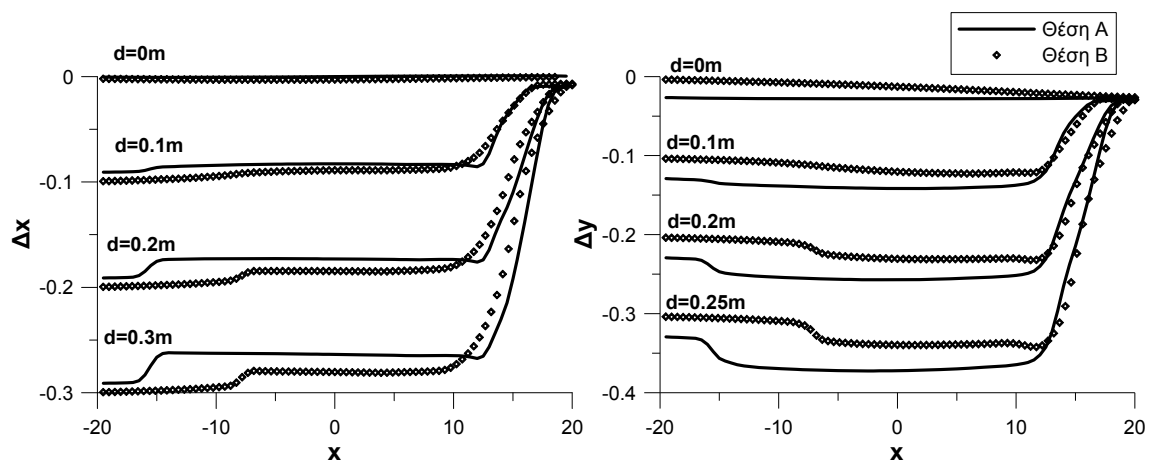
**Σχήμα 3.14.** Επίδραση της διακριτοποίησης του προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων: (α) κατανομή της κανονικοποιημένης ως προς το ύψος κατακόρυφης μετακίνησης ( $y/H$ ) συναρτήσει της κανονικοποιημένης ως προς το ύψος οριζόντιας συνιστώσας του παραμορφωμένου φορέα ( $x/H$ ), και (β) κατανομή της μέγιστης αξονικής τάσης συναρτήσει της κατακόρυφης συνιστώσας της μετακίνησης του ρήγματος.

Εν συνεχεία, εξετάζεται και η επίδραση της πυκνότητας του καννάβου στις αναπτυσσόμενες αξονικές τάσεις στη γεωμεμβράνη. Από το Σχήμα 3.14.β προκύπτει ότι η μέγιστη τιμή της αξονικής τάσης δεν επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από την

παράμετρο αυτή. Πιο συγκεκριμένα, η ποσοστιαία διαφορά μεταξύ των μέγιστων αξονικών τάσεων των δύο προσεγγίσεων λαμβάνει μέγιστη τιμή ίση με 20% για μετακίνηση του ρήγματος ίση με 5cm και μειώνεται σημαντικά για μεγαλύτερα επίπεδα μετακινήσεων. Ακόμη, η κατανομή των αξονικών παραμορφώσεων κατά μήκος της γεωμεμβράνης μεταβάλλεται, καθώς το εύρος της περιοχής ανάπτυξης σημαντικών παραμορφώσεων μειώνεται και τοποθετείται κυρίως στο αμετακίνητο τμήμαχος.

### 3.3.2 Επίδραση της θέσης του ίχνους του ρήγματος

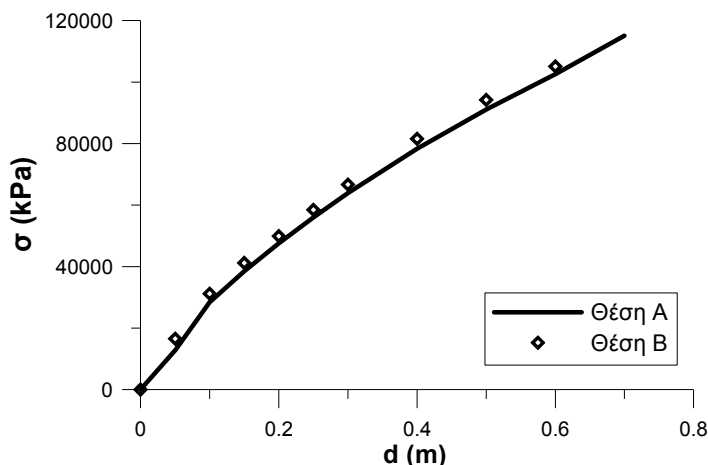
Η επίδραση της κεκλιμένης επιφάνειας των πρανών της γεωκατασκευής είναι ένα επιπλέον θέμα που διερευνήθηκε. Για τον σκοπό αυτό μορφώθηκε ένα νέο προσομοίωμα, στο οποίο θεωρήθηκε ότι το ίχνος του ρήγματος βρίσκεται στη θέση Β (βλ. Σχήμα 3.8), χωρίς να αλλάξουν τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά του προσομοιώματος. Η κατακόρυφη συνιστώσα της μετακίνησης του ρήγματος που απαιτείται για την επιφανειακή εκδήλωση του ρήγματος αυξάνει σε αυτήν την περίπτωση και επιπλέον μεταβάλλονται οι γωνίες διάδοσης των επιφανειών αστοχίας. Παρατηρώντας το Σχήμα 3.15 είναι δυνατόν να εκτιμηθεί και η επίδραση της θέσης του ίχνους του ρήγματος στην ανάπτυξη των επιφανειακών μετακινήσεων. Πιο συγκεκριμένα, οι οριζόντιες μετακινήσεις αυξάνονται, ενώ το αντίθετο ισχύει για την κατακόρυφη συνιστώσα της μετακίνησης όταν το ίχνος του ρήγματος βρίσκεται κάτω από τα πρανά στη θέση Β.



**Σχήμα 3.15.** Επίδραση της θέσης του ρήγματος: κατανομή της οριζόντιας και της κατακόρυφης συνιστώσας της μετακίνησης για τρία επίπεδα κανονικοποιημένης επιβαλλόμενης μετακίνησης του ρήγματος. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται για τις περιπτώσεις κανονικού ρήγματος 45° στις θέσεις Α και Β.

Όσον αφορά στην καταπόνηση της γεωμεμβράνης, αναπτύσσεται αξονική τάση ίση με το όριο διαρροής της για κατακόρυφη συνιστώσα της μετακίνησης του ρήγματος ίση

με 5cm. Από το Σχήμα 3.16 φαίνεται ότι η μέγιστη τιμή της αξονικής τάσης στη γεωμεμβράνη λαμβάνει ελάχιστα μεγαλύτερες τιμές στην περίπτωση που το ίχνος του ρήγματος εντοπίζεται κάτω από τα πρανή του Χ.Υ.Τ.Α., το οποίο αποτελεί ένδειξη ότι το μέγεθος της καταπόνησης του συστήματος στεγάνωσης δεν εξαρτάται από τη θέση του ίχνους του ρήγματος.



**Σχήμα 3.16.** Επίδραση της θέσης του ρήγματος: κατανομή της μέγιστης αξονικής τάσης συναρτήσει της κατακόρυφης συνιστώσας της μετακίνησης του ρήγματος.

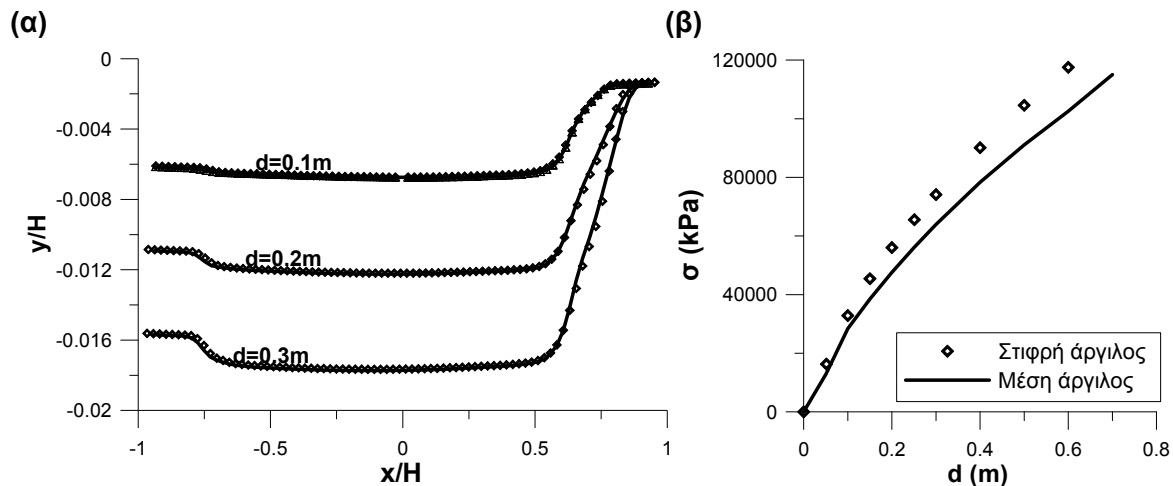
### 3.3.3 Επίδραση των ιδιοτήτων του συστήματος στεγάνωσης

Οι ιδιότητες του σύνθετου συστήματος στεγάνωσης πιθανώς επηρεάζουν τόσο το μηχανισμό της διάδοσης του τεκτονικού ρήγματος εντός της απορριμματικής μάζας, όσο και την καταπόνηση των επιμέρους συστατικών του, δηλαδή της αργλικής στρώσης και της γεωμεμβράνης. Για τον λόγο αυτό εξετάστηκαν οι εξής παράμετροι:

- σφιγρότητα της αργίλου,
- μηχανική συμπεριφορά της γεωμεμβράνης, και
- συνθήκες ολίσθησης κατά μήκος των υφιστάμενων διεπιφανειών εκατέρωθεν της γεωμεμβράνης.

Αρχικά μελετήθηκε η επίδραση της μηχανικής συμπεριφοράς της αργίλου θεωρώντας ότι η αστράγγιστη διατμητική αντοχή της είναι μεγαλύτερη σε σχέση με την αρχική θεώρηση κατά 22kPa, δηλαδή ίση με 75kPa. Όσον αφορά στον μηχανισμό διάδοσης του ρήγματος, δεν παρατηρείται επίδραση στη γωνία διάδοσης της πρωτεύουσας και της δευτερεύουσας επιφάνειας αστοχίας. Αντιθέτως, το μέγεθος της απαιτούμενης κατακόρυφης συνιστώσας της μετακίνησης του ρήγματος για τη διάδοσή του μέχρι τη γεωμεμβράνη καθώς και για την επιφανειακή εκδήλωσή του, μειώνεται σε 2.8cm και 4.9cm, αντίστοιχα. Συγκρίνοντας τις δύο εξεταζόμενες περιπτώσεις οι

αναπτυσσόμενες επιφανειακές παραμορφώσεις παρουσιάζουν αμελητέα διαφοροποίηση (βλ. Σχήμα 3.17α). Αντιθέτως, οι μέγιστες αξονικές τάσεις στη γεωμεμβράνη αυξάνονται αρκετά για την περίπτωση της στιφρής αργίλου, ενώ αντίστοιχα το μέγεθος της κατακόρυφης συνιστώσας της μετακίνησης που απαιτείται για την ανάπτυξη τάσης ίσης με το όριο διαρροής μειώνεται στα 5cm (βλ. Σχήμα 3.17β).



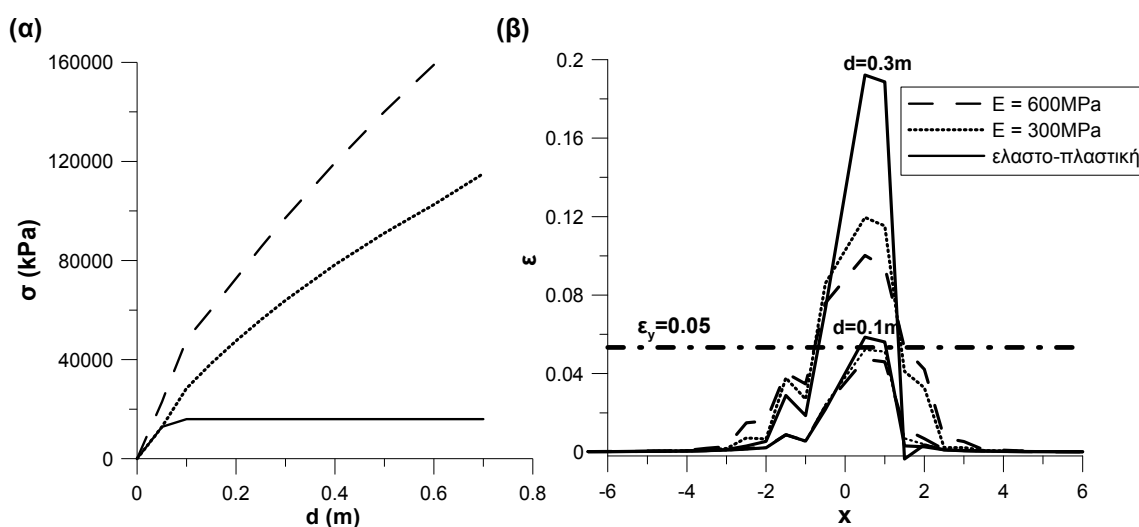
**Σχήμα 3.17.** Επίδραση της στιφρότητας του αργλικού φραγμού: (α) κατανομή της κανονικοποιημένης ως προς το ύψος κατακόρυφης μετακίνησης ( $y/H$ ) συναρτήσει της κανονικοποιημένης ως προς το ύψος οριζόντιας συνιστώσας του παραμορφωμένου φορέα ( $x/H$ ), και (β) κατανομή της μέγιστης αξονικής τάσης συναρτήσει της κατακόρυφης συνιστώσας της μετακίνησης του ρήγματος.

Στη συνέχεια εξετάστηκε η επίδραση των μηχανικών χαρακτηριστικών της γεωμεμβράνης. Πιο συγκεκριμένα, συγκρίθηκαν τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων για το αριθμητικό προσομοίωμα που έχει ήδη περιγραφεί θεωρώντας τις εξής περιπτώσεις:

- μέτρο ελαστικότητας ίσο με 300MPa,
- μέτρο ελαστικότητας ίσο με 600MPa, και
- ελαστο-πλαστική συμπεριφορά με μέτρο ελαστικότητας ίσο με 300MPa και όριο διαρροής ( $\sigma_y$ ) ίσο με 16MPa.

Εν γένει, ο μηχανισμός διάδοσης του ρήγματος, δηλαδή η απαιτούμενη μετακίνηση για την επιφανειακή εκδήλωση του ρήγματος και η γωνία διάδοσης της πρωτεύουσας και δευτερεύουσας επιφάνειας αστοχίας, δεν επηρεάζεται από τις μηχανικές ιδιότητες της γεωμεμβράνης. Αντιθέτως, η καταπόνηση της γεωμεμβράνης φαίνεται ότι καθορίζεται από τις μηχανικές ιδιότητές της (βλ. Σχήμα 3.18). Αρχικώς, η αύξηση του μέτρου ελαστικότητας της γεωμεμβράνης συντελεί στην αύξηση των μέγιστων αναπτυσσόμενων αξονικών τάσεων, γεγονός αναμενόμενο αφού η διάρρηξη τεκτονικού

ρήγματος είναι πρόβλημα επιβαλλόμενων παραμορφώσεων. Η κατανομή των αξονικών παραμορφώσεων δείχνει ότι δεν ταυτίζονται τα αποτελέσματα των δύο εξεταζόμενων περιπτώσεων του μέτρου ελαστικότητας για την ελαστική συμπεριφορά, ιδιαίτερα για μεγαλύτερες τιμές της κατακόρυφης συνιστώσας της μετακίνησης του ρήγματος. Το γεγονός αυτό πιθανώς να οφείλεται στην έντονη ανάπτυξη πλαστικών παραμορφώσεων στο περιβάλλον έδαφος. Η θεώρηση ελαστο-πλαστικής συμπεριφοράς της γεωμεμβράνης, η οποία πρέπει να σημειωθεί ότι είναι και πιο ρεαλιστική συγκριτικά με την ελαστική θεώρηση, δείχνει ότι το όριο διαρροής αναπτύσσεται για 5.6cm της κατακόρυφης συνιστώσας της μετακίνησης του ρήγματος.



**Σχήμα 3.18.** Επίδραση της μηχανικής συμπεριφοράς της γεωμεμβράνης: (α) κατανομή της μέγιστης αξονικής τάσης συναρτήσει της κατακόρυφης συνιστώσας της μετακίνησης του ρήγματος, και (β) κατανομή της αξονικής παραμόρφωσης της γεωμεμβράνης κατά μήκος της, για διάφορα επίπεδα της κατακόρυφης συνιστώσας της μετακίνησης του ρήγματος (0.1 και 0.3m).

Οι αξονικές παραμορφώσεις αυξάνονται σημαντικά με την αύξηση της επιβαλλόμενης μετακίνησης, όπως άλλωστε φαίνεται και στο Σχήμα 3.18β, ενώ η μέγιστη αξονική παραμόρφωση λαμβάνει τιμή ίση με 20% και 100% για κατακόρυφη συνιστώσα της μετακίνησης του ρήγματος ίση με 0.3m και 0.7m αντίστοιχα. Σε αυτό το σημείο πρέπει να σημειωθεί ότι η παραμόρφωση θραύσης μιας HDPE γεωμεμβράνης μπορεί να λαμβάνει τιμές που κυμαίνονται από 300% έως 500% (Koerner, 1994).

Ένα επιπλέον χαρακτηριστικό του σύνθετου συστήματος στεγάνωσης είναι ότι η τοποθέτηση της γεωμεμβράνης στεγάνωσης καθορίζει δύο διεπιφάνειες, οι οποίες ενδέχεται να χαρακτηρίζονται από χαμηλές τιμές διατμητικής αντοχής. Στο Κεφάλαιο 2 έχουν αναφερθεί εκτενώς οι περιπτώσεις των διαμορφούμενων διεπιφανειών εντός του

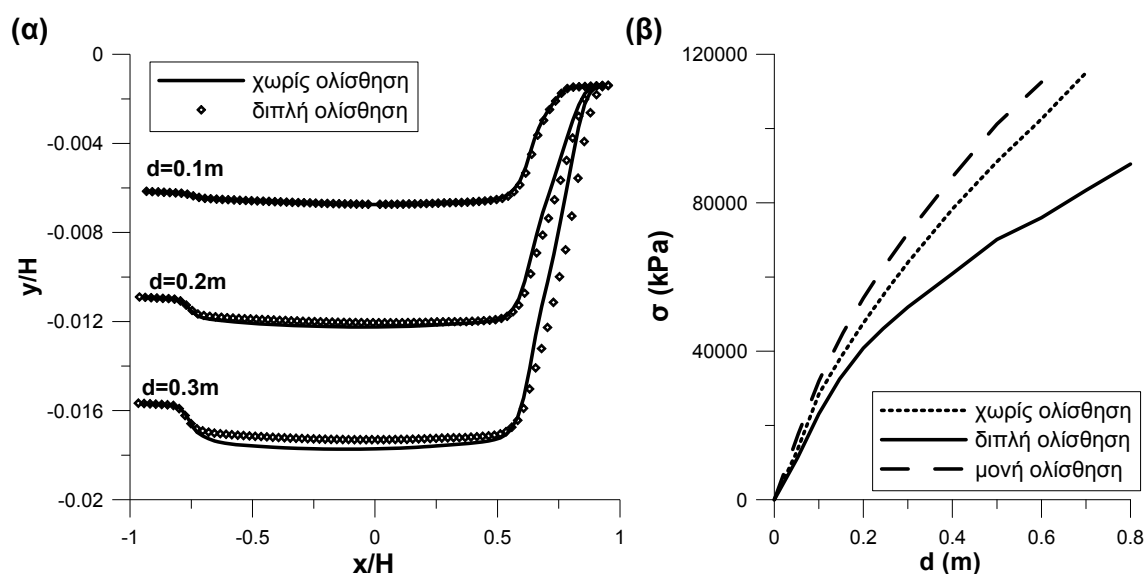
σύνθετου συστήματος στεγάνωσης και του συστήματος συλλογής στραγγίσματος, καθώς και οι τιμές των παραμέτρων διατμητικής αντοχής τους. Στην παρούσα διερεύνηση μελετήθηκαν τρεις διαφορετικές συνθήκες για τις δύο διεπιφάνειες που υφίστανται στο εξεταζόμενο προσομοίωμα:

- χωρίς δυνατότητα ολίσθησης κατά μήκος των δύο διεπιφανειών, δηλαδή πολύ μεγάλη διατμητική αντοχή των δύο διεπιφανειών
- με δυνατότητα ανάπτυξης ολίσθησης κατά μήκος της άνω διεπιφάνειας, η διατμητική αντοχή της οποίας χαρακτηρίζεται από γωνία τριβής ίση με  $9^\circ$
- με δυνατότητα ανάπτυξης ολίσθησης κατά μήκος και των δύο διεπιφανειών, η διατμητική αντοχή των οποίων χαρακτηρίζεται από γωνία τριβής ίση με  $9^\circ$  και  $12^\circ$  για την άνω και κάτω διεπιφάνεια εκατέρωθεν της γεωμεμβράνης αντίστοιχα.

Οι ανωτέρω περιπτώσεις πραγματοποιήθηκαν τροποποιώντας το προσομοίωμα που έχει διαμορφωθεί ώστε η διατμητική αντοχή της εκάστοτε διεπιφάνειας να χαρακτηρίζεται από τριβή τύπου Coulomb με τις τιμές που προαναφέρθηκαν. Εν γένει θεωρήθηκε ότι η άνω διεπιφάνεια έχει μικρότερη διατμητική αντοχή από την αντίστοιχη της κατώτερης, θεωρώντας ότι υφίσταται και γεωύφασμα για την προστασία της γεωμεμβράνης πριν την κατασκευή του συστήματος συλλογής στραγγίσματος. Ο μηχανισμός διάδοσης της τεκτονικής διάρρηξης, δηλαδή οι γωνίες διάδοσης της πρωτεύουσας και της δευτερεύουσας επιφάνειας αστοχίας, δεν επηρεάζεται από τις διαφορετικές συνθήκες στις διεπιφάνειες. Όμως, παρατηρείται ότι για την περίπτωση της διπλής ολίσθησης η κατακόρυφη συνιστώσα της μετακίνησης που απαιτείται για τη διάδοση του ρήγματος μέχρι τη γεωμεμβράνη και μέχρι την επιφάνεια είναι ελαφρώς μειωμένες σε σύγκριση με τις άλλες δύο περιπτώσεις. Επιπλέον, παρατηρείται ότι οι επιφανειακές παραμορφώσεις που αναπτύσσονται λόγω της διάδοσης της διάρρηξης μειώνονται λόγω της διπλής ολίσθησης (βλ. Σχήμα 3.19).

Ο μηχανισμός ανάπτυξης της ολίσθησης κατά μήκος της εκάστοτε διεπιφάνειας είναι αρκετά σύνθετος καθώς σχετίζεται με τις επιβαλλόμενες διατμητικές και ορθές τάσεις, την αξονική τάση της γεωμεμβράνης και τη σχετική διατμητική αντοχή των διεπιφανειών. Για μικρές τιμές της κατακόρυφης συνιστώσας της μετακίνησης ( $<0.25\text{m}$ ) η ολίσθηση αναπτύσσεται κατά μήκος της κατώτερης διεπιφάνειας, παρόλο που χαρακτηρίζεται από μεγαλύτερη διατμητική αντοχή, πιθανώς λόγω της αξονικής τάσης της γεωμεμβράνης. Καθώς μεγαλώνει η μετακίνηση του ρήγματος αρχίζει να αναπτύσσεται ολίσθηση και κατά μήκος της ανώτερης διεπιφάνειας, το μέγεθος της

οποίας πάντως λαμβάνει μικρότερες τιμές συγκριτικά με της κατώτερης διεπιφάνειας. Παρατηρήθηκε επίσης, ότι η ευεργετική επίδραση της διπλής ολίσθησης στις επιφανειακές παραμορφώσεις, επεκτείνεται και στην ένταση της γεωμεμβράνης. Παρατηρώντας το Σχήμα 3.19β, γίνεται αντιληπτό ότι αφενός η δυνατότητα ολίσθησης κατά μήκος μόνο της άνω διεπιφάνειας επιφέρει αύξηση στη μέγιστη αξονική τάση, αφετέρου η ανάπτυξη διπλής ολίσθησης σχετίζεται με μείωση της αναπτυσσόμενης αξονικής τάσης στη γεωμεμβράνη. Η ευεργετική επίδραση της διπλής ολίσθησης είναι πιο έντονη για μετακινήσεις του ρήγματος που ξεπερνούν τα 20cm.



**Σχήμα 3.19.** Επίδραση των συνθηκών ολίσθησης: (α) κατανομή της κανονικοποιημένης ως προς το ύψος κατακόρυφης μετακίνησης ( $y/H$ ) συναρτήσει της κανονικοποιημένης ως προς το ύψος οριζόντιας συνιστώσας του παραμορφωμένου φορέα ( $x/H$ ), και (β) κατανομή της μέγιστης αξονικής τάσης στη γεωμεμβράνη συναρτήσει της κατακόρυφης συνιστώσας της μετακίνησης του ρήγματος.

### 3.3.4 Συμπεράσματα

Η προηγηθείσα διερεύνηση της καταπόνησης του σύνθετου συστήματος στεγάνωσης έδειξε σημαντικά στοιχεία της συμπεριφοράς ενός Χ.Υ.Τ.Α. υπό επιβαλλόμενες μόνιμες παραμορφώσεις. Αρχικά προσδιορίστηκαν οι βασικοί τύποι βλάβης ενός Χ.Υ.Τ.Α. που μπορεί να αναπτυχθούν εξαιτίας της ενεργοποίησης ενός σεισμικού ρήγματος στην περιοχή θεμελίωσης ενός Χ.Υ.Τ.Α., οι οποίοι κατηγοριοποιούνται ως εξής:

- στάθμη βλάβης 1: αστοχία της αργιλικής στρώσης λόγω ανάπτυξης πλαστικών παραμορφώσεων,
- στάθμη βλάβης 2: αστοχία της γεωμεμβράνης στεγάνωσης, για μέγιστη αξονική τάση ίση με το όριο διαρροής της,

- στάθμη βλάβης 3: αστοχία της απορριμματικής μάζας λόγω της επιφανειακής εκδήλωσης του ρήγματος,
- στάθμη βλάβης 4: αστοχία του συστήματος τελικής κάλυψης λόγω ανάπτυξης σημαντικών επιφανειακών παραμορφώσεων.

Οι στάθμες βλάβης που προτείνονται βασίζονται αφενός μεν στα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων, αφετέρου δε στις βασικές αρχές σχεδιασμού των Χ.Υ.Τ.Α. Πιο συγκεκριμένα, ως όριο για την αστοχία της γεωμεμβράνης ορίζεται το όριο διαρροής όπως άλλωστε και για τους λοιπούς ελέγχους σχεδιασμού της και όχι κάποιο επιτρεπόμενο επίπεδο της αξονικής παραμόρφωσης, αν και οι HDPE γεωμεμβράνες έχουν μεγάλη δυνατότητα ανάπτυξης πλαστικών παραμορφώσεων πριν να φθάσουν στη θραύση τους (Sharma and Lewis, 1994). Επίσης, η καταπόνηση του συστήματος τελικής κάλυψης δεν περιλαμβάνεται στα θέματα προς διερεύνηση, καθώς οι υπόλοιποι τύποι αστοχίας προηγούνται, και μάλιστα θεωρούνται πιο κρίσιμοι λόγω των δυσμενών περιβαλλοντικών επιπτώσεων που ενέχει το ενδεχόμενο εκδήλωσής τους. Η συγκεκριμένη περίπτωση ορίζεται ως στάθμη βλάβης μόνο για την πληρέστερη κάλυψη των δυνατών περιπτώσεων.

Από την παραμετρική διερεύνηση που προηγήθηκε προέκυψε ότι από τις παραδοχές τις αριθμητικής προσομοίωσης, η πιο σημαντική στην εκτίμηση των ανωτέρω σταθμών βλαβών είναι η πυκνότητα της διακριτοποίησης. Αντιθέτως, η θέση εκδήλωσης του ρήγματος αποδείχτηκε ότι δεν επηρεάζει σημαντικά την καταπόνηση του σύνθετου συστήματος στεγάνωσης. Τέλος, από τις ιδιότητες του συστήματος στεγάνωσης προέκυψε ότι η στιφρότητα της αργίλου, η ελαστο-πλαστική συμπεριφορά της γεωμεμβράνης και η θεώρηση της διπλής ολίσθησης έχουν τη μεγαλύτερη επίδραση στην καταπόνηση του συστήματος στεγάνωσης.

### **3.4 ΜΕΤΡΑ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΕΝΑΝΤΙ ΤΕΚΤΟΝΙΚΗΣ ΔΙΑΡΡΗΞΗΣ**

Κατά την ανάλυση της καταπόνησης του Χ.Υ.Τ.Α. λόγω ενεργοποίησης υποκείμενου ρήγματος διαπιστώθηκε ότι απαιτούνται μικρές τιμές της κατακόρυφης συνιστώσας της μετακίνησης του ρήγματος, της τάξης των μερικών εκατοστών, για την ανάπτυξη των τριών πρώτων σταθμών βλάβης που ορίστηκαν στην προηγούμενη ενότητα. Όμως τέτοια (σχετικά μικρά) επίπεδα μετακινήσεων ρηγμάτων έχουν συσχετιστεί με σεισμικά γεγονότα που χαρακτηρίζονται από μέγεθος μικρότερο από  $M=5.5$ , ενώ για  $M=6.5$  η



μετακίνηση ενός κανονικού ρήγματος φτάνει το 1m (Wells and Coppersmith, 1994), γεγονός που υποδηλώνει ότι υφίσταται με μεγάλη πιθανότητα το ενδεχόμενο ανάπτυξης μετακινήσεων ικανών να υπερβούν τα όρια των μικρότερων σταθμών βλαβών. Προκειμένου να διασφαλιστεί η επάρκεια του συστήματος στεγάνωσης για την περίπτωση γειννίας του Χ.Υ.Τ.Α. με ρήγματα τα οποία ενδέχεται να αναπτύξουν μετακινήσεις μεγαλύτερες των ανεκτών ορίων, θα πρέπει να ληφθούν κατάλληλα μέτρα προστασίας.

Η παρακάτω διερεύνηση αφορά στην αποτελεσματικότητα διαφόρων μέτρων προστασίας, έναντι κυρίως των σταθμών βλάβης 1 και 2. Αρχικά εξετάζεται μία σειρά εναλλακτικών σεναρίων τα οποία χρησιμοποιούν σε διάφορους συνδυασμούς τα υλικά του συστήματος στεγάνωσης, δηλαδή αργιλικό εδαφικό υλικό και γεωμεμβράνη, για πρακτικούς κατασκευαστικούς λόγους. Η χρήση της γεωμεμβράνης στεγάνωσης ως μέτρο προστασίας, αντί οποιουδήποτε άλλου τύπου γεωσυνθετικού, επιλέγεται και για έναν επιπρόσθετο λόγο. Έπειτα από παρατηρήσεις πεδίου στον σεισμό Landers (Καλιφόρνια, 1992) αναφέρθηκε η περίπτωση μίας πλάκας θεμελίωσης, ένα τμήμα της οποίας είχε τοποθετηθεί επί πλαστικού φύλλου και συμπεριφέρθηκε ικανοποιητικά εν συγκρίσει με το υπόλοιπο μέρος της που αστόχησε (Bray, 2001). Η συμπεριφορά αυτή αποδόθηκε στην ικανότητα της πλαστικής επιφάνειας να αποδεσμεύσει τις διατμητικές τάσεις, οι οποίες μεταβιβάζονται από το έδαφος στην πλάκα θεμελίωσης.

Επιπροσθέτως, ελέγχθηκε η αποτελεσματικότητα ενός οπλισμένου τεχνητού αναχώματος στη βάση του Χ.Υ.Τ.Α. όσον αφορά στη μείωση των επιβαλλόμενων παραμορφώσεων, ενώ εξετάστηκε παραμετρικά η επίδραση του ύψους της εδαφικής στρώσης, του πλήθους και της αντοχής των γεωσυνθετικών οπλισμών, καθώς και του υπερκείμενου φορτίου. Η παραμετρική διερεύνηση διεξήχθη για την περίπτωση κανονικού ρήγματος με γωνία βύθισης ίση με 45°, όπως άλλωστε και στη σχετική διερεύνηση της καταπόνησης του συστήματος στεγάνωσης.

### **3.4.1 Μέτρα βασιζόμενα στην βελτίωση του συστήματος στεγάνωσης**

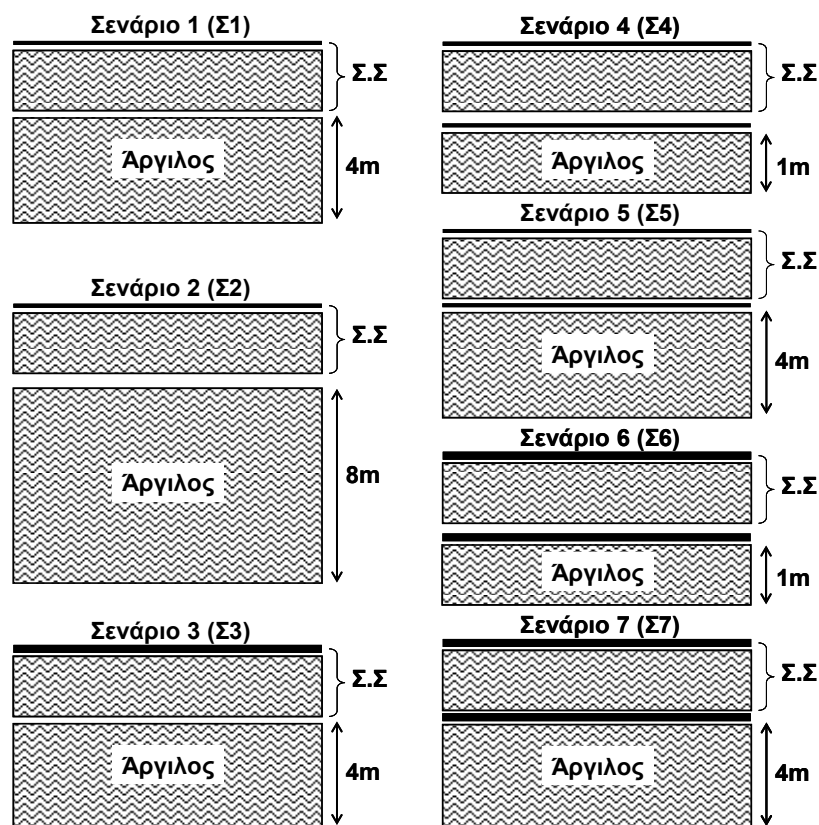
Μία αριθμητική ανάλυση «αναφοράς» προηγήθηκε του ελέγχου των πιθανών μέτρων προστασίας, βάσει της οποίας θα εκτιμηθεί και η αποτελεσματικότητα της κάθε εναλλακτικής πρότασης. Το εν λόγω αριθμητικό προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων διαμορφώθηκε λαμβάνοντας υπόψη τα αποτελέσματα της προηγούμενης ενότητας θεωρώντας την ίδια γεωμετρία Χ.Υ.Τ.Α.. Συγκεκριμένα δεν ελήφθη υπόψη ο μηδενισμός

των στατικών παραμορφώσεων και αναπτύχθηκε πυκνή διακριτοποίηση με μέγεθος στοιχείου 0.25m. Επιπλέον, υιοθετήθηκαν οι εξής παραδοχές σε σχέση με τη μηχανική συμπεριφορά του συστήματος στεγάνωσης: (α) η αργλική στρώση είναι μέσης στιφρότητας, (β) η σχέση τάσεων-παραμορφώσεων της γεωμεμβράνης είναι ελαστο-πλαστική με όριο διαρροής ( $\sigma_y$ ) ίσο με 16MPa και μέτρο ελαστικότητας 300MPa, και (γ) η διατμητική αντοχή των δύο διεπιφανειών εκατέρωθεν της γεωμεμβράνης λαμβάνει πεπερασμένη τιμή, δηλαδή η άνω διεπιφάνεια χαρακτηρίζεται από γωνία τριβής ίση με 9° ενώ η κατώτερη με 12°.

Τα γενικά χαρακτηριστικά της διάδοσης της τεκτονικής διάρρηξης περιγράφηκαν αναλυτικά στην προηγούμενη ενότητα. Σε σχέση με την απαιτούμενη κατακόρυφη συνιστώσα της μετακίνησης που απαιτείται για την ανάπτυξη των διαφόρων σταθμών βλάβης, παρατηρείται ότι μόλις 2.4cm και 3.7cm αρκούν για την διάρρηξη της στρώσης αργίλου πάχους 1m και για την επιφανειακή εκδήλωση της διάρρηξης αντίστοιχα, ενώ για την ανάπτυξη τάσης ίσης με το όριο διαρροής στη γεωμεμβράνη η τιμή αυτή είναι 6.4cm. Η ολίσθηση αναπτύσσεται κατά κύριο λόγο στην κατώτερη διεπιφάνεια, και δεν λαμβάνει μεγάλες τιμές. Συγκεκριμένα, υπολογίστηκαν 2cm ολίσθησης για κατακόρυφη συνιστώσα της μετακίνησης του ρήγματος ίση με 20cm. Επιπλέον, όσον αφορά την ένταση στη γεωμεμβράνη παρατηρείται ότι η μέγιστη αξονική τάση και παραμόρφωση εντοπίζεται στο τμήμα της γεωμεμβράνης που κείται προς το αμετακίνητο τέμαχος, και ακόμη ότι η παραμόρφωση μηδενίζεται σε μικρή απόσταση από το ίχνος του ρήγματος, η οποία είναι περίπου ίση με 2m. Στο σημείο αυτό πρέπει να τονιστεί ότι η θέση της μέγιστης αξονικής τάσης έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον για την κατασκευή της στεγάνωσης, αφού μπορεί να αποτελέσει κριτήριο για την ορθή τοποθέτηση των ραφών που συνδέουν τα επιμέρους τμήματα της γεωμεμβράνης.

Τα εξεταζόμενα μέτρα προστασίας του σύνθετου συστήματος στεγάνωσης έναντι της καταπόνησης που προκαλείται κατά τη διάρρηξη ενός τεκτονικού ρήγματος περιλαμβάνουν την αύξηση του πάχους της αργλικής στρώσης κατά επιπλέον 4m και 8m (Σενάρια 1 και 2), την αύξηση του πάχους της υφιστάμενης γεωμεμβράνης (σε 3mm) σε συνδυασμό με την αύξηση του πάχους της αργλικής στρώσης κατά 4m (Σενάριο 3), την προσθήκη επιπλέον γεωμεμβράνης με αργλική στρώση πάχους 1m και 4m (Σενάρια 4 και 5), και αύξηση του πάχους των γεωμεμβρανών των δύο τελευταίων περιπτώσεων σε 3mm (Σενάρια 6 και 7). Οι εξεταζόμενες περιπτώσεις παριστάνονται σχηματικά στο Σχήμα 3.20, ενώ πρέπει να σημειωθεί ότι η διάδοση της τεκτονικής διάρρηξης

υπολογίζεται αριθμητικά για το εκάστοτε εφαρμοζόμενο σενάριο, έπειτα από την κατάστρωση ενός νέου προσομοιώματος το οποίο βασίζεται στις παραδοχές που αναφέρθηκαν προηγουμένως όσον αφορά στη διακριτοποίηση, τη διαδικασία της ανάλυσης, τις μηχανικές ιδιότητες των υλικών (αργίλου και γεωμεμβράνης) και τις συνθήκες των διεπιφανειών (γωνίες τριβής).

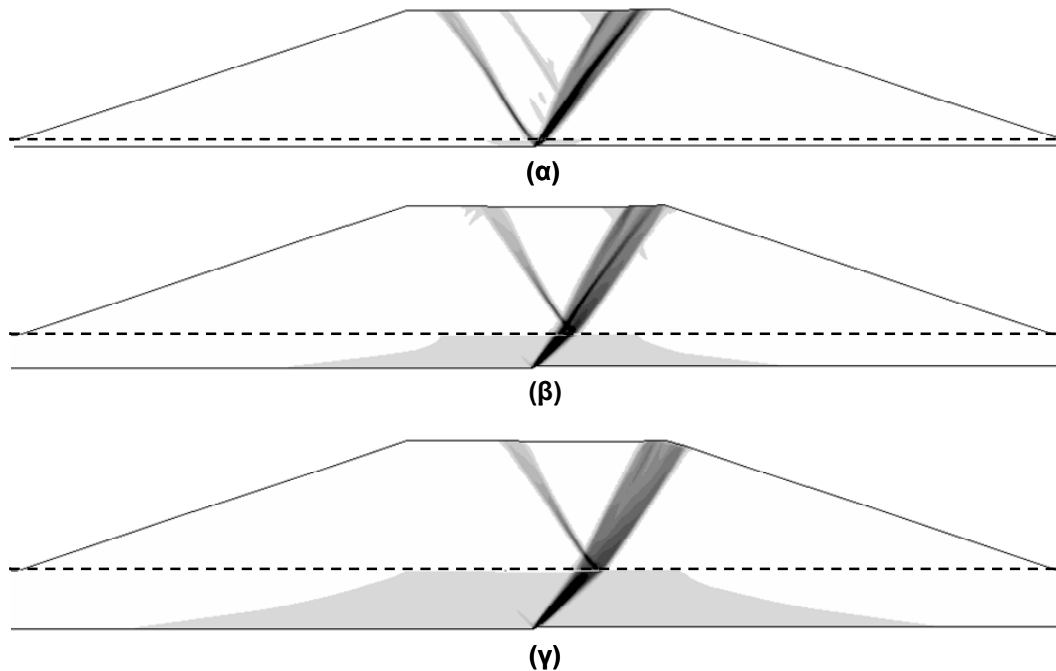


**Σχήμα 3.20.** Εξεταζόμενα εναλλακτικά σενάρια μέτρων προστασίας Χ.Υ.Τ.Α. έναντι τεκτονικής διάρρηξης.

### Ενίσχυση της αργιλικής εδαφικής στρώσης

Αρχικά, εξετάστηκε η επίδραση της αύξησης της αργιλικής στρώσης κατά τη διάδοση της τεκτονικής διάρρηξης. Το πρώτο εξεταζόμενο Σενάριο (Σ1) αφορά στην προσθήκη 4m επιπλέον αργιλικού φραγμού. Εν γένει παρατηρείται ότι, η διεύθυνση διάδοσης της πρωτεύουσας επιφάνειας αστοχίας δεν μεταβάλλεται, ενώ η απαιτούμενη κατακόρυφη συνιστώσα της μετακίνησης του ρήγματος για διάδοση του ρήγματος εντός του αργιλικού φραγμού αυξάνεται κατά 1.3cm. Η δευτερεύουσα επιφάνεια αστοχίας όμως δεν ξεκινά από το ίχνος του ρήγματος, αλλά σε κατακόρυφη απόσταση περίπου ίση με 2m από την στάθμη της γεωμεμβράνης και με γωνία διάδοσης περίπου ίση με την αντίστοιχη της περίπτωσης μη εφαρμογής μέτρων προστασίας (βλ. Σχήμα 3.21). Οι

αναπτυσσόμενες επιφανειακές παραμορφώσεις μειώνονται λόγω της αύξησης του πάχους της αργλικής στρώσης, το οποίο αποδίδεται κυρίως στην αύξηση του συνολικού ύψους του εδαφικού και απορριμματικού υλικού εντός του οποίου διαδίδεται η τεκτονική διάρρηξη. Μια επιπρόσθετη συνέπεια της εφαρμογής του εξεταζόμενου μέτρου προστασίας (Σ1) είναι η μείωση της αναπτυσσόμενης ολίσθησης, η οποία είναι της τάξης των μερικών χιλιοστών, λόγω της επιβαλλόμενης μετακίνησης του ρήγματος. Επίσης παρατηρήθηκε ότι η σχετική ολίσθηση λαμβάνει χώρα μόνο κατά μήκος της ανώτερης διεπιφάνειας και πιο συγκεκριμένα στο τμήμα της που εντοπίζεται στην πλευρά του αμετακίνητου τεμάχους.

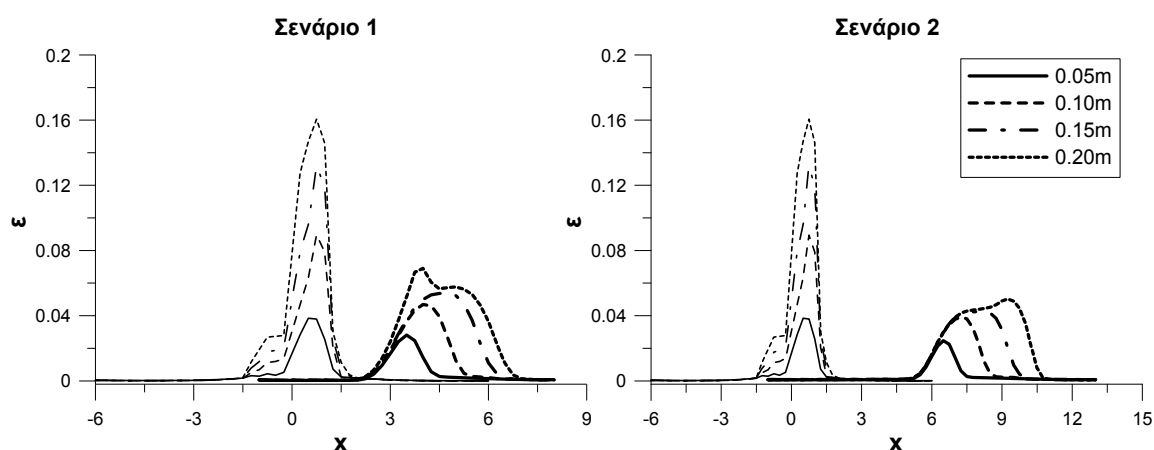


**Σχήμα 3.21.** Επίδραση του πάχους της υποκείμενης αργλικής στρώσης: επιφάνειες αστοχίας μέσω των ισομεγέθων της πλαστικής παραμόρφωσης για κατακόρυφη συνιστώσα της μετακίνησης ίση με 0.2m και τις περιπτώσεις: (α) μη εφαρμογή μέτρων προστασίας, (β) Σενάριο 1, και (γ) Σενάριο 2. Με διακεκομμένη γραμμή σημειώνεται η θέση της γεωμεμβράνης.

Όσον αφορά στην καταπόνηση της γεωμεμβράνης, αποδείχτηκε ότι για τιμή της κατακόρυφης συνιστώσας της μετακίνησης του ρήγματος ίση με 14.2cm η μέγιστη αξονική τάση στη γεωμεμβράνη είναι ίση με το όριο διαρροής της, δηλαδή κατά περίπου 8cm αυξημένη σε σχέση με την αντίστοιχη τιμή που υπολογίστηκε για την περίπτωση μη εφαρμογής μέτρων προστασίας. Ακόμη, μέγιστη αξονική παραμόρφωση ίση με 20% αναπτύσσεται για κατακόρυφη συνιστώσα της μετακίνησης του ρήγματος ίση με 35cm. Επιπλέον, η μέγιστη αξονική παραμόρφωση της γεωμεμβράνης εντοπίζεται

σε οριζόντια απόσταση ίση με 4m από το ίχνος του ρήγματος, δηλαδή σχεδόν επί της ευθείας προβολής του ρήγματος (βλ. Σχήμα 3.22).

Περαιτέρω αύξηση της στρώσης του αργιλικού φραγμού (Σενάριο 2) δεν συνιστά σημαντική αύξηση της απαιτούμενης κατακόρυφης συνιστώσας της μετακίνησης του ρήγματος για την πλήρη διάρρηξη της αργιλικής στρώσης. Όσον αφορά στη διεύθυνση των επιφανειών αστοχίας, παρατηρείται ότι εντός της αργιλικής στρώσης η πρωτεύουσα επιφάνεια έχει μικρότερη γωνία διάδοσης ( $55^\circ$ ) σε σχέση με την αντίστοιχη εντός του απορριμματικού υλικού ( $65^\circ$ ), ενώ παρομοίως με το Σενάριο 1 η δευτερεύουσα επιφάνεια διαδίδεται πάνω από τη γεωμεμβράνη σε ύψος περίπου ίσο με 2m (βλ Σχήμα 3.21).



**Σχήμα 3.22.** Επίδραση του πάχους της αργιλικής στρώσης: κατανομή της αξονικής παραμόρφωσης της γεωμεμβράνης κατά μήκος της, για διάφορα επίπεδα της κατακόρυφης συνιστώσας της μετακίνησης του ρήγματος (0.05-0.2m). Το ίχνος του ρήγματος εντοπίζεται για  $x=0$ m. Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του Σεναρίου 1 (Σ1) και του Σεναρίου 2 (Σ2) με έντονες γραμμές σε σύγκριση με τα αντίστοιχα που προκύπτουν χωρίς την εφαρμογή μέτρων προστασίας.

Το Σενάριο 2 είναι πιο αποτελεσματικό από το Σενάριο 1 για τη μείωση της καταπόνησης της γεωμεμβράνης, καθώς για τιμή της κατακόρυφης συνιστώσας της μετακίνησης ίση με 21.2cm η μέγιστη αξονική τάση στη γεωμεμβράνη είναι ίση με το όριο διαρροής της, δηλαδή είναι αυξημένη κατά περίπου 7cm σε σύγκριση με την αντίστοιχη που υπολογίστηκε για την περίπτωση του Σεναρίου 1. Η μέγιστη αξονική παραμόρφωση παρατηρείται αρχικά σε απόσταση ίση με 9m από το ίχνος του ρήγματος, δηλαδή επί της ευθείας προβολής του ρήγματος και περαιτέρω αύξηση της επιβαλλόμενης μετακίνησης επιφέρει την αστοχία σε μεγαλύτερο τμήμα της γεωμεμβράνης. Εν γένει οι αναπτυσσόμενες αξονικές παραμορφώσεις διατηρούνται σε χαμηλότερα επίπεδα συγκριτικά με το Σενάριο 1 όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.22,

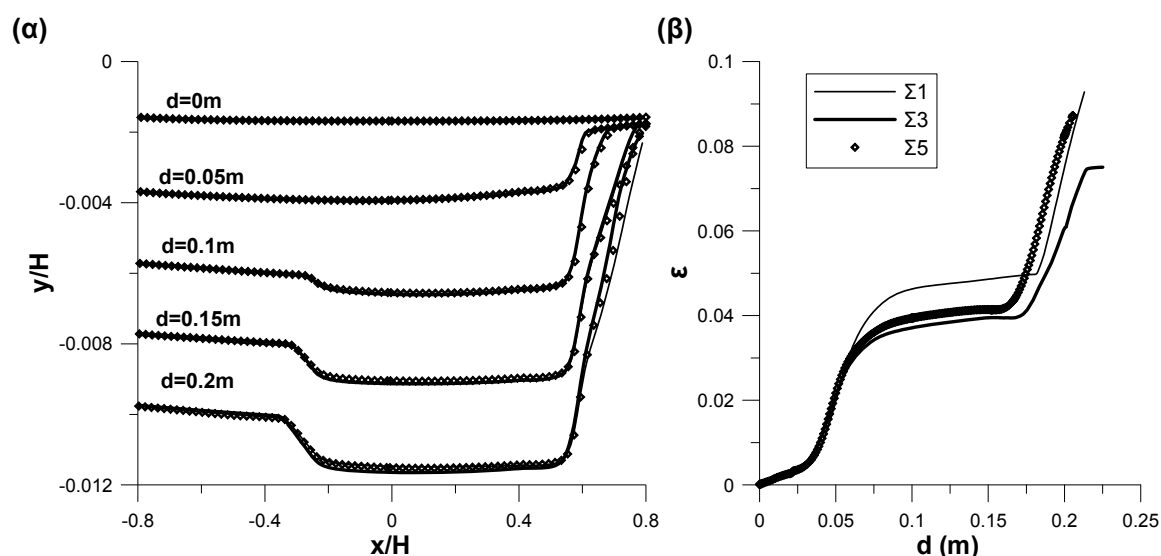
όπου παρουσιάζονται οι κατανομές των αξονικών παραμορφώσεων κατά μήκος της γεωμεμβράνης για διάφορα επίπεδα της κατακόρυφης συνιστώσας της μετακίνησης του ρήγματος για τα δύο εξεταζόμενα σενάρια (Σ1, Σ2) και για τη μη εφαρμογή μέτρων προστασίας.

### **Ενίσχυση της γεωμεμβράνης στεγάνωσης**

Η εφαρμογή των μέτρων προστασίας που βασίζονται στην ενίσχυση της γεωμεμβράνης στεγάνωσης εξετάζεται με δύο τρόπους: (α) αύξηση του πάχους της γεωμεμβράνης, και (β) προσθήκη μίας επιπλέον γεωμεμβράνης. Οι προαναφερθείσες τροποποιήσεις εφαρμόστηκαν αρχικά στο πρώτο σενάριο, δηλαδή με επιπλέον στρώση αργίλου πάχους 4m και προέκυψαν τα Σενάρια 3 και 5. Για τις περιπτώσεις αυτές παρατηρείται ότι, ούτε η αύξηση του πάχους της γεωμεμβράνης ούτε η προσθήκη της επιπλέον γεωμεμβράνης επιδρούν στον μηχανισμό διάδοσης της διάρρηξης, δηλαδή στη διεύθυνση διάδοσης της διάρρηξης και την απαιτούμενη μετακίνηση για τη επιφανειακή εκδήλωση του ρήγματος.

Στο Σχήμα 3.23.α παρουσιάζονται οι κατανομές της κανονικοποιημένης μετακίνησης για τις τρεις περιπτώσεις (Σ1, Σ3 και Σ5) και φαίνεται ότι η εφαρμογή των σεναρίων Σ3 και Σ5 έχει πολύ μικρή επίδραση στις αναπτυσσόμενες επιφανειακές παραμορφώσεις. Πιο συγκεκριμένα, ελάχιστα αυξημένες είναι οι επιφανειακές παραμορφώσεις για το σενάριο Σ3 σε σύγκριση με τις αντίστοιχες του Σ1, κάτι που γίνεται αντιληπτό από τη μεγαλύτερη κλίση της επιφάνειας και τη μεγαλύτερη κατακόρυφη μετακίνηση στην περιοχή του κατακρημνίσματος στο Σχήμα 3.23.α, χωρίς όμως να ισχύει το ίδιο και για το Σενάριο 5. Επίσης όσον αφορά στην καταπόνηση της γεωμεμβράνης στεγάνωσης, είναι πιο αποτελεσματική η αύξηση του πάχους της υφιστάμενης γεωμεμβράνης σε σχέση με την περίπτωση της προσθήκης νέας γεωμεμβράνης. Πιο συγκεκριμένα, η απαιτούμενη κατακόρυφη συνιστώσα της μετακίνησης ώστε η μέγιστη αξονική τάση στη γεωμεμβράνη να ισούται με το όριο διαρροής αυξάνεται κατά 5.3cm για το Σ3, ενώ για το Σ5 κατά 3.4cm σε σύγκριση με το Σ1. Η ευεργετική επίδραση της αύξησης του πάχους της γεωμεμβράνης (Σ3) γίνεται περαιτέρω εμφανής παρατηρώντας το Σχήμα 3.23.β, όπου παρουσιάζεται η μέγιστη αξονική παραμόρφωση συναρτήσει της κατακόρυφης μετακίνησης του ρήγματος για τα σενάρια Σ1, Σ3 και Σ5. Η μέγιστη αξονική παραμόρφωση μειώνεται σημαντικά για το Σ3 σε σύγκριση με το Σ1, ενώ η προσθήκη της επιπλέον γεωμεμβράνης (Σ5) είναι

ευνοϊκή για την καταπόνηση της γεωμεμβράνης στεγάνωσης σε σχέση με το Σ1 μόνο για κατακόρυφη συνιστώσα της μετακίνησης του ρήγματος μικρότερη ή ίση με 17cm.

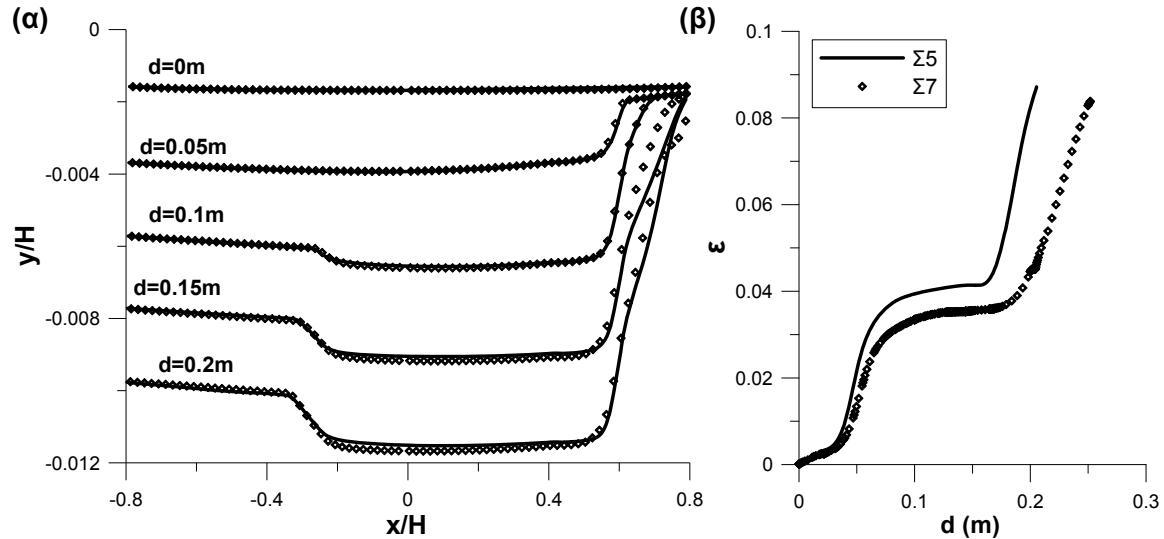


**Σχήμα 3.23.** Επίδραση του πάχους της γεωμεμβράνης και της προσθήκης δεύτερης γεωμεμβράνης: (α) κατανομή της κανονικοποιημένης ως προς το ύψος κατακόρυφης μετακίνησης ( $y/H$ ) συναρτήσει της κανονικοποιημένης ως προς το ύψος οριζόντιας συνιστώσας του παραμορφωμένου φορέα ( $x/H$ ), και (β) κατανομή της μέγιστης αξονικής παραμόρφωσης συναρτήσει της κατακόρυφης συνιστώσας της μετακίνησης του ρήγματος.

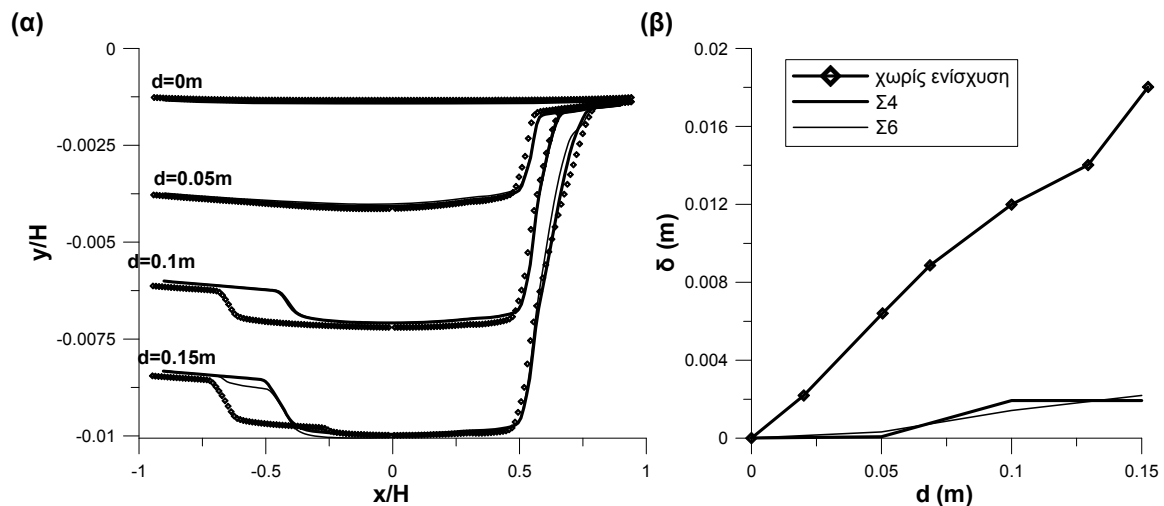
Η επίδραση του πάχους της γεωμεμβράνης γίνεται πιο εμφανής συγκρίνοντας το Σενάριο 7 με το 5. Η κατακόρυφη συνιστώσα της μετακίνησης ώστε η μέγιστη αξονική τάση στη γεωμεμβράνη να ισούται με το όριο διαρροής αυξάνει για το Σ7 κατά 3cm σε σχέση με το Σ5. Όμως, η αύξηση του πάχους της γεωμεμβράνης, ενώ μειώνει τις αναπτυσσόμενες αξονικές παραμορφώσεις στη γεωμεμβράνη, φαίνεται να αυξάνει τις επιφανειακές παραμορφώσεις, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.24. Επίσης, η μέγιστη αξονική παραμόρφωση κατά μήκος της γεωμεμβράνης στεγάνωσης παρατηρείται ότι μειώνεται σε μεγάλο βαθμό κατά την εφαρμογή του Σ7 συγκριτικά με το Σ5 (βλ. Σχήμα 3.24,β).

Η επίδραση της προσθήκης επιπλέον γεωμεμβράνης και της αύξησης του πάχους των γεωμεμβρανών εξετάστηκε και για την περίπτωση αργλικού εδάφους πάχους 1m, τα οποία αναφέρονται στα σενάρια Σ4 και Σ6, αντίστοιχα. Η διεύθυνση των επιφανειών αστοχίας για τις δύο αυτές εξεταζόμενες περιπτώσεις δεν διαφέρουν από τις αντίστοιχες της περίπτωσης μη εφαρμογής μέτρων προστασίας, ενώ αντίστοιχα και η κατακόρυφη συνιστώσα της μετακίνησης για διάρρηξη του αργλικού φραγμού αυξάνεται ελάχιστα έπειτα από την εφαρμογή των Σ4 και Σ6. Αντίστοιχα, παρατηρείται μικρή μείωση των

επιφανειακών παραμορφώσεων λόγω της συνδυασμένης προσθήκης αργιλικής στρώσης πάχους 1m και της προσθήκης γεωμεμβράνης (Σ4), ενώ η αύξηση του πάχους των γεωμεμβρανών συντελεί σε περιορισμένου εύρους αύξηση των επιφανειακών παραμορφώσεων (Σχήμα 3.25.α).



**Σχήμα 3.24.** Επίδραση του πάχους της γεωμεμβράνης: (α) κατανομή της κανονικοποιημένης ως προς το ύψος κατακόρυφης μετακίνησης ( $y/H$ ) συναρτήσει της κανονικοποιημένης ως προς το ύψος οριζόντιας συνιστώσας του παραμορφωμένου φορέα ( $x/H$ ), και (β) κατανομή της μέγιστης αξονικής παραμόρφωσης συναρτήσει της κατακόρυφης συνιστώσας της μετακίνησης του ρήγματος.

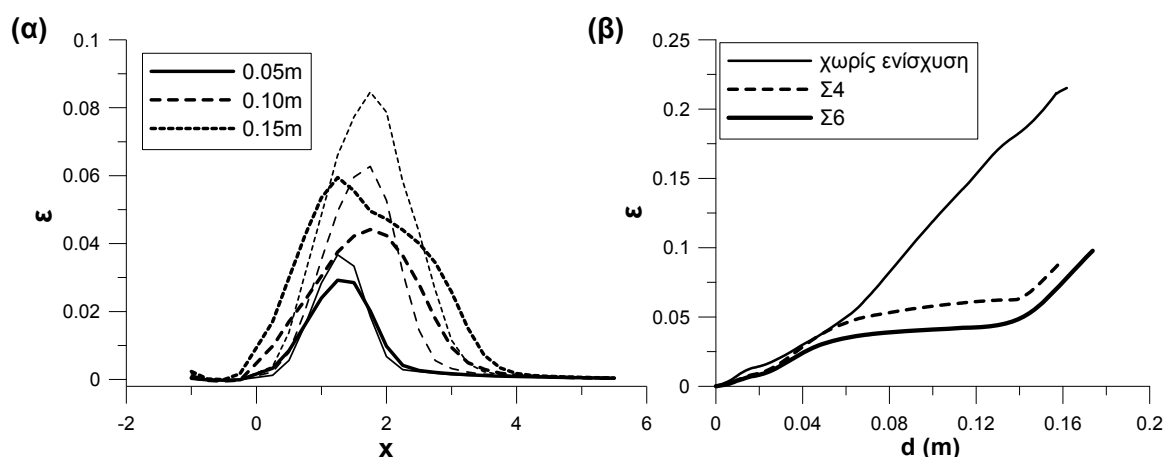


**Σχήμα 3.25.** Επίδραση του πάχους της γεωμεμβράνης και της προσθήκης δεύτερης γεωμεμβράνης: (α) κατανομή της κανονικοποιημένης ως προς το ύψος κατακόρυφης μετακίνησης ( $y/H$ ) συναρτήσει της κανονικοποιημένης ως προς το ύψος οριζόντιας συνιστώσας του παραμορφωμένου φορέα ( $x/H$ ), και (β) κατανομή της ολίσθησης συναρτήσει της κατακόρυφης συνιστώσας της μετακίνησης του ρήγματος.



Εξετάζεται ακόμη η αναπτυσσόμενη ολίσθηση λόγω της επιβολής μετακινήσεων κατά τη διάρρηξη του ρήγματος. Στο Σχήμα 3.25.β παρατηρείται ότι η εφαρμογή των δύο σεναρίων (Σ4 και Σ6) για την προστασία του συστήματος στεγάνωσης σχετίζεται με σημαντική μείωση της αναπτυσσόμενης ολίσθησης.

Αρκετά ευεργετική είναι η συνεισφορά των δύο μέτρων προστασίας όσον αφορά στην καταπόνηση της γεωμεμβράνης, καθώς 8.1cm και 14.8cm της κατακόρυφης συνιστώσας της μετακίνησης αρκούν για την ανάπτυξη αξονικής τάσης ίσης με το όριο διαρροής για το Σ4 και το Σ6, αντίστοιχα. Επιπροσθέτως, όπως διακρίνεται και στο Σχήμα 3.26.α, το οποίο παρουσιάζει τις κατανομές των αξονικών παραμορφώσεων κατά μήκος της γεωμεμβράνης στεγάνωσης για τα Σ4 και Σ6, η μέγιστη παραμόρφωση παρατηρείται σε απόσταση από 1.5m έως 2m από το ίχνος του ρήγματος. Ακόμη και για τα δύο σενάρια οι αξονικές παραμορφώσεις έχουν πρακτικά μηδενιστεί σε απόσταση περίπου ίση με 4m από το ίχνος του ρήγματος, ενώ η αύξηση του πάχους των γεωμεμβρανών συντελεί αφενός στη μείωση των αναπτυσσόμενων παραμορφώσεων, αφετέρου δε σε διεύρυνση της περιοχής ανάπτυξης πλαστικών παραμορφώσεων. Η μέγιστη αξονική παραμόρφωση των Σ4 και Σ6 είναι σημαντικά μειωμένη σε σχέση με την περίπτωση μη εφαρμογής μέτρων προστασίας (βλ. Σχήμα 3.26.β), αν και η ευεργετική επίδραση αυτών των μέτρων προστασίας περιορίζεται λόγω του μικρού πάχους της επιπρόσθετης στρώσης αργίλου.



**Σχήμα 3.26.** Επίδραση του πάχους της γεωμεμβράνης και της προσθήκης δεύτερης γεωμεμβράνης: (α) κατανομή της αξονικής παραμόρφωσης της γεωμεμβράνης κατά μήκος της, για διάφορα επίπεδα της κατακόρυφης συνιστώσας της μετακίνησης του ρήγματος (0.05-0.15m), και (β) κατανομή της μέγιστης αξονικής παραμόρφωσης συναρτήσει της κατακόρυφης συνιστώσας της μετακίνησης του ρήγματος. Οι έντονες γραμμές του (α) αναφέρονται στο σενάριο Σ6 ενώ οι υπόλοιπες στο Σ4.

### Αποτελεσματικότητα των εξεταζόμενων μέτρων

Η αναλυτική διερεύνηση της εφαρμογής των εναλλακτικών σεναρίων για την προστασία του σύνθετου συστήματος στεγάνωσης, ολοκληρώνεται με τη συγκριτική παρουσίαση της αποτελεσματικότητας της εκάστοτε περίπτωσης στην ανάπτυξη των σταθμών βλάβης που ορίστηκαν στην προηγούμενη ενότητα. Στον Πίνακα 3.1 παρατίθενται τα μεγέθη της κατακόρυφης συνιστώσας της μετακίνησης του ρήγματος που απαιτούνται για την εκδήλωση της κάθε στάθμης βλάβης. Πιο συγκεκριμένα, για την εκδήλωση της πρώτης στάθμης βλάβης, δηλαδή την πλήρη διάρρηξη της αργιλικής στρώσης στεγάνωσης το εύρος της μετακίνησης κυμαίνεται μεταξύ 3cm και 4.3cm. Σε αντίστοιχα επίπεδα μετακίνησης, της τάξης των 3.8-4.4cm, προέκυψε ότι πραγματοποιείται και η επιφανειακή εκδήλωση του ρήγματος.

Αντιθέτως, ιδιαίτερα ευεργετική είναι η εφαρμογή των εξεταζόμενων μέτρων για τη προστασία της γεωμεμβράνης στεγάνωσης, όπου το επίπεδο των μετακινήσεων για την ανάπτυξη τάσης ίσης με το όριο διαρροής είναι εντός των 8.1-21.2cm. Επίσης, πρέπει να τονιστεί ότι το πάχος της επιπρόσθετης αργιλικής στρώσης επηρεάζει την περιοχή ανάπτυξης μεγάλων αξονικών τάσεων. Εν γένει, η ανάπτυξη μέγιστης αξονικής τάσης ίσης με το όριο διαρροής παρατηρείται σχεδόν επί της ευθείας προβολής του ρήγματος ανεξαρτήτως του πάχους της υποκείμενης αργιλικής στρώσης, ενώ η κατανομή σχεδόν μηδενίζεται σε μικρή απόσταση εκατέρωθεν της μέγιστης τιμής.

**Πίνακας 3.1.** Μέγεθος της κατακόρυφης συνιστώσας της μετακίνησης του ρήγματος (σε cm) που απαιτείται για την εκδήλωση των τριών σταθμών βλάβης για καθένα από τα επτά εξεταζόμενα σενάρια ενίσχυσης.

| Μέτρα προστασίας | Κατακόρυφη συνιστώσα της μετακίνησης (cm) |          |          |
|------------------|-------------------------------------------|----------|----------|
|                  | Στάθμη 1                                  | Στάθμη 2 | Στάθμη 3 |
| Σενάριο 1        | 3.7                                       | 14.2     | 4.0      |
| Σενάριο 2        | 3.8                                       | 21.2     | 4.4      |
| Σενάριο 3        | 3.9                                       | 19.5     | 3.9      |
| Σενάριο 4        | 3.0                                       | 8.1      | 3.9      |
| Σενάριο 5        | 3.9                                       | 17.6     | 3.9      |
| Σενάριο 6        | 3.2                                       | 14.8     | 3.8      |
| Σενάριο 7        | 4.3                                       | 20.5     | 3.8      |

Τέλος, εκτιμήθηκε η αποτελεσματικότητα του κάθε μέτρου, η οποία ορίστηκε ως η ποσοστιαία αύξηση της κατακόρυφης συνιστώσας της μετακίνησης του ρήγματος. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον Πίνακα 3.2. Παρατηρείται ότι η αποτελεσματικότητα των εξεταζόμενων μέτρων προστασίας έγκειται κυρίως στη μείωση της καταπόνησης της γεωμεμβράνης στεγάνωσης. Πιο συγκεκριμένα, για τη στάθμη βλάβης 2 η λιγότερο αποτελεσματική περίπτωση είναι η αύξηση της αργλικής στρώσης κατά 1m με την συνακόλουθη προσθήκη μίας γεωμεμβράνης. Ακολουθώς, η ευνοϊκή συμπεριφορά εντείνεται για την αύξηση της αργλικής στρώσης κατά 4m και ακολουθεί η περίπτωση αύξησης της αργλικής στρώσης κατά 1m με την συνακόλουθη προσθήκη μίας γεωμεμβράνης αυξημένου πάχους. Η αποτελεσματικότητα των μέτρων ενίσχυσης αυξάνεται με την ταυτόχρονη προσθήκη επιπλέον γεωμεμβράνης και την αύξηση της αργλικής στρώσης κατά 4m. Η ευεργετική επίδρασή τους ενισχύεται περαιτέρω με την αύξηση του πάχους των γεωμεμβρανών. Η πιο ευνοϊκή όλων των περιπτώσεων πάντως φαίνεται ότι είναι η περίπτωση προσθήκης αργλικού φραγμού πάχους ίσου με 8m.

**Πίνακας 3.2.** Αποτελεσματικότητα των εναλλακτικών μέτρων προστασίας εκφρασμένη ως η ποσοστιαία αύξηση της κατακόρυφης συνιστώσας της μετακίνησης για την ανάπτυξη της κάθε στάθμης βλάβης.

| Μέτρα προστασίας | Αποτελεσματικότητα (%) |          |          |
|------------------|------------------------|----------|----------|
|                  | Στάθμη 1               | Στάθμη 2 | Στάθμη 3 |
| Σενάριο 1        | 52.9                   | 121.9    | 8.1      |
| Σενάριο 2        | 57.0                   | 231.3    | 18.9     |
| Σενάριο 3        | 61.2                   | 204.7    | 5.4      |
| Σενάριο 4        | 24.0                   | 26.6     | 5.4      |
| Σενάριο 5        | 61.2                   | 175.0    | 5.4      |
| Σενάριο 6        | 32.2                   | 131.3    | 2.7      |
| Σενάριο 7        | 77.7                   | 220.3    | 2.7      |

Βάσει των παρατηρήσεων που προηγήθηκαν, προτείνονται τα ακόλουθα στάδια στη διερεύνηση των εφαρμοζόμενων μέτρων προστασίας του συστήματος στεγάνωσης έναντι τεκτονικής διάρρηξης για τη σταδιακή αύξηση της οριακής τιμής της κατακόρυφης συνιστώσας της μετακίνησης του ρήγματος:

- αύξηση του πάχους της αργλικής στρώσης ανάλογα με την τάξη μεγέθους της αναμενόμενης μετακίνησης του ρήγματος, π.χ. για αναμενόμενη μετακίνηση

μεταξύ 0-10cm αύξηση του πάχους κατά 1m, ενώ για μετακίνηση από 10-20cm κατά 4m,

- προσθήκη επιπρόσθετης στρώσης γεωμεμβράνης,
- αύξηση του πάχους της γεωμεμβράνης.

Προφανώς, η ανωτέρω διαδικασία αλλά και η επιλογή του εφαρμοζόμενου σεναρίου αποτελεί συνάρτηση και των διατιθέμενων υλικών, αλλά και του κόστους εφαρμογής. Δηλαδή απαιτείται μία επαναληπτική διαδικασία κριτικής αξιολόγησης των εναλλακτικών προτάσεων ενίσχυσης προκειμένου να επιτευχθεί η βέλτιστη τεχνικο-οικονομική λύση.

### 3.4.2 Οπλισμένο τεχνητό επιχώμα

Εκτός των μέτρων προστασίας της προηγούμενης ενότητας που βασίζονται στην ενίσχυση της σύνθετης στρώσης στεγάνωσης, εξετάζεται και η περίπτωση κατασκευής ενός οπλισμένου τεχνητού επιχώματος στη θεμελίωση του Χ.Υ.Τ.Α. πριν την τοποθέτηση του αργλικού φραγμού και της γεωμεμβράνης στεγάνωσης. Προκειμένου να διερευνηθεί η επίδραση των εμπλεκόμενων παραμέτρων και η αποτελεσματικότητά τους στην προστασία τους συστήματος στεγάνωσης, διενεργήθηκε μία παραμετρική αριθμητική διερεύνηση. Για τον σκοπό αυτό διάφορες διατάξεις εξετάζονται θεωρώντας διαφορετικό πάχος του τεχνητού επιχώματος, διαφορετικό αριθμό στρώσεων γεωσυνθετικού οπλισμού και διαφορετικό μέτρο ελαστικότητας των γεωσυνθετικών οπλισμών. Επιπροσθέτως, μελετάται η επίδραση του υπερκειμένου φορτίου στις αναπτυσσόμενες εδαφικές παραμορφώσεις εντός του οπλισμένου επιχώματος λόγω της τεκτονικής διάρρηξης.

Τα αριθμητικά προσομοιώματα καταστρώθηκαν στον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS (2004), και ουσιαστικά περιελάμβαναν επτά διαφορετικές διατάξεις με τα εξής χαρακτηριστικά:

- πάχος εδαφικής στρώσης 2m, με μία και τρεις στρώσεις οπλισμού,
- πάχος εδαφικής στρώσης 3m, με μία, δύο και πέντε στρώσεις οπλισμού,
- πάχος εδαφικής στρώσης 5m, με μία και τέσσερις στρώσεις οπλισμού.

Η κατανομή των οπλισμών καθ' ύψος έγινε θεωρώντας σταθερή απόσταση διανομής. Όσον αφορά τις μηχανικές ιδιότητες των υλικών, θεωρήθηκε ότι το εδαφικό υλικό του τεχνητού επιχώματος είναι πυκνή άμμος με εσωτερική γωνία τριβής ίση με 45° και

γωνία διαστολικότητας  $15^\circ$ , ενώ οι αντίστοιχες απομένουσες τιμές τους είναι  $30^\circ$  και  $0^\circ$  αντίστοιχα και αναπτύσσονται για τιμή της πλαστικής διατμητικής παραμόρφωσης ίσης με 10%. Η συμπεριφορά της χαλάρωσης του εδαφικού υλικού προσομοιώθηκε αριθμητικά με την εφαρμογή κατάλληλης υπορουτίνας που αναπτύχθηκε και ενσωματώθηκε στο λογισμικό ABAQUS (2004).

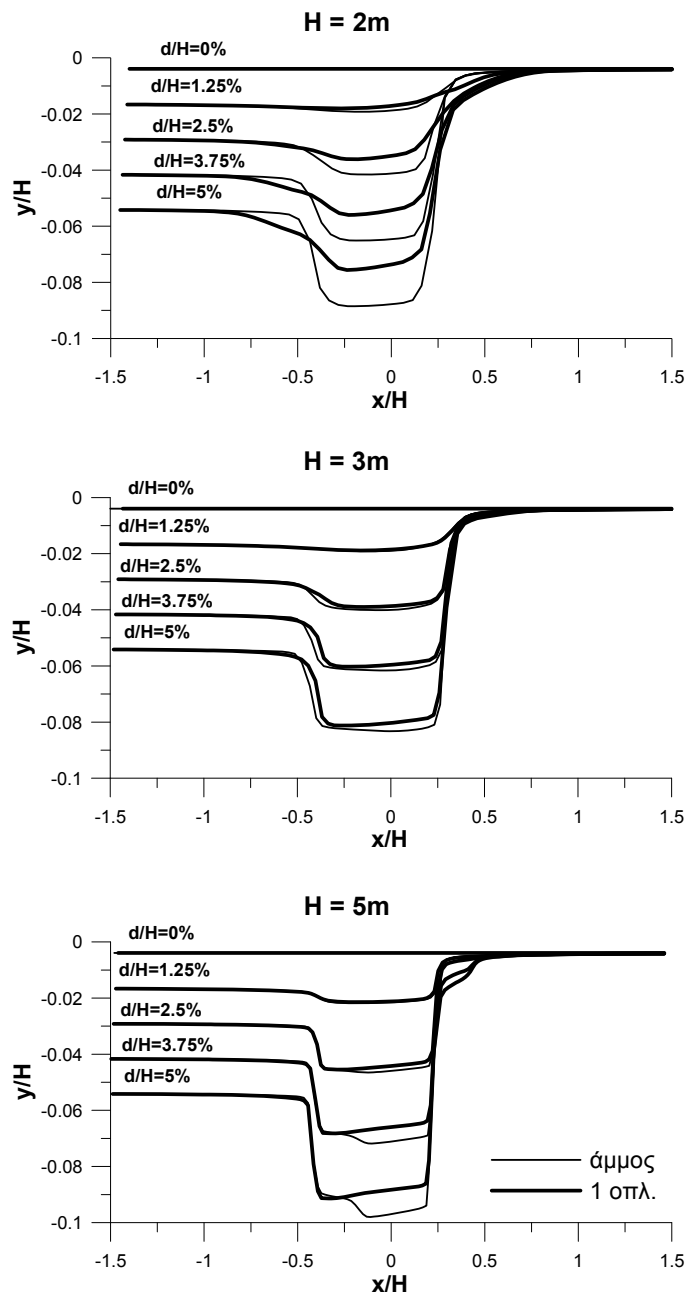
Τα γεωπλέγματα αποτελούν τους γεωσυνθετικούς οπλισμούς με μέτρο ελαστικότητας που ισούται με 500MPa, 1000MPa και 1900MPa, τιμές που καλύπτουν επαρκώς το εύρος της παραμέτρου που αναφέρεται από διάφορους κατασκευαστές στις τεχνικές προδιαγραφές των μονοαξονικών γεωπλεγμάτων. Η επιλογή αυτή βασίζεται στη σημαντική εφελκυστική αντοχή που διαθέτουν, γεγονός που επιτρέπει τον ασφαλή σχεδιασμό του οπλισμένου επιχώματος ακόμη και υπό συνθήκες έντονης καταπόνησης, όπως είναι η διάρρηξη ενός τεκτονικού ρήγματος. Εξαιτίας των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των γεωπλεγμάτων και κυρίως λόγω της παθητικής αντίστασης που αναπτύσσεται στα πληρωμένα με εδαφικό υλικό κενά, η διατμητική αντοχή στη διεπιφάνεια προσεγγίζει την αντίστοιχη του εδαφικού υλικού (Koerner, 1994). Συνεπώς, κατά την αριθμητική προσομοίωση δεν αναπτύχθηκε διεπιφάνεια πεπερασμένης διατμητικής αντοχής εκατέρωθεν των πλευρών των γεωπλεγμάτων, αντιθέτως προσομοιώθηκε πλήρης συμβατότητα των μετακινήσεων των δύο μέσων.

Οι υπόλοιπες παραδοχές της αριθμητικής προσομοίωσης, δηλαδή η απόσταση των πλευρικών συνόρων και η διακριτοποίηση του καννάβου, επιλέχθηκαν ως εξής: η πρώτη πενταπλάσια της εκάστοτε τιμής του ύψους και το δε μέγεθος των πεπερασμένων στοιχείων ίσο με 0.1m, ούτως ώστε να ελαχιστοποιείται η επίδραση των συνόρων της εδαφικής στρώσης και να υπολογίζονται οι αναπτυσσόμενες παραμορφώσεις με μεγαλύτερη ακρίβεια, αντίστοιχα.

### **Επίδραση του πάχους της εδαφικής στρώσης**

Αρχικά εξετάζεται η επίδραση του πάχους της εδαφικής στρώσης για τις περιπτώσεις μη οπλισμένου εδάφους και επιχώματος με μία στρώση γεωσυνθετικού οπλισμού. Στο Σχήμα 3.27 παρουσιάζονται οι κατανομές της κανονικοποιημένης ως προς το ύψος κατακόρυφης μετακίνησης συναρτήσει της κανονικοποιημένης, ως προς το ύψος οριζόντιας παραμορφωμένης θέσης, για τις τρεις εξεταζόμενες περιπτώσεις πάχους του τεχνητού επιχώματος. Σημειώνεται ότι, για μηδενική κανονικοποιημένη ως προς το ύψος κατακόρυφη συνιστώσα της μετακίνησης του ρήγματος ( $d/H$ ), η

κανονικοποιημένη κατακόρυφη μετακίνηση είναι μη μηδενική λόγω της εφαρμογής φορτίου ίσου με 200kN/m στην επιφάνεια, υποκαθιστώντας την επιβαλλόμενη ορθή τάση λόγω της ύπαρξης του Χ.Υ.Τ.Α. με ύψος ίσο με 20m. Η τιμή που λαμβάνει η κανονικοποιημένη αρχική μετακίνηση είναι σταθερή και ανεξάρτητη του ύψους της εδαφικής στρώσης.



**Σχήμα 3.27.** Κατανομή της κανονικοποιημένης ως προς το ύψος κατακόρυφης μετακίνησης ( $y/H$ ) συναρτήσει της κανονικοποιημένης ως προς το ύψος οριζόντιας συνιστώσας του παραμορφωμένου φορέα ( $x/H$ ), για τις τρεις περιπτώσεις πάχους της εδαφικής στρώσης και διάφορα επίπεδα της κανονικοποιημένης κατακόρυφης συνιστώσας της μετακίνησης ως προς το ύψος ( $d/H$ ).

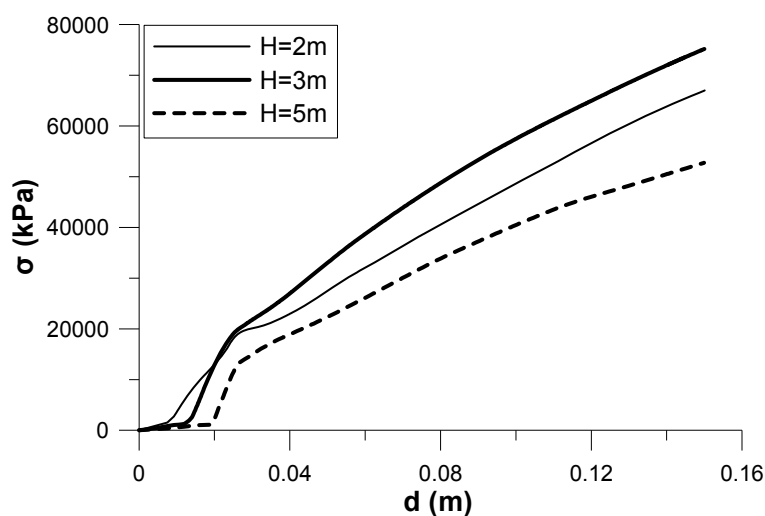
Η απαιτούμενη κατακόρυφη συνιστώσα της μετακίνησης για την επιφανειακή εκδήλωση του ρήγματος αυξάνεται από 2.5cm σε 3.3cm και 4.0cm, για αντίστοιχη μεταβολή του πάχους της εδαφικής μη οπλισμένης στρώσης από 2m σε 3m και 5m. Η προσθήκη μίας στρώσης γεωσυνθετικού οπλισμού αυξάνει την απαιτούμενη κατακόρυφη συνιστώσα της μετακίνησης για την επιφανειακή εκδήλωση του ρήγματος μόνο για την περίπτωση της εδαφικής στρώσης πάχους 2m, σε 4.5cm. Πιο συγκεκριμένα, για το ίδιο πάχος στρώσης παρατηρείται στο Σχήμα 3.27 ότι η συμβολή της προσθήκης της στρώσης γεωσυνθετικού οπλισμού στις υπολογισθείσες επιφανειακές μετακινήσεις είναι ιδιαίτερα σημαντική. Ακόμη και για μικρά επίπεδα μετακινήσεων φαίνεται ότι μία στρώση οπλισμού δύναται να μειώσει την επιφανειακή παραμόρφωση, γεγονός που προκύπτει από την πιο ήπια κλίση στις περιοχές επιφανειακής εκδήλωσης των δύο επιφανειών αστοχίας και τη μικρότερη κατακόρυφη μετακίνηση στην περιοχή του κατακρημνίσματος.

Τα ίδια χαρακτηριστικά εντοπίζονται σε πολύ μικρότερο βαθμό και μόνο για μεγαλύτερα επίπεδα επιβαλλόμενων μετακινήσεων της τεκτονικής διάρρηξης για την περίπτωση τεχνητού επιχώματος πάχους 3m. Περαιτέρω αύξηση του πάχους της εδαφικής στρώσης εντείνει την ευνοϊκή επίδραση του γεωσυνθετικού οπλισμού, αν και εξακολουθεί να μην είναι αντίστοιχη της πρώτης εξεταζόμενης περίπτωσης. Δηλαδή, αν και εξακολουθούν να αναπτύσσονται έντονες επιφανειακές παραμορφώσεις στις περιοχές εκδήλωσης των δύο επιφανειών αστοχίας, η κατακόρυφη μετακίνηση στην περιοχή του κατακρημνίσματος μειώνεται, ειδικά για κανονικοποιημένη ως προς το ύψος κατακόρυφη συνιστώσα της μετακίνησης του ρήγματος μεγαλύτερη από 2.5%.

Σημειώνεται ότι τα αποτελέσματα του Σχήματος 3.27 παρατίθενται κανονικοποιημένα ως προς το πάχος της εδαφικής στρώσης. Η σκοπιμότητα αυτής της επιλογής είναι η διερεύνηση της πιθανής αδιαστατοποίησης των αναπτυσσόμενων επιφανειακών μετακινήσεων σε σχέση με το πάχος της εδαφικής στρώσης. Γίνεται αντιληπτό όμως ότι τόσο για το μη οπλισμένο επίχωμα όσο και για την περίπτωση τοποθέτησης μίας στρώσης γεωσυνθετικού οπλισμού οι κανονικοποιημένες μετακινήσεις εξαρτώνται από το πάχος της εδαφικής στρώσης. Δηλαδή, για την περίπτωση μη οπλισμένου τεχνητού επιχώματος και εξετάζοντας το ίδιο επίπεδο κανονικοποιημένης κατακόρυφης συνιστώσας της μετακίνησης ως προς το ύψος, παρατηρείται ότι οι επιφανειακές παραμορφώσεις μειώνονται καθώς το ύψος αυξάνει από 2m σε 3m, ενώ το αντίθετο ισχύει για περαιτέρω αύξηση του ύψους σε 5m. Αυτή η διαφοροποίηση δεν

ισχύει στην περίπτωση του οπλισμένου με μια στρώση γεωσυνθετικού επιχώματος, όπου η αύξηση του πάχους της εδαφικής στρώσης σημαίνει αύξηση των επιφανειακών παραμορφώσεων αλλά και μείωση του εύρους της ζώνης ανάπτυξης σημαντικών παραμορφώσεων, για το ίδιο επίπεδο κανονικοποιημένης κατακόρυφης συνιστώσας της μετακίνησης ως προς το ύψος. Αυτή η παρατήρηση υποδεικνύει ότι, ο μηχανισμός ανάπτυξης πλαστικών παραμορφώσεων διαφέρει για κάθε εξεταζόμενη περίπτωση καθώς σχετίζεται και με το απόλυτο μέγεθος της επιβαλλόμενης μετακίνησης.

Ομοίως, η καταπόνηση του γεωσυνθετικού οπλισμού εξαρτάται από το πάχος της εδαφικής στρώσης, κυρίως λόγω της διαφορετικής κατακόρυφης απόστασης της θέσης του από το ίχνος του ρήγματος. Στο Σχήμα 3.28 παρατίθεται η μέγιστη αξονική τάση κατά μήκος του γεωσυνθετικού συναρτήσει της κατακόρυφης συνιστώσας της μετακίνησης του ρήγματος. Είναι προφανές ότι η καταπόνηση του γεωσυνθετικού θα αρχίσει να αυξάνεται εφόσον η διάρρηξη έχει διαδοθεί μέχρι τη στάθμη τοποθέτησής του, για αυτό και παρατηρείται μία υστέρηση μεταξύ των τριών περιπτώσεων για τη σταδιακή αύξηση των αξονικών τάσεων. Παρότι η ένταση στο γεωσυνθετικό για την περίπτωση του μικρότερου ύψους είναι η μεγαλύτερη, όπως ήταν άλλωστε και το αναμενόμενο, αυτό ισχύει μόνο για μικρές τιμές της κατακόρυφης συνιστώσας της μετακίνησης του ρήγματος. Η μέγιστη αξονική τάση που αναπτύσσεται στο γεωσυνθετικό εντός εδαφικής στρώσης πάχους 3m είναι η μεγαλύτερη των εξεταζόμενων περιπτώσεων, ειδικά για τιμές της κατακόρυφης συνιστώσας της μετακίνησης του ρήγματος μεγαλύτερες των 2cm. Αντιθέτως για εδαφική στρώσης πάχους 5m η καταπόνηση είναι η μικρότερη, όπως ήταν αναμενόμενο.

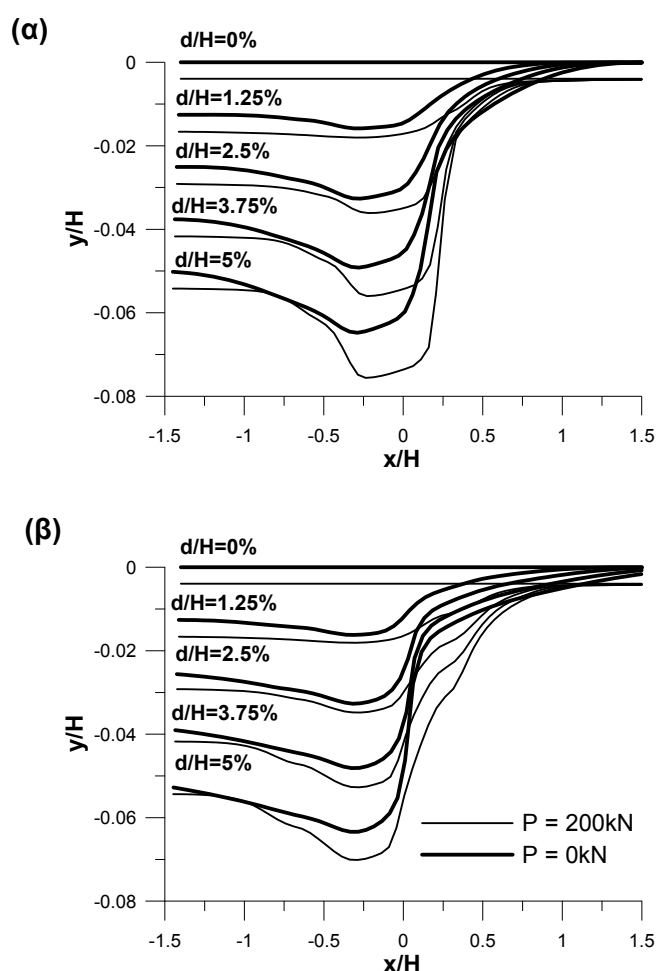


**Σχήμα 3.28.** Μέγιστη αξονική τάση κατά μήκος του γεωσυνθετικού οπλισμού για τις τρεις εξεταζόμενες περιπτώσεις πάχους του τεχνητού επιχώματος.



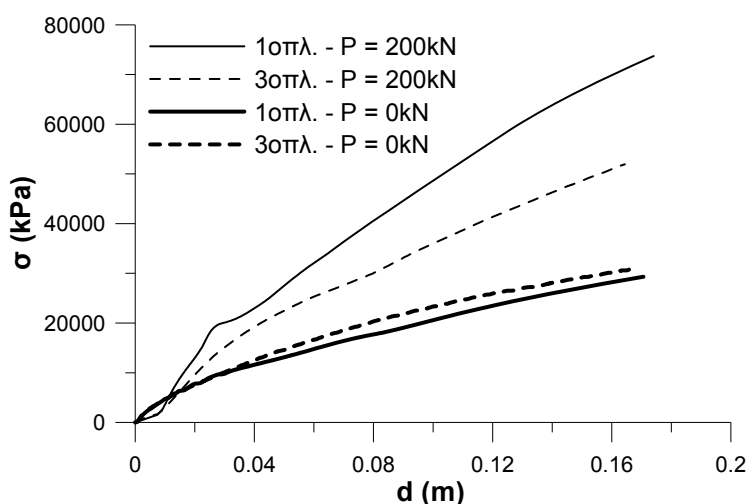
### Επίδραση του υπερκείμενου φορτίου

Εν συνεχεία εξετάζεται η επίδραση του υπερκείμενου φορτίου στη διαδικασία διάδοσης του ρήγματος εντός του οπλισμένου επιχώματος ύψους 2m και για την περίπτωση χρήσης ενός και τριών γεωσυνθετικών οπλισμών. Στο Σχήμα 3.29 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων για τη διάδοση ρήγματος θεωρώντας φορτίο στην επιφάνεια του τεχνητού επιχώματος είτε ίσο με 200kN/m, είτε μηδενικό. Εκτός από τη διαφορά των επιφανειακών μετακινήσεων που προκύπτει λόγω της αναπτυσσόμενης κατακόρυφης μετακίνησης από την επιβολή του φορτίου, η οποία αντιστοιχεί στη διαφορά μεταξύ των δύο περιπτώσεων που παρατηρείται για  $d/H=0\%$ , είναι προφανές ότι και οι επιφανειακές μετακινήσεις που οφείλονται αποκλειστικά στη διάδοση της τεκτονικής διάρρηξης μεταβάλλονται ως αποτέλεσμα του επιφανειακού φορτίου.



**Σχήμα 3.29.** Επίδραση του υπερκείμενου φορτίου: κατανομή της κανονικοποιημένης ως προς το ύψος κατακόρυφης μετακίνησης ( $y/H$ ) συναρτήσει της κανονικοποιημένης ως προς το ύψος οριζόντιας συνιστώσας του παραμορφωμένου φορέα ( $x/H$ ), για οπλισμένο επίχωμα πάχους 2m και: (α) εφαρμογή ενός γεωσυνθετικού οπλισμού, και (β) εφαρμογή τριών γεωσυνθετικών οπλισμών.

Πιο συγκεκριμένα, για την περίπτωση ενός γεωσυνθετικού οπλισμού εντός της εδαφικής στρώσης (Σχήμα 3.29.α), η μείωση του υπερκείμενου φορτίου συμβάλλει στη μείωση των αναπτυσσόμενων επιφανειακών παραμορφώσεων στην περιοχή της εκδήλωσης των δύο επιφανειών αστοχίας. Ιδιαίτερα σημαντική είναι η επίδραση της μείωσης του υπερκείμενου φορτίου στις επιφανειακές παραμορφώσεις της περιοχής ανάπτυξης της δευτερεύουσας επιφάνειας, όπου η κλίση της παραμορφωμένης επιφάνειας μειώνεται σημαντικά. Σε άμεση αντιπαράθεση στο Σχήμα 3.29.β παρουσιάζονται οι κατανομές της κανονικοποιημένης ως προς το ύψος κατακόρυφης μετακίνησης ( $y/H$ ) συναρτήσεως της κανονικοποιημένης ως προς το ύψος οριζόντιας συνιστώσας του παραμορφωμένου φορέα ( $x/H$ ) για την εφαρμογή τριών γεωσυνθετικών οπλισμών. Παρατηρείται αρχικά ότι σε σύγκριση με την περίπτωση ενός οπλισμού, η εφαρμογή τριών γεωσυνθετικών οπλισμών συντελεί σε μείωση των αναπτυσσόμενων παραμορφώσεων στην επιφάνεια για την περίπτωση που υφίσταται επιφανειακό φορτίο. Αντίστοιχα, λόγω της ευμενέστερης συμπεριφοράς δεν είναι εμφανής και η ανάπτυξη κατακρημνίσματος. Αντιθέτως, για την περίπτωση μηδενικού επιφανειακού φορτίου η περιοχή ανάπτυξης σημαντικών παραμορφώσεων μειώνεται με αποτέλεσμα η επιφανειακή κλίση να αυξηθεί σημαντικά. Επιπλέον, η απαιτούμενη κατακόρυφη συνιστώσα της μετακίνησης του ρήγματος που απαιτείται για την επιφανειακή εκδήλωσή του αυξάνεται κατά 0.5cm και κατά 1cm για την εφαρμογή ενός και τριών οπλισμών, αντίστοιχα, λόγω του μηδενικού φορτίου.



**Σχήμα 3.30.** Επίδραση του υπερκείμενου φορτίου στη μέγιστη αξονική τάση κατά μήκος του γεωσυνθετικού οπλισμού για τις δύο διατάξεις οπλισμών.

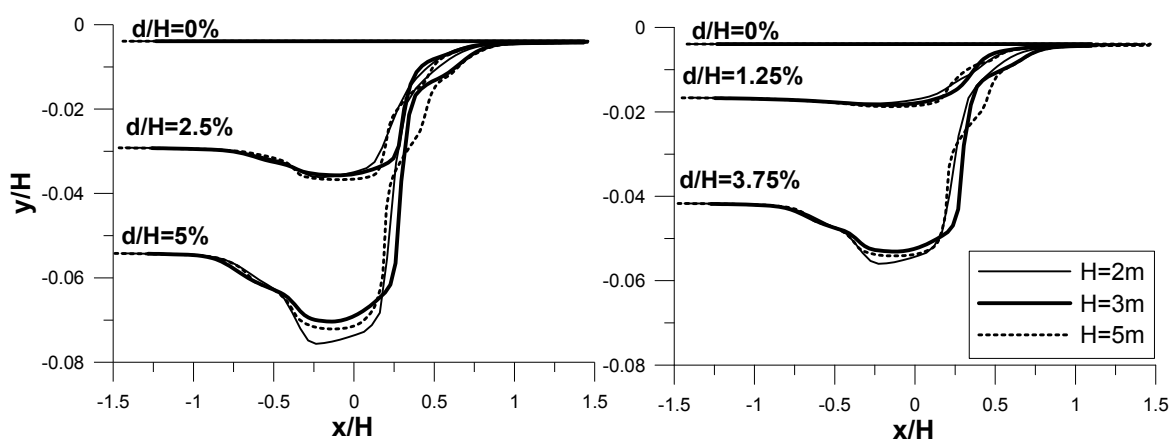
Όσον αφορά στην καταπόνηση των γεωσυνθετικών οπλισμών, τα αριθμητικά αποτελέσματα της μέγιστης αξονικής τάσης συνιστούν ότι η μείωση του υπερκείμενου

φορτίου συνεπάγεται μείωση της καταπόνησης των γεωσυνθετικών. Όπως άλλωστε φαίνεται και στο Σχήμα 3.30, η ευνοϊκή αυτή επίδραση περιορίζεται σημαντικά για την περίπτωση εφαρμογής τριών οπλισμών. Η συμπεριφορά αυτή οφείλεται αφενός στη μείωση της αξονικής τάσης λόγω της αύξησης των οπλισμών στην περίπτωση υπερκείμενου φορτίου, και αφετέρου στην μικρή αύξηση της καταπόνησης λόγω της αύξησης των οπλισμών στην περίπτωση μηδενικού φορτίου.

### Επίδραση της απόστασης των γεωσυνθετικών οπλισμών

Από την προηγηθείσα ανάλυση προέκυψε ότι η αύξηση του αριθμού των γεωσυνθετικών οπλισμών που τοποθετούνται εντός εδαφικής στρώσης πάχους 2m, έχει ευεργετική επίδραση στην απομείωση των αναπτυσσόμενων επιφανειακών παραμορφώσεων, λόγω της διάδοσης του ρήγματος. Αντίστοιχη είναι η συμπεριφορά και για τις περιπτώσεις εδαφικών στρώσεων πάχους 3m και 5m. Στις εξεταζόμενες περιπτώσεις για αύξηση των γεωσυνθετικών οπλισμών εντός των τεχνητών επιχωμάτων παρατηρήθηκε αύξηση της απαιτούμενης κατακόρυφης συνιστώσας της μετακίνησης του ρήγματος για την επιφανειακή εκδήλωσή του.

Ακολούθως εξετάζεται η επίδραση της ποσότητας των οπλισμών θεωρώντας σταθερή απόσταση διανομής τους, για κάθε εξεταζόμενη περίπτωση εδαφικής στρώσης. Στο Σχήμα 3.31 παρουσιάζεται η κατανομή της κανονικοποιημένης ως προς το ύψος κατακόρυφης μετακίνησης ( $y/H$ ) συναρτήσει της κανονικοποιημένης ως προς το ύψος οριζόντιας συνιστώσας του παραμορφωμένου φορέα ( $x/H$ ), για σταθερή απόσταση οπλισμών ίση με 1m σε όλες τις περιπτώσεις τεχνητών επιχωμάτων.

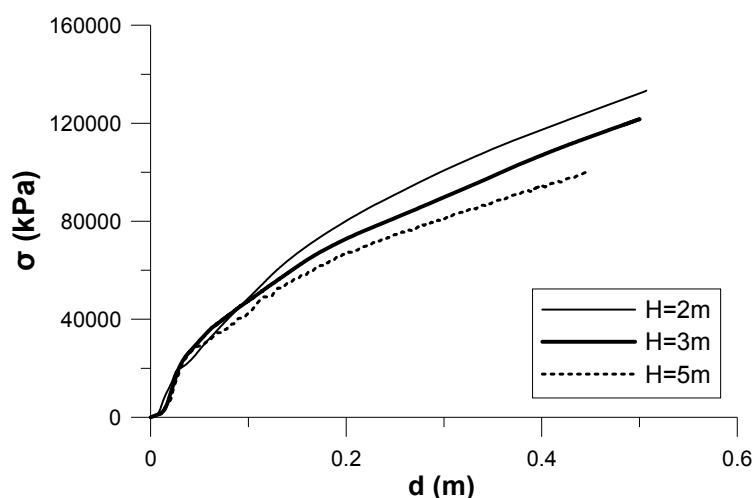


**Σχήμα 3.31.** Επίδραση της απόστασης των οπλισμών: κατανομή της κανονικοποιημένης ως προς το ύψος κατακόρυφης μετακίνησης ( $y/H$ ) συναρτήσει της κανονικοποιημένης ως προς το ύψος οριζόντιας συνιστώσας του παραμορφωμένου φορέα ( $x/H$ ), για οπλισμένο επίχωμα πάχους 2m, 3m και 5m και απόσταση οπλισμών ίση με 1m.

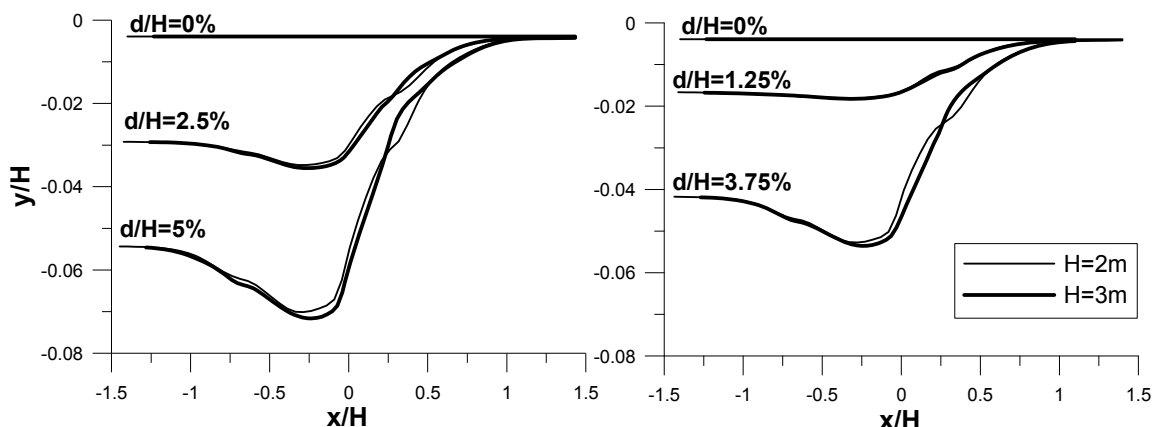
Εν γένει, παρατηρείται ικανοποιητική σύγκλιση των αποτελεσμάτων για τις τρεις διαφορετικές περιπτώσεις πάχους της εδαφικής στρώσης. Οι αναπτυσσόμενες επιφανειακές παραμορφώσεις για τις εξεταζόμενες διατάξεις ελαττώνονται σε μικρό βαθμό όμως, καθώς αυξάνει το πάχος της εδαφικής στρώσης. Σε κάθε περίπτωση η ανάπτυξη εδαφικών παραμορφώσεων είναι εξαιρετικά μειωμένη στην περιοχή όπου αναμενόταν η επιφανειακή εκδήλωση της δευτερεύουσας επιφάνειας αστοχίας.

Όσον αφορά στην καταπόνηση των κατώτερων γεωσυνθετικών οπλισμών, οι οποίοι αναπτύσσουν και μεγαλύτερα επίπεδα αξονικών τάσεων, παρατηρείται ότι η αύξηση του πάχους της εδαφικής στρώσης συντελεί στη μείωση της μέγιστης αξονικής τάσης τους (Σχήμα 3.32). Σε κάθε εξεταζόμενη περίπτωση η αύξηση των γεωσυνθετικών οπλισμών συντελεί στον περιορισμό της καταπόνησης των κατώτερων οπλισμών. Εξαιρέση αποτελεί η περίπτωση εδαφικής στρώσης πάχους 5m όπου, συγκρίνοντας την ένταση στη γεωσυνθετική στρώση για τις περιπτώσεις μίας και τεσσάρων στρώσεων οπλισμού, δεν παρατηρήθηκε μείωση της μέγιστης αξονικής τάσης.

Η ευνοϊκή επίδραση της μείωσης απόστασης των οπλισμών γίνεται εμφανής και στο Σχήμα 3.33. Στο σχήμα αυτό παρατίθενται οι κατανομές της κανονικοποιημένης ως προς το ύψος κατακόρυφης μετακίνησης ( $y/H$ ) συναρτήσει της κανονικοποιημένης ως προς το ύψος οριζόντιας συνιστώσας του παραμορφωμένου φορέα ( $x/H$ ), των τεχνητών επιχωμάτων πάχους 2m και 3m για σταθερή απόσταση οπλισμών ίση με 0.5m. Αφενός η μείωση των επιφανειακών παραμορφώσεων είναι σημαντική, αφετέρου η σύγκλιση των κανονικοποιημένων αποτελεσμάτων των δύο εξεταζόμενων περιπτώσεων είναι εντυπωσιακή.



**Σχήμα 3.32.** Επίδραση της απόστασης των οπλισμών στη μέγιστη αξονική τάση κατά μήκος του γεωσυνθετικού οπλισμού για τις τρεις περιπτώσεις τεχνητών επιχωμάτων.



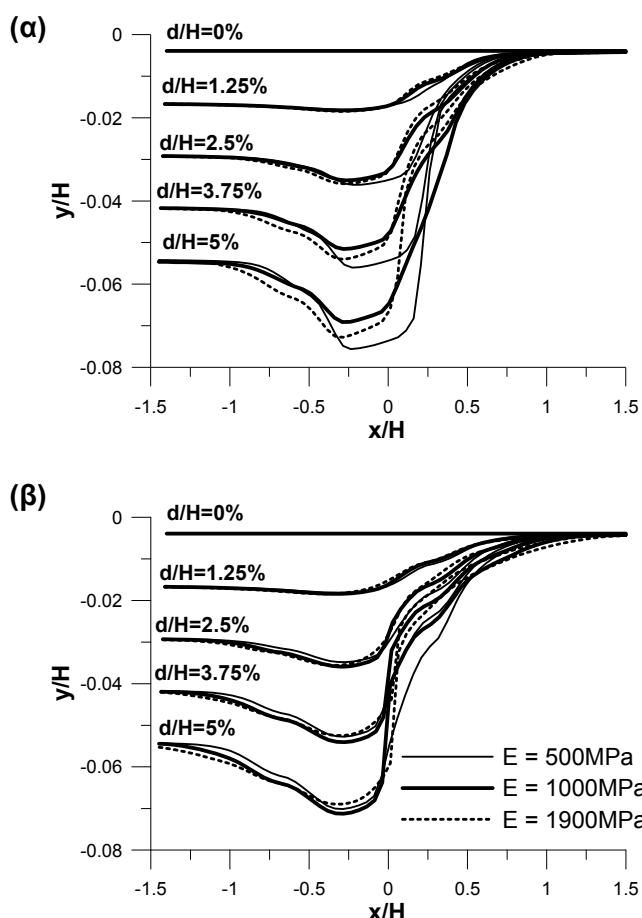
**Σχήμα 3.33.** Επίδραση της απόστασης των οπλισμών: κατανομή της κανονικοποιημένης ως προς το ύψος κατακόρυφης μετακίνησης ( $y/H$ ) συναρτήσει της κανονικοποιημένης ως προς το ύψος οριζόντιας συνιστώσας του παραμορφωμένου φορέα ( $x/H$ ), για οπλισμένο επίχωμα πάχους 2m, και 3m και απόσταση οπλισμών ίση με 0.5m.

### Επίδραση του μέτρου ελαστικότητας των γεωσυνθετικών οπλισμών

Το μέτρο ελαστικότητας των γεωσυνθετικών οπλισμών είναι μια παράμετρος η οποία παρουσιάζει μεγάλο εύρος, και επιπροσθέτως η εφελκυστική αντοχή του γεωσυνθετικού εξαρτάται από την τιμή του μέτρου ελαστικότητας. Για τον λόγο αυτό εξετάστηκε και η επίδραση της αύξησης του μέτρου ελαστικότητας των γεωσυνθετικών στην ικανότητα των οπλισμένων τεχνητών επιχωμάτων να περιορίσουν τις αναπτυσσόμενες επιφανειακές παραμορφώσεις.

Η περίπτωση του οπλισμένου επιχώματος ύψους 2m με έναν και τρεις γεωσυνθετικούς οπλισμούς εξετάστηκε για τρεις περιπτώσεις μέτρου ελαστικότητας ίσου δηλαδή με 500MPa, 1000MPa και 1900MPa. Από το Σχήμα 3.34 γίνεται αντιληπτό ότι η επίδραση της αύξησης του μέτρου ελαστικότητας δεν είναι αντίστοιχη για τις δύο εξεταζόμενες διατάξεις οπλισμού. Πιο συγκεκριμένα, στην περίπτωση ενός οπλισμού η αύξηση του μέτρου ελαστικότητας από 500MPa σε 1000MPa συντελεί στη μείωση των αναπτυσσόμενων επιφανειακών παραμορφώσεων, ειδικά στην περιοχή επιφανειακής εκδήλωσης της δευτερεύουσας επιφάνειας αστοχίας. Περαιτέρω όμως αύξηση του μέτρου ελαστικότητας σε 1900MPa αυξάνει σε μικρό βαθμό τις επιφανειακές παραμορφώσεις, σε σύγκριση με την περίπτωση που οι οπλισμοί χαρακτηρίζονταν από μέτρο ελαστικότητας ίσο με 1000MPa, ενώ εξακολουθούν να είναι μικρότερες από την περίπτωση των πιο εύκαμπτων οπλισμών. Αντιθέτως, στην περίπτωση τριών γεωσυνθετικών οπλισμών η αύξηση του μέτρου ελαστικότητας των οπλισμών συντελεί σε περιορισμό της περιοχής ανάπτυξης μεγάλου μεγέθους κανονικοποιημένων κατακόρυφων μετακινήσεων, και συνεπώς σε αύξηση των επιφανειακών

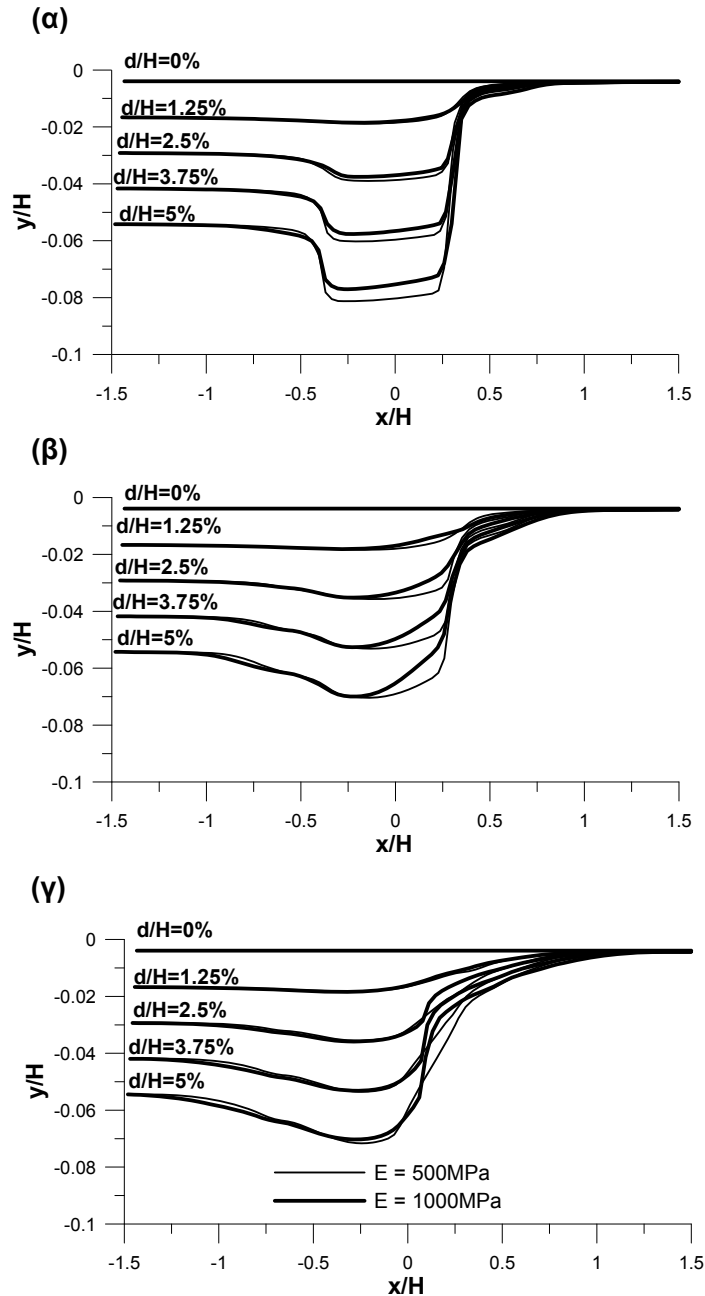
παραμορφώσεων, για αντίστοιχα επίπεδα κανονικοποιημένης μετακίνησης του ρήγματος.



**Σχήμα 3.34.** Επίδραση του μέτρου ελαστικότητας των οπλισμών: κατανομή της κανονικοποιημένης ως προς το ύψος κατακόρυφης μετακίνησης ( $y/H$ ) συναρτήσει της κανονικοποιημένης ως προς το ύψος οριζόντιας συνιστώσας του παραμορφωμένου φορέα ( $x/H$ ), για οπλισμένο επιχώμα πάχους 2m και: (α) εφαρμογή ενός γεωσυνθετικού οπλισμού και (β) εφαρμογή τριών γεωσυνθετικών οπλισμών.

Αντίστοιχα, η επίδραση της αύξησης του μέτρου ελαστικότητας αναλύεται και για την περίπτωση του οπλισμένου επιχώματος ύψους 3m με έναν, δύο και τέσσερις γεωσυνθετικούς οπλισμούς. Στο Σχήμα 3.35 παρουσιάζονται οι κατανομές της κανονικοποιημένης ως προς το ύψος κατακόρυφης μετακίνησης ( $y/H$ ) συναρτήσει της κανονικοποιημένης ως προς το ύψος οριζόντιας συνιστώσας του παραμορφωμένου φορέα ( $x/H$ ). Η ευνοϊκή επίδραση της αύξησης του μέτρου ελαστικότητας στη μείωση των αναπτυσσόμενων επιφανειακών παραμορφώσεων είναι εμφανής για τις δύο από τις τρεις περιπτώσεις διατάξεων των οπλισμών, δηλαδή για απόσταση ίση με 1.5m και 1m. Αντιθέτως, παρομοίως με την περίπτωση οπλισμένου επιχώματος πάχους 2m, όταν η απόσταση των οπλισμών είναι ίση με 0.5m οι επιφανειακές παραμορφώσεις στην

περιοχή της πρωτεύουσας αστοχίας μεγαλώνουν συναρτήσει της αύξησης του μέτρου ελαστικότητας. Οι παρατηρήσεις αυτές συνιστούν ότι σε πολύ πυκνές διατάξεις οπλισμών η αύξηση του μέτρου ελαστικότητας μπορεί να είναι δυσμενέστερη για τη διάδοση της τεκτονικής διάρρηξης.



**Σχήμα 3.35.** Επίδραση του μέτρου ελαστικότητας των οπλισμών: κατανομή της κανονικοποιημένης ως προς το ύψος κατακόρυφης μετακίνησης ( $y/H$ ) συναρτήσει της κανονικοποιημένης ως προς το ύψος οριζόντιας συνιστώσας του παραμορφωμένου φορέα ( $x/H$ ), για οπλισμένο επίχωμα πάχους 3m και: (α) εφαρμογή ενός γεωσυνθετικού οπλισμού, (β) εφαρμογή δύο γεωσυνθετικών οπλισμών, και (γ) εφαρμογή πέντε γεωσυνθετικών οπλισμών.

### Αποτελεσματικότητα των εξεταζόμενων μέτρων

Στόχος της αριθμητικής διερεύνησης της συμπεριφοράς οπλισμένου τεχνητού επιχώματος σε τεκτονική διάρρηξη ήταν η εξέταση της αποτελεσματικότητάς τους όσον αφορά στην προστασία του σύνθετου συστήματος στεγάνωσης. Για τον λόγο αυτό, στον Πίνακα 3.3. παρουσιάζονται τα μεγέθη της κατακόρυφης συνιστώσας της μετακίνησης του ρήγματος που απαιτούνται για την ανάπτυξη της κάθε στάθμης βλάβης, οι οποίες έχουν ήδη οριστεί για το σύστημα στεγάνωσης για καθεμία από τις διατάξεις που αναλύθηκαν. Παρατηρείται ότι, η κατακόρυφη συνιστώσα της μετακίνησης που απαιτείται για την πλήρη διάρρηξη του αργλικού φραγμού κυμαίνεται μεταξύ 3.5cm και 13cm, ενώ οι αντίστοιχες τιμές για να ισούται η μέγιστη τάση της γεωμεμβράνης με το όριο διαρροής της είναι 6.4cm και 25cm. Σημειώνεται ότι το όριο για την ανάπτυξη της στάθμης βλάβης 2 είναι τιμή της κατακόρυφης συνιστώσας της μετακίνησης του ρήγματος ίση με 6.4cm για την περίπτωση που δεν έχει εφαρμοστεί κανένα μέτρο προστασίας. Αυτό σημαίνει ότι για την περίπτωση εφαρμογής άοπλου επιχώματος πάχους ίσου με 2m δεν υφίσταται ευεργετική δράση για την προστασία της γεωμεμβράνης, συνεπώς δεν ενδείκνυται η εφαρμογή του συγκεκριμένου μέτρου.

Πιο συγκεκριμένα, οι οριακές τιμές της μετακίνησης αυξάνονται καθώς αυξάνεται ο αριθμός των χρησιμοποιούμενων οπλισμών, για σταθερή απόσταση οπλισμών η αύξηση του πάχους του οπλισμένου επιχώματος επίσης συνδέεται με μεγαλύτερες οριακές τιμές μετακίνησης. Ακόμη η αύξηση του μέτρου ελαστικότητας αυξάνει την απαιτούμενη μετακίνηση για την εκδήλωση των δύο επιπέδων αστοχίας, αλλά μόνο για σχετικά αραιές διατάξεις οπλισμών. Στην περίπτωση απόστασης των οπλισμών ίση με 0.5m παρατηρείται ότι περαιτέρω αύξηση του μέτρου ελαστικότητας συνεπάγεται μείωση των οριακών τιμών των μετακινήσεων.

Στον Πίνακα 3.4 παρατίθεται και η αποτελεσματικότητα της κάθε εξεταζόμενης περίπτωσης για την αντιμετώπιση των δύο σταθμών βλάβης που συνδέονται με την επάρκεια του συστήματος στεγάνωσης. Ως αποτελεσματικότητα ορίζεται η ποσοστιαία αύξηση της απαιτούμενης κατακόρυφης συνιστώσας της μετακίνησης για την ανάπτυξη της κάθε στάθμης βλάβης. Τη μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα και για τις δύο στάθμες βλάβης διαθέτει το οπλισμένο επίχωμα 3m με απόσταση οπλισμών ίση με 0.5m. Την αμέσως καλύτερη προστασία έναντι της διάρρηξης του αργλικού φραγμού παρατηρούνται για την περίπτωση επιχώματος 5m με απόσταση οπλισμών ίση με 1m. Αντιστοίχως για την ανάπτυξη στη γεωμεμβράνη τάσης ίσης με το όριο διαρροής



ευμενέστερη είναι η περίπτωση εφαρμογής επιχώματος 2m με απόσταση οπλισμών ίση με 0.5m.

**Πίνακας 3.3.** Απαιτούμενη κατακόρυφη συνιστώσα της μετακίνησης για την ανάπτυξη της κάθε στάθμης βλάβης σε κάθε εξεταζόμενη περίπτωση τεχνητού επιχώματος.

| H (m) | Οπλ. | E (MPa) | Φορτίο<br>(kN/m) | Κατακόρυφη συνιστώσα της μετακίνησης (cm) |          |
|-------|------|---------|------------------|-------------------------------------------|----------|
|       |      |         |                  | Στάθμη 1                                  | Στάθμη 2 |
| 2     | -    | -       | 200              | 3.5                                       | 6.4      |
| 2     | 1    | 500     | -                | 6.2                                       | 12.4     |
| 2     | 3    | 500     | -                | 5.3                                       | 11.6     |
| 2     | 1    | 500     | 200              | 5.4                                       | 9.2      |
| 2     | 3    | 500     | 200              | 8.4                                       | 20.0     |
| 2     | 1    | 1000    | 200              | 8.9                                       | 14.0     |
| 2     | 3    | 1000    | 200              | 5.8                                       | 12.4     |
| 2     | 1    | 1900    | 200              | 6.4                                       | 12.4     |
| 2     | 3    | 1900    | 200              | 5.9                                       | 10.3     |
| 3     | -    | -       | 200              | 4.4                                       | 7.0      |
| 3     | 1    | 500     | 200              | 4.3                                       | 7.5      |
| 3     | 2    | 500     | 200              | 5.5                                       | 10.0     |
| 3     | 5    | 500     | 200              | 13.0                                      | 25.0     |
| 3     | 1    | 1000    | 200              | 5.1                                       | 8.4      |
| 3     | 2    | 1000    | 200              | 7.5                                       | 13.6     |
| 3     | 5    | 1000    | 200              | 7.2                                       | 13.8     |
| 5     | -    | -       | 200              | 4.2                                       | 6.8      |
| 5     | 1    | 500     | 200              | 4.4                                       | 7.0      |
| 5     | 4    | 500     | 200              | 10.5                                      | 16.8     |

Από την ανάλυση των διατάξεων οπλισμένων επιχωμάτων προέκυψε ότι για επιχώματα μικρού πάχους η αύξηση των οπλισμών είναι πιο αποτελεσματική στην προστασία του συστήματος στεγάνωσης, σε σύγκριση με την αύξηση του μέτρου ελαστικότητας. Για μεγαλύτερου πάχους επιχώματα η βέλτιστη λύση θα μπορούσε να προκύψει έπειτα από μια επαναληπτική διαδικασία αύξησης του μέτρου ελαστικότητας και ακολούθως αύξησης του ποσοστού των οπλισμών.

**Πίνακας 3.4.** Αποτελεσματικότητα των εξεταζόμενων διατάξεων οπλισμένων ή μη επιχωμάτων εκφρασμένη ως η ποσοστιαία αύξηση της κατακόρυφης συνιστώσας της μετακίνησης για την ανάπτυξη της κάθε στάθμης βλάβης.

| H (m) | Οπλ. | E (MPa) | Φορτίο<br>(kN/m) | Αποτελεσματικότητα (%) |          |
|-------|------|---------|------------------|------------------------|----------|
|       |      |         |                  | Στάθμη 1               | Στάθμη 2 |
| 2     | -    | -       | 200              | 45.8                   | 0.0      |
| 2     | 1    | 500     | -                | 158.3                  | 93.8     |
| 2     | 3    | 500     | -                | 120.8                  | 81.3     |
| 2     | 1    | 500     | 200              | 125.0                  | 43.8     |
| 2     | 3    | 500     | 200              | 250.0                  | 212.5    |
| 2     | 1    | 1000    | 200              | 270.8                  | 118.8    |
| 2     | 3    | 1000    | 200              | 141.7                  | 93.8     |
| 2     | 1    | 1900    | 200              | 166.7                  | 93.8     |
| 2     | 3    | 1900    | 200              | 145.8                  | 60.9     |
| 3     | -    | -       | 200              | 83.3                   | 9.4      |
| 3     | 1    | 500     | 200              | 79.2                   | 17.2     |
| 3     | 2    | 500     | 200              | 129.2                  | 56.3     |
| 3     | 5    | 500     | 200              | 441.7                  | 290.6    |
| 3     | 1    | 1000    | 200              | 112.5                  | 31.3     |
| 3     | 2    | 1000    | 200              | 212.5                  | 112.5    |
| 3     | 5    | 1000    | 200              | 200.0                  | 115.6    |
| 5     | -    | -       | 200              | 75.0                   | 6.2      |
| 5     | 1    | 500     | 200              | 83.3                   | 9.4      |
| 5     | 4    | 500     | 200              | 337.5                  | 162.5    |

Τέλος, σημαντικό μέρος του γεωτεχνικού σχεδιασμού αποτελεί και ο έλεγχος της επάρκειας του γεωσυνθετικού οπλισμού. Η αντοχή σε αξονικό εφελκυσμό των γεωπλεγμάτων μπορεί να λάβει εξαιρετικά μεγάλες τιμές (π.χ. 200MPa), όμως η τιμή σχεδιασμού μειώνεται από τον συντελεστή ασφαλείας έναντι ερπυσμού και έναντι βλάβης κατά την εγκατάσταση. Οι προτεινόμενες τιμές για τους εν λόγω συντελεστές είναι μέρος των προδιαγραφών των γεωπλεγμάτων. Στον Πίνακα 3.5 παρατίθενται ενδεικτικά οι μέγιστες τιμές της αξονικής τάσης που αναπτύχθηκαν στα κατώτερα γεωπλέγματα κατά την ανάπτυξη της οριακής τιμής της μετακίνησης για κάθε επίπεδο αστοχίας. Οι τιμές αυτές κυμαίνονται μεταξύ 15MPa και 110MPa και δείχνουν ότι είναι εφικτός ο ασφαλής σχεδιασμός ενός τέτοιου συστήματος έναντι τεκτονικής διάρρηξης.

**Πίνακας 3.5.** Μέγιστη αξονική τάση επί του κατώτερου γεωσυνθετικού οπλισμού των εξεταζόμενων διατάξεων οπλισμένων επιχωμάτων για την ανάπτυξη της κάθε στάθμης βλάβης.

| H (m) | Οπλ. | E (MPa) | Φορτίο<br>(kN/m) | Μέγιστη αξονική τάση (kPa) |          |
|-------|------|---------|------------------|----------------------------|----------|
|       |      |         |                  | Στάθμη 1                   | Στάθμη 2 |
| 2     | 1    | 500     | -                | 15233.4                    | 24042.1  |
| 2     | 3    | 500     | -                | 15308.1                    | 25360.0  |
| 2     | 1    | 500     | 200              | 29562.8                    | 45445.5  |
| 2     | 3    | 500     | 200              | 34644.0                    | 63866.0  |
| 2     | 1    | 1000    | 200              | 69735.0                    | 99339.3  |
| 2     | 3    | 1000    | 200              | 41799.7                    | 71179.7  |
| 2     | 1    | 1900    | 200              | 64489.1                    | 110470.0 |
| 2     | 3    | 1900    | 200              | 70441.6                    | 106043.0 |
| 3     | 1    | 500     | 200              | 28812.9                    | 46358.2  |
| 3     | 2    | 500     | 200              | 33449.3                    | 47574.4  |
| 3     | 5    | 500     | 200              | 44966.4                    | 67703.2  |
| 3     | 1    | 1000    | 200              | 52515.8                    | 75308.9  |
| 3     | 2    | 1000    | 200              | 55048.0                    | 82094.9  |
| 3     | 5    | 1000    | 200              | 47248.1                    | 72144.9  |
| 5     | 1    | 500     | 200              | 20239.6                    | 30084.3  |
| 5     | 4    | 500     | 200              | 44614.4                    | 60625.3  |

### 3.5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματα μίας εκτενούς παραμετρικής αριθμητικής διερεύνησης, η οποία είχε ως στόχο την μελέτη της επίδρασης της ανάπτυξης μετακινήσεων ενεργού ρήγματος κάτω από ένα Χ.Υ.Τ.Α., καθώς και της αποτελεσματικότητας της εφαρμογής πρακτικών μεθόδων προστασίας των κατασκευών αυτών έναντι καταπόνησης λόγω τεκτονικής διάρρηξης.

Αρχικά αποδείχτηκε ότι η διάδοση των μόνιμων παραμορφώσεων που αναπτύσσονται λόγω της τεκτονικής διάρρηξης εντός της απορριμματικής μάζας, εξαρτώνται από τον τύπο του ρήγματος, τη γωνία βύθισής του, και τη θέση του ρήγματος. Επίσης, προσδιορίστηκε η καταπόνηση του σύνθετου συστήματος στεγάνωσης. Διαπιστώθηκε ότι η αύξηση της σφιγρότητας του αργιλικού φραγμού και του μέτρου ελαστικότητας της γεωμεμβράνης στεγάνωσης επιδρούν δυσμενώς στην καταπόνηση του συστήματος στεγάνωσης λόγω τεκτονικής διάρρηξης. Ακόμη τονίστηκε

ότι είναι εφικτή η επάρκεια τόσο του αργιλικού φραγμού όσο και της γεωμεμβράνης στεγάνωσης ειδικά για μικρά μεγέθη μετακινήσεων.

Συγκεκριμένα, για κανονικό ρήγμα  $45^\circ$  η κατακόρυφη συνιστώσα της μετακίνησης του ρήγματος για την πλήρη διάρρηξη του αργιλικού φραγμού είναι ίση με 2.4cm, ενώ για την ανάπτυξη μέγιστης αξονικής τάσης ίσης με το όριο διαρροής της είναι αντίστοιχα ίση με 6.4cm. Συνιστάται όμως προσοχή στην εφαρμογή των αριθμητικών μεθόδων, καθώς διαπιστώθηκε ότι η ακρίβεια των αποτελεσμάτων είναι συνάρτηση της ποιότητας του καννάβου των πεπερασμένων στοιχείων. Τέλος, προτάθηκαν τέσσερις στάθμες βλαβών, οι δύο πρώτες εκ των οποίων σχετίζονται με το σύστημα στεγάνωσης.

Καθώς υφίσταται το ενδεχόμενο ανάπτυξης μετακινήσεων κατά την εκδήλωση μιας τεκτονικής διάρρηξης, οι οποίες δύνανται να λαμβάνουν τιμές μεγαλύτερες των ανεκτών για την επάρκεια του σύνθετου συστήματος στεγάνωσης, εξετάστηκαν και σχετικά μέτρα ενίσχυσης. Αρχικά εκτιμήθηκε η αποτελεσματικότητα κάποιων προτάσεων που βασίζονται: στην αύξηση του πάχους της αργιλικής στρώσης, την προσθήκη επιπρόσθετης γεωμεμβράνης και την αύξηση του πάχους των γεωμεμβρανών. Η αποτελεσματικότητα των εξεταζόμενων περιπτώσεων ήταν αρκετά ικανοποιητική, ειδικά για την προστασία της γεωμεμβράνης. Συγκεκριμένα, προτείνεται κατά τη διερεύνηση εφαρμογής μέτρων προστασίας του συστήματος στεγάνωσης έναντι τεκτονικής διάρρηξης να ακολουθείται μια επαναληπτική διαδικασία αύξησης του πάχους της αργίλου, προσθήκης επιπρόσθετης γεωμεμβράνης και αύξησης του πάχους της γεωμεμβράνης. Η διαδικασία αυτή συναρτήσει και των οικονομικών στοιχείων της κάθε λύσης θα οδηγήσει στη βέλτιστη τεχνικο-οικονομική λύση.

Επιπλέον εξετάστηκε η δυνατότητα να χρησιμοποιηθεί ένα τεχνητό γεωσυνθετικά - οπλισμένο επίχωμα ως μέτρο προστασίας έναντι τεκτονικής διάρρηξης. Τα αποτελέσματα της εκτενούς παραμετρικής διερεύνησης συγκλίνουν στο συμπέρασμα ότι η επίδραση της οπλισμένης γης είναι ιδιαίτερα ευνοϊκή, ακόμη και για την περίπτωση της διάρρηξης του αργιλικού φραγμού. Η αποτελεσματικότητα των διατάξεων των οπλισμένων επιχωμάτων αυξάνει με την αύξηση του ύψους του επιχώματος, αλλά και με τη μείωση της απόστασης των οπλισμών. Ιδιαίτερη προσοχή χρειάζεται στην περίπτωση οπλισμών μεγάλης ακαμψίας, καθώς η τοποθέτησή τους σε πυκνή διάταξη δίνει λιγότερο ευμενή αποτελέσματα. Τέλος, πρέπει να τονιστεί ότι ο επαρκής σχεδιασμός

ενός τέτοιου συστήματος αποδείχτηκε ότι είναι εφικτός, δεδομένης της πληθώρας των γεωπλεγμάτων με διάφορα τεχνικά χαρακτηριστικά που είναι διαθέσιμα στο εμπόριο.

Εν κατακλείδι, τα αποτελέσματα της παρούσας παραμετρικής διερεύνησης παρέχουν χρήσιμες πληροφορίες όσον αφορά στη συμπεριφορά των Χ.Υ.Τ.Α. έναντι τεκτονικής διάρρηξης καθώς και την αποτελεσματικότητα διαφόρων μέτρων προστασίας τους. Επίσης, δεν θα πρέπει σε καμία περίπτωση να υποκαθιστούν ειδικές μελέτες οι οποίες λαμβάνουν υπόψη τις επιτόπου γεωτεχνικές συνθήκες, τις ιδιότητες της διάρρηξης (τύπος ρήγματος, γωνία βύθισης και μέγεθος μετακίνησης), καθώς και τις ιδιότητες του κατασκευασμένου σύνθετου συστήματος στεγάνωσης.

### 3.6 ΑΝΑΦΟΡΕΣ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

ABAQUS, (2004) "Analysis User's Manual Version 6.4", ABAQUS Inc., USA.

Anastasopoulos, I., and Gazetas, G., (2007) "Foundation-Structure Systems over a Rupturing Normal Fault: Part I. Observations after the Kocaeli 1999 Earthquake", *Bulletin of Earthquake Engineering*, 5(3), 253-275.

Anastasopoulos, I., Gazetas, G., Bransby, M.F., Davies, M.C.R., and El Nahas A., (2007) "Fault rupture propagation through sand: Finite-element analysis and validation through centrifuge experiments", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 133(8), 943-958.

Bray J.D., (2001) "Developing Mitigation Measures for the Hazards Associated with Earthquake Surface Fault Rupture", *Workshop on Seismic Fault-Induced Failures - Possible Remedies for Damage to Urban Facilities*, University of Tokyo Press, 55-79.

Bray, J.D., and Kelson, K.I., (2006) "Observations of Surface Fault Rupture from the 1906 Earthquake in the Context of Current Practice", *Earthquake Spectra*, 22(2), 69-89.

Bray, J.D., Seed, R.B., Cluff, L.S., and Seed, H.B., (1994a) "Earthquake fault rupture propagation through soil", *Journal of Geotechnical Engineering*, 120 (3), 543-561.

Bray, J.D., Seed, R.B., and Seed, H.B., (1994b) "Analysis of earthquake fault rupture propagation through cohesive soil", *Journal of Geotechnical Engineering*, 120 (3), 562-580.

Cole, D.A., and Lade, P.V., (1984) "Influence zones in alluvium over dip-slip faults", *Journal of Geotechnical Engineering*, 110 (5), 599-615.

Duncan, J.M., and Lefebvre, G., (1973) "Earth pressures on structures due to fault movement", *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 99 (SM12), 1153-1163.

EC, (1999) "On the landfill of waste-Council Directive 1999/31/EC", *Official Journal of the European Communities L 182*, 0001 - 0019.

EPA, (1993) "MSW landfill criteria technical manual", *Environmental Protection Agency, USA*.

Johansson, J., and Konagai K., (2006) "Fault induced permanent ground deformations - an experimental comparison of wet and dry soil and implications for buried structures", *Soil dynamics and earthquake engineering*, 26, 45 -53.

- Kelson, K.I., Kang, K.-H., Page, W.D., Lee, C.-T., and Cluff, L.S., (2001) "Representative Styles of Deformation along the Chelungpu Fault from the 1999 Chi-Chi (Taiwan) Earthquake: Geomorphic Characteristics and Responses of Man-Made Structures", *Bulletin of the Seismological Society of America*, 91(5), 930-952.
- Koerner, R.M., (1994) "Designing with geosynthetics", Prentice hall, Inc., Third edition.
- Lade, P.V., Cole, D.A., and Cummings, D., (1984) "Multiple failure surfaces over dip-slip faults", *Journal of Geotechnical Engineering*, 110 (5), 616-627.
- Lee, J.W., Hamada, M., Tabuchi, G., and Suzuki, K., (2004) "Prediction of fault rupture propagation based on physical model tests in sandy soil deposit", in *Proceedings of the 13<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver, Canada, paper No. 119.
- Lin, M.-L., Chung, C.-F., and Jeng, F.-S., (2006) "Deformation of overburden soil induced by thrust fault slip", *Engineering Geology*, 88, 70-89.
- Loukidis, D., and Bouckovalas, G., (2001) "Numerical simulation of active fault rupture propagation through dry soil", in *Proceedings of the 4<sup>th</sup> International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics and Symposium in Honor of Professor W.D. Liam Finn*, San Diego, CA, 26-31.
- Papadimitriou, A., Loukidis, D., Bouckovalas, G., and Karamitros, D., (2007) "Zone of excessive ground surface distortion due to dip-slip fault rupture", in *Proceedings of the 4<sup>th</sup> International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*, Thessaloniki, Greece.
- Scott, R.F., and Schoustra, J.J., (1974) "Nuclear power plant siting on deep alluvium", *Journal of Geotechnical Engineering Division*, 100(4), 449-459.
- Sharma, H., and Lewis, S.P., (1994) "Waste containment systems, waste stabilization and landfills: design and evaluation", John Wiley & Sons, Inc., USA.
- Wells, D.L., and Coppersmith, K.J., (1994) "New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement", *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84(4), 974 - 1002.

### Δυναμική απόκριση Χ.Υ.Τ.Α.

#### 4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο αντισεισμικός σχεδιασμός των Χ.Υ.Τ.Α. όπως παρουσιάστηκε και στη βιβλιογραφική ανασκόπηση του δευτέρου Κεφαλαίου αποτελείται κυρίως από δύο βασικά στάδια. Στο πρώτο στάδιο προσδιορίζεται η δυναμική απόκριση, ενώ ακολούθως εκτιμάται η δυναμική ευστάθεια της κατασκευής. Συνήθως, η μελέτη της δυναμικής απόκρισης πραγματοποιείται μέσω αναλύσεων μονοδιάστατης απόκρισης στρωσιγενούς διατομής λόγω της κατακόρυφης διάδοσης διατμητικών κυμάτων (Schnabel et al., 1972). Όμως, η δυναμική συμπεριφορά των Χ.Υ.Τ.Α. εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις ιδιαιτερότητες της γεωμετρίας τους, έπειτα από την απόθεση και συμπύκνωση των απορριμμάτων και τη διαμόρφωση της προσωρινής ή τελικής χαρακτηριστικής διατομής τους. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, οι τυπικές διατομές που αναφέρονται σε εξειδικευμένα συγγράμματα πιστοποιούν ότι οι Χ.Υ.Τ.Α. μπορεί να χαρακτηρίζονται από επιφανειακές και άλλες μορφολογικές ανωμαλίες (Sharma and Lewis, 1994 και Bray and Repetto, 1994). Οι επιφανειακές ανωμαλίες των Χ.Υ.Τ.Α. σχετίζονται ουσιαστικά με τη διαμόρφωση των επιφανειακών πρανών της γεωκατασκευής στο υπέργειο τμήμα της (εφόσον υφίσταται), ενώ οι μη επιφανειακές ανωμαλίες σχετίζονται με τη γεωμορφολογία του υποβάθρου επί του οποίου αποτίθενται τα απορρίμματα (κοιλάδα ή φυσικό πρανές).

Στη γενικότερη περίπτωση της δυναμικής εδαφικής απόκρισης λόγω της διέλευσης σεισμικών κυμάτων, οι επιφανειακές ανωμαλίες σχετίζονται με την τοπογραφία, δηλαδή αφορούν πρανή, λόφους και φυσικές κοιλάδες. Αντιστοίχως, οι μη επιφανειακές ανωμαλίες σχετίζονται με τη γεωμορφολογία του υπεδάφους, δηλαδή με κοιλάδες αλλουβιακών αποθέσεων, γεωλογικά ρήγματα, κ.λπ. (Kawase, 1993). Η ερευνητική δραστηριότητα που έχει αναπτυχθεί στο πεδίο της επίδρασης των ειδικών τοπογραφικών και γεωμορφολογικών συνθηκών στην εδαφική δυναμική απόκριση,

υπήρξε αρκετά έντονη τις τελευταίες δεκαετίες. Αρκετές από τις βλάβες που παρατηρήθηκαν έπειτα από σεισμούς όπως της Χιλής (1985), του Αιγίου (1995) και της Αθήνας (1999) έχουν ερμηνευθεί ως αποτέλεσμα της τοπογραφικής επιδείνωσης (Celebi, 1991, Athanasopoulos et al., 1999, και Gazetas et al., 2002), ενώ παράλληλα καταγραφές σε μετασεισμικές δονήσεις των σεισμών της Καλιφόρνια (Coalinga 1983, και Supersition Hills 1987) παρέχουν στοιχεία για την ενίσχυση του σεισμικού κραδασμού σε λοφώδεις περιοχές (Celebi, 1991).

Αρκετές θεωρητικές μελέτες έχουν εξετάσει τα φαινόμενα της κυματικής διάδοσης που συνδέονται κυρίως με την κατώτερη ή την ανώτερη γεωμετρική ασυνέχεια φυσικών πρανών, καθώς και με κοιλάδες ή λόφους τριγωνικής ή μη γεωμετρίας (π.χ. Sanchez-Sesma and Campillo, 1993 και Kawase, 1993). Παρατηρήθηκε ότι τα φαινόμενα αυτά εξαρτώνται κυρίως από τον τύπο του κύματος, τη γωνία διάδοσης, αλλά και την αδιαστατοποιημένη συχνότητα του κύματος, η οποία ορίζεται ως ο λόγος του ύψους του πρανούς προς το μήκος κύματος. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι η σχετικά απλή περίπτωση διάδοσης κατακόρυφων διατμητικών κυμάτων σχετίζεται με την ανάπτυξη των εξής κυματικών πεδίων κατά την πρόσπτωσή τους στον πόδα ενός πρανούς (κοίλη γεωμετρία):

- ανακλώμενα SV και P κύματα,
- διαθλώμενα SV και P κύματα ως αποτέλεσμα της ασυνέχειας μεταξύ των ανακλώμενων SV και P ακτινών αντίστοιχα, και
- κύματα Rayleigh.

Τα προαναφερθέντα κύματα προκύπτουν ως αποτέλεσμα των συνοριακών συνθηκών που σχετίζονται με την ελεύθερη επιφάνεια, δηλαδή μηδενική τάση (ορθή και διατμητική) κατά μήκος της.

Ως αποτέλεσμα των προαναφερθέντων φαινομένων κυματικής διάδοσης, μπορεί να θεωρηθεί η αναπτυσσόμενη «παρασιτική» κατακόρυφη συνιστώσα της επιτάχυνσης κοντά στην αιχμή του πρανούς για κατακόρυφη διάδοση SV κυμάτων (οριζόντια επιβαλλόμενη κίνηση), καθώς και η ενίσχυση της οριζόντιας συνιστώσας της επιτάχυνσης, η οποία όμως χαρακτηρίζεται από έντονη διακύμανση συναρτήσει της απόστασης (Bouckovalas and Papadimitriou, 2005). Όπως προέκυψε από την προαναφερθείσα παραμετρική διερεύνηση, η οποία διεξήχθη με αριθμητικές αναλύσεις με τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών, η επίδραση της τοπογραφίας ενισχύεται



καθώς αυξάνουν η κλίση του πρανούς και ο λόγος του ύψους προς το μήκος κύματος, ο οποίος συνήθως για τη διερεύνηση τοπογραφικής επίδρασης αναφέρεται ως αδιαστατοποιημένη συχνότητα.

Τα συμπεράσματα αυτά συμφωνούν με τις παρατηρήσεις, οι οποίες διατυπώθηκαν έπειτα από αριθμητικές αναλύσεις από τους Assimaki et al. (2005) με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, οι οποίοι επίσης επισημαίνουν ότι η αδιαστατοποιημένη συχνότητα επηρεάζει και τη θέση ανάπτυξης της μέγιστης ενίσχυσης. Η ποσοτικοποίηση της τοπογραφικής επίδρασης συχνά αναπαρίσταται ως ο λόγος του φάσματος Fourier της απόκρισης (που προέκυψε από την αριθμητική ανάλυση της διδιάστατης γεωμετρίας) ως προς το αντίστοιχο φάσμα Fourier της απόκρισης για συνθήκες ελευθέρου πεδίου. Ο λόγος αυτός αναφέρεται ως συντελεστής τοπογραφικής ενίσχυσης ή επιδείνωσης (Topography Amplification Factor ή TAF) και δύναται να αποδώσει την συχνοτική εξάρτησή του φαινομένου υπό προϋποθέσεις, οι οποίες σχετίζονται με τα συχνοτικά χαρακτηριστικά της επιβαλλόμενης διέγερσης (Gazetas et al., 2002 και Assimaki et al., 2005).

Εκτός από τη θεωρία της κυματικής διάδοσης, η δυναμική απόκριση εδαφικής μάζας πυραμιδοειδούς γεωμετρίας έχει διερευνηθεί και για την περίπτωση χωμάτων φραγμάτων εφαρμόζοντας τη θεωρία της διατμητικής δοκού (Ambraseys, 1960). Πιο συγκεκριμένα, στην εργασία αυτή εξετάστηκε η περίπτωση της δυναμικής απόκρισης κόλουρης πυραμίδας για τριδιάστατες και διδιάστατες συνθήκες, και προέκυψαν αναλυτικές σχέσεις έπειτα από την υιοθέτηση κάποιων ρεαλιστικών παραδοχών. Στις παραδοχές αυτές συμπεριλαμβάνονται: (α) η θεώρηση ελαστικής συμπεριφοράς του υλικού με σταθερό, ομοιογενές μέτρο διάτμησης, (β) η έδραση επί απολύτως δύσκαμπτου βραχώδους υποβάθρου ορθογωνικής διαμήκους διατομής, (γ) η σχετικά ήπια κλίση των πλευρικών πρανών, και (δ) η ανάπτυξη μόνο διατμητικών τάσεων κατά την ταλάντωση από την εφαρμογή οριζόντιας φόρτισης. Ενδεικτικά παρατίθεται η εξίσωση των ιδιοσυχνοτήτων μίας απειρομήκους κόλουρης πυραμίδας για διδιάστατες συνθήκες:

$$T_n = 2\pi \frac{H}{\alpha_n V_s} \quad (4.1)$$

όπου  $\alpha_n$  παράμετρος που εξαρτάται από το λόγο αποκοπής  $k$ ,  $H$  το ύψος της πλήρους πυραμίδας και  $V_s$  η ταχύτητα διάδοσης του διατμητικού κύματος. Ο λόγος αποκοπής

ορίζεται ως ο λόγος του αποκοιπτόμενου ύψους προς το ύψος της πλήρους πυραμίδας. Όταν είναι ίσος με τη μονάδα η παράμετρος  $a_n$  λαμβάνει τιμή ίση με 2.4, ενώ για μεγαλύτερες τιμές του λόγου αποκοπής αυξάνεται και η τιμή της παραμέτρου.

Η εργασία αυτή αποτέλεσε το έναυσμα για τη διερεύνηση της επίδρασης διαφόρων παραδοχών στην υπολογιζόμενη δυναμική απόκριση και στις προτεινόμενες αναλυτικές σχέσεις. Διατυπώθηκαν λοιπόν τροποποιήσεις που αφορούν: (α) την ανομοιογένεια του υλικού εκφραζόμενη συναρτήσει του μέτρου διάτμησης, (β) τη μη ορθογωνική διατομή του υποβάθρου, (γ) την διεύθυνση της διέγερσης, και (δ) τη μη γραμμική και ανελαστική συμπεριφορά του εδάφους (Gazetas, 1987). Επιπλέον, η σύγκριση της αναλυτικής διαδικασίας με αποτελέσματα από την εφαρμογή της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων συνιστά ότι, τα αποτελέσματα που βασίζονται στη θεωρία της διατμητικής δοκού υπερεκτιμούν την πρώτη ιδιοσυχνότητα του συστήματος κατά περίπου 5%, γεγονός που αποδίδεται στη μη συνεκτίμηση της κατακόρυφης συνιστώσας της μετακίνησης (Gazetas, 1987).

Επιπροσθέτως, σημειώνεται ότι η προαναφερθείσα αναλυτική μεθοδολογία για την περίπτωση της απειρομήκους (διδιάστατης) κόλουρης πυραμίδας, δεν λαμβάνει υπόψη την επίδραση της κλίσης των πρανών. Όμως, από την ανάλυση της διάδοσης κυμάτων SV και SH σε ομοιογενές τριγωνικό ανάγλυφο (τα γεωμετρικά στοιχεία του είναι αντίστοιχα με την πλήρη πυραμίδα χωρίς τη θέωση δόσκαμπτου βραχώδους υποβάθρου), παρατηρήθηκε ότι η ενίσχυση της σεισμικής κίνησης αποτελεί συνάρτηση της κλίσης των πρανών (Sanchez-Sesma, 1990).

## 4.2 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

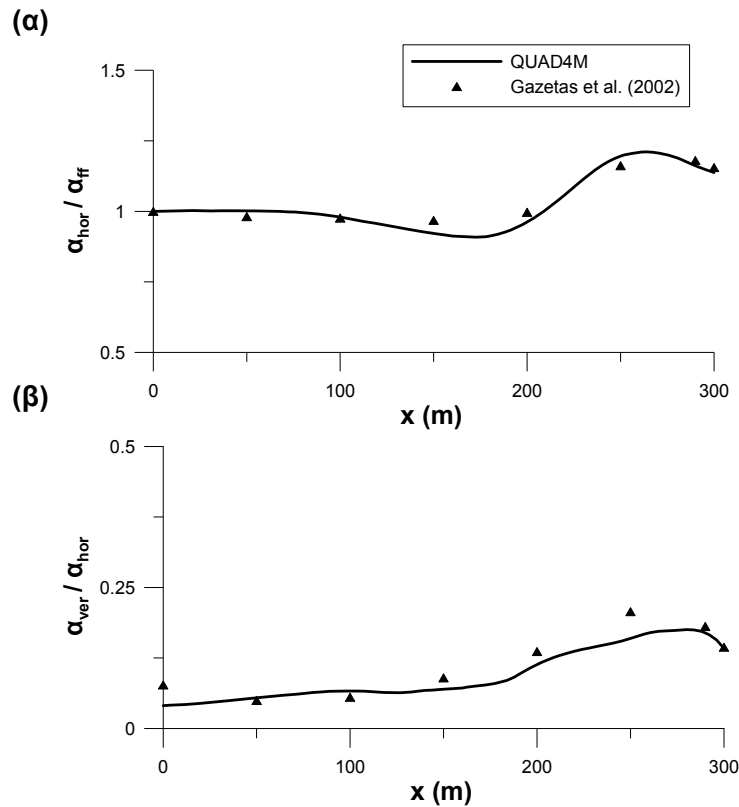
Προκειμένου να διερευνηθούν τα χαρακτηριστικά της δυναμικής απόκρισης των Χ.Υ.Τ.Α., επιλέχθηκε μία κατάλληλη μεθοδολογία με τη χρήση της οποίας θα ήταν εφικτή η συνεκτίμηση των σύνθετων φαινομένων κυματικής διάδοσης, τα οποία όπως προαναφέρθηκε χαρακτηρίζουν επιφανειακές ή μη ανωμαλίες. Για την αποφυγή των περιορισμών που εμπεριέχονται στις προαναφερθείσες αναλυτικές μεθοδολογίες, στην παρούσα διερεύνηση εφαρμόστηκε η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων. Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκε ο κώδικας QUAD4M (Hudson et al., 1994) με τον οποίο είναι εφικτή η δυναμική ανάλυση σε συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης, ενώ η μη γραμμική συμπεριφορά του εδάφους προσομοιώνεται μέσω της ισοδύναμη γραμμικής

μεθόδου. Σύμφωνα με την τελευταία, διεξάγεται μια επαναληπτική διαδικασία έως ότου το μέτρο διάτμησης και η απόσβεση του υλικού να συγκλίνουν σε μια τιμή συμβατή με την ισοδύναμη διατμητική παραμόρφωση. Η απόσβεση λαμβάνεται υπόψη ως απόσβεση κατά Rayleigh, η οποία όμως προσδιορίζεται βάσει δύο τιμών συχνότητας για να μην παρατηρείται υπερβολικά μεγάλη απόσβεση στις μεγαλύτερες συχνότητες. Σημειώνεται επίσης ότι η εν λόγω προσέγγιση για την προσομοίωση της μη γραμμικής συμπεριφοράς του εδάφους θεωρείται ακριβής μόνο για μέγιστη διατμητική παραμόρφωση της τάξης μεγέθους του 1% (Ishihara, 1996).

Αρχικά αναλύθηκε η καλά τεκμηριωμένη περίπτωση της δυναμικής απόκρισης της περιοχής των Αδαμών (Gazetas et al., 2002 και Assimaki et al., 2005) προκειμένου να επαληθευθεί η ακρίβεια της υιοθετούμενης μεθοδολογίας σε προβλήματα εκτίμησης της τοπογραφικής επιδείνωσης. Για τον σκοπό αυτό διαμορφώθηκε προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων αντιπροσωπευτικό της τοπογραφικής ασυνέχειας των δύο προαναφερθεισών εργασιών, το οποίο διακριτοποιήθηκε με τριγωνικά στοιχεία επίπεδης παραμόρφωσης μεγέθους 4m. Επιπλέον, θεωρήθηκε ομοιογενές εδαφικό υλικό με σταθερή καθ' ύψος ταχύτητα διάδοσης του διατμητικού κύματος, ενώ η προσομοίωση της απόσβεσης ακτινοβολίας πραγματοποιήθηκε με τη θεώρηση ειδικών συνόρων τα οποία δεν επιτρέπουν τον πλασματικό εγκλωβισμό των σεισμικών κυμάτων. Η δυναμική απόκριση της εξεταζόμενης περίπτωσης υπολογίστηκε για την κατακόρυφη διάδοση SV κυμάτων των οποίων η χρονοϊστορία επιτάχυνσης περιγράφεται από την κατανομή ενός απλού παλμού Ricker. Οι αριθμητικές αναλύσεις διεξήχθησαν για διάφορες τιμές της κεντρικής συχνότητας του παλμού, έτσι ώστε να είναι εφικτή η ευθεία αντιπαραβολή των αποτελεσμάτων με τις προαναφερθείσες εργασίες.

Στο Σχήμα 4.1 απεικονίζονται οι κατανομές της οριζόντιας και κατακόρυφης συνιστώσας της επιτάχυνσης για την περίπτωση παλμού Ricker κεντρικής συχνότητας ίσης με 3Hz. Παρατηρείται ότι η κανονικοποιημένη (ως προς την επιτάχυνση του ελεύθερου πεδίου) οριζόντια συνιστώσα της επιτάχυνσης ( $a_{hor}/a_{ff}$ ) παρουσιάζει μικρή απόκλιση μεταξύ των δύο διαφορετικών αριθμητικών μεθοδολογιών. Λίγο μεγαλύτερη είναι η διαφορά των εκτιμώμενων τιμών της «παρασιτικής» κατακόρυφης επιτάχυνσης. Στο Σχήμα 4.2. παρουσιάζονται οι κατανομές της κανονικοποιημένης οριζόντιας και κατακόρυφης συνιστώσας της επιτάχυνσης ως προς την επιτάχυνση του ελεύθερου πεδίου. Σημειώνεται δε ότι τα αποτελέσματα των δύο διαφορετικών αριθμητικών προσομοιώσεων συγκρίνονται για διάφορες τιμές της κεντρικής συχνότητας του παλμού

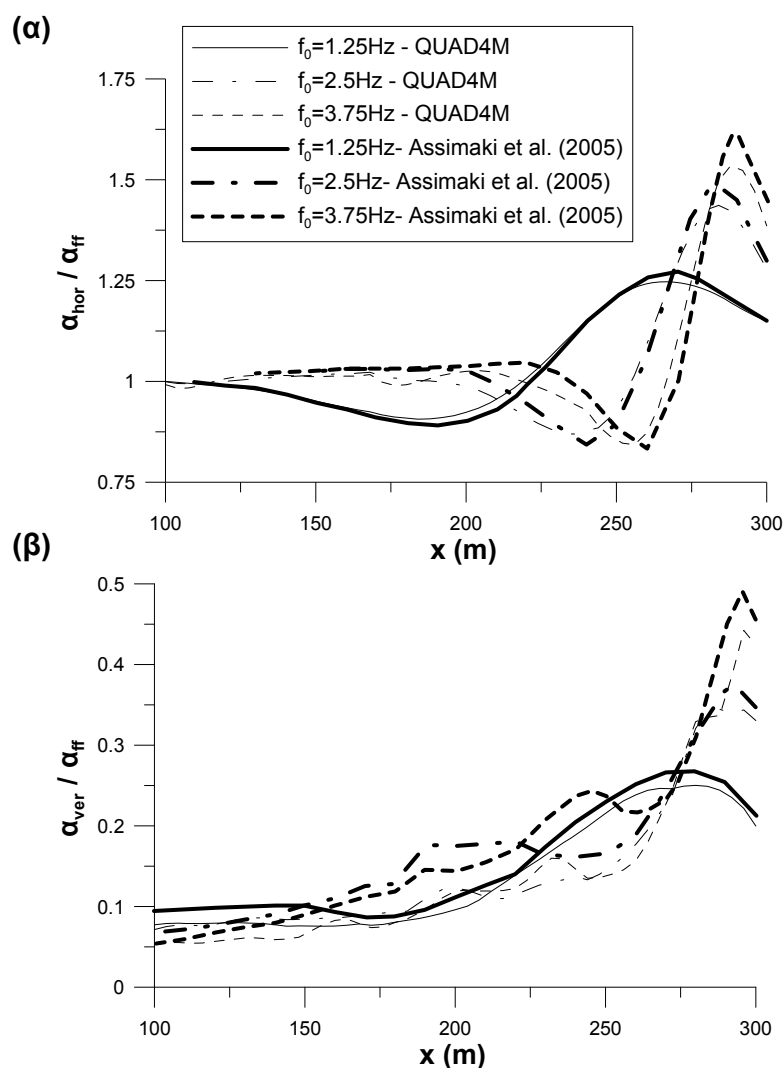
Ricker (1.25Hz, 2.5Hz, και 3.75Hz). Διαπιστώνεται ότι υφίσταται ελάχιστη απόκλιση των αποτελεσμάτων όσον αφορά στην οριζόντια συνιστώσα της επιτάχυνσης, η οποία αυξάνεται λίγο στην περίπτωση της «παρασιτικής» κατακόρυφης επιτάχυνσης. Οι διαφορές αυτές μπορεί να οφείλονται σε δύο παράγοντες: (α) το σημείο που αντιστοιχεί σε συνθήκες ελευθέρου πεδίου πιθανώς διαφέρει για τις δύο μεθοδολογίες, γεγονός το οποίο όμως θα επηρέαζε εξίσου τις δύο συνιστώσες της κανονικοποιημένης επιτάχυνσης, και (β) οι παραδοχές της αριθμητικής προσομοίωσης (π.χ. διακριτοποίηση, συνοριακές συνθήκες) διαφέρουν για τις δύο μεθοδολογίες επιδρώντας περισσότερο κατά συνέπεια στην υπολογιζόμενη «παρασιτική» κατακόρυφη επιτάχυνση. Η τελευταία περίπτωση αποτελεί και την πιθανότερη εκδοχή.



**Σχήμα 4.1.** Επαλήθευση της εφαρμοζόμενης μεθοδολογίας υπολογισμού της δυναμικής απόκρισης για την εκτίμηση της επίδρασης της τοπογραφίας μέσω σύγκρισης με τα αριθμητικά αποτελέσματα των Gazetas et al. (2002). Παρουσιάζονται: (α) η κατανομή του λόγου της οριζόντιας επιτάχυνσης προς την επιτάχυνση ελευθέρου πεδίου ( $\alpha_{hor} / \alpha_{ff}$ ), και (β) η κατανομή του λόγου της κατακόρυφης επιτάχυνσης προς την οριζόντια επιτάχυνση ( $\alpha_{ver} / \alpha_{hor}$ ).

Συμπερασματικά, η επισκόπηση των αποτελεσμάτων της αριθμητικής επαλήθευσης έδειξε ότι η αριθμητική μεθοδολογία, η οποία πρόκειται να εφαρμοστεί περαιτέρω για την εκτίμηση της δυναμικής απόκρισης των Χ.Υ.Τ.Α., μπορεί να αποδώσει με επαρκή

ακρίβεια εν συγκρίσει με άλλες αριθμητικές μεθοδολογίες, τα φαινόμενα τοπογραφικής επιδείνωσης τα οποία αναμένεται να παρατηρηθούν.



**Σχήμα 4.2.** Επαλήθευση της εφαρμοζόμενης μεθοδολογίας υπολογισμού της δυναμικής απόκρισης για την εκτίμηση της επίδρασης της τοπογραφίας μέσω σύγκρισης με τα αριθμητικά αποτελέσματα των Assimakis et al. (2005). Παρουσιάζονται: (α) η κατανομή του λόγου της οριζόντιας επιτάχυνσης προς την επιτάχυνση ελευθέρου πεδίου ( $\alpha_{\text{hor}}/\alpha_{\text{ff}}$ ), και (β) η κατανομή του λόγου της κατακόρυφης επιτάχυνσης προς την επιτάχυνση ελευθέρου πεδίου ( $\alpha_{\text{ver}}/\alpha_{\text{ff}}$ ) για τρεις τιμές της κεντρικής συχνότητας του παλμού Ricker.

### 4.3 ΓΡΑΜΜΙΚΩΣ ΕΛΑΣΤΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΑΠΟΡΡΙΜΜΑΤΙΚΟΥ ΥΛΙΚΟΥ

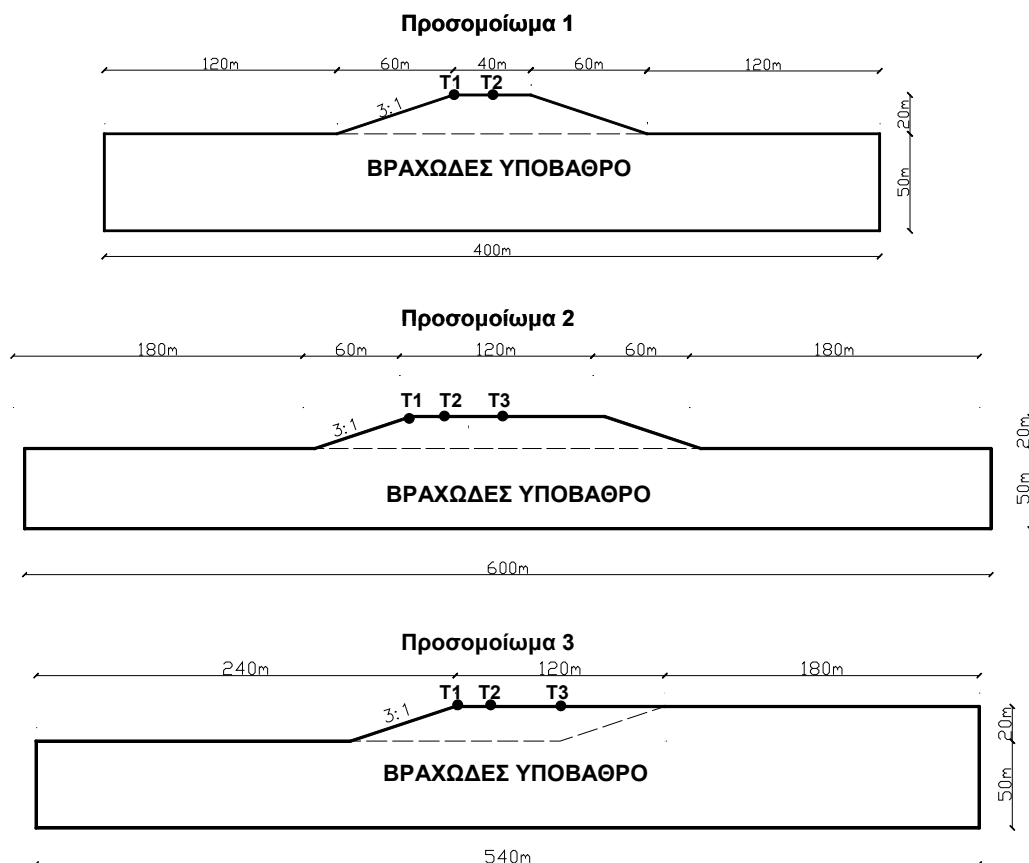
Αρχικά εκτιμάται η δυναμική απόκριση των εξεταζόμενων Χ.Υ.Τ.Α. μελετήθηκε θεωρώντας γραμμικώς ελαστική συμπεριφορά του απορριμματικού υλικού. Στόχος της διερεύνησης είναι να εξεταστεί η επίδραση των φαινομένων κυματικής διάδοσης στην απόκριση, αλλά και να συσχετιστούν τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων με τις αναλυτικές σχέσεις της βιβλιογραφίας, όπου αυτό είναι εφικτό. Παράλληλα,

ερευνάται η επίδραση των πιο σημαντικών παραμέτρων που σχετίζονται με το εξεταζόμενο πρόβλημα, δηλαδή τα γεωμετρικά στοιχεία της διατομής του Χ.Υ.Τ.Α., οι δυναμικές ιδιότητες του απορριμματικού υλικού και οι ιδιότητες της σεισμικής διέγερσης (συχνотικό περιεχόμενο). Σημειώνεται επίσης ότι το έδαφος της θεμελίωσης θεωρείται καταρχάς απολύτως δύσκαμπτος βράχος, καθώς η αλληλεπίδραση Χ.Υ.Τ.Α.-εδάφους θεμελίωσης αποτελεί αντικείμενο διερεύνησης επόμενης ενότητας.

Όσον αφορά στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της τυπικής διατομής, επιλέχθηκαν τρεις διατάξεις οι οποίες αντιστοιχούν σε υπέργειους Χ.Υ.Τ.Α. ύψους 20m και κλίσης απορριμματικών πρανών 3:1 (H:V), τιμή όχι μόνον αντιπροσωπευτική της κοινής πρακτικής, αλλά και αρκετά ήπια έτσι ώστε να διασφαλίζεται η ευστάθεια των απορριμματικών πρανών. Τα τρία προσομοιώματα που εξετάζονται παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.3 και όπως φαίνεται τα δύο πρώτα αναφέρονται σε υπέργειο Χ.Υ.Τ.Α. με τραπεζοειδή διατομή, ενώ το τρίτο σε Χ.Υ.Τ.Α. πλευρικής απόθεσης επί υφιστάμενου πρανούς.

Η εκτενής βιβλιογραφική ανασκόπηση του δευτέρου Κεφαλαίου έδειξε ότι οι δυναμικές ιδιότητες του απορριμματικού υλικού παρουσιάζουν μεγάλη διασπορά, και για το λόγο αυτό θα εξεταστεί η επίδρασή τους στην εκτιμώμενη δυναμική απόκριση. Δεδομένου ότι το ύψος των επιλεχθέντων διατομών είναι σχετικά μικρό συγκριτικά με τους αντίστοιχους Χ.Υ.Τ.Α., στους οποίους αναφέρονται οι δημοσιευμένες εργασίες που πραγματεύονται τον υπολογισμό της πυκνότητας και της ταχύτητας διάδοσης του διατμητικού κύματος (βλ. παράγραφο 2.4.1 και 2.4.3), θεωρείται ομοιόμορφη κατανομή και των δύο παραμέτρων με το βάθος. Πιο συγκεκριμένα, το ειδικό βάρος και η απόσβεση υλικού επιλέχθηκαν να είναι σταθερά και ίσα με  $10\text{kN/m}^3$  και 5% αντίστοιχα, ενώ για την ταχύτητα διάδοσης του διατμητικού κύματος επιλέχθηκαν τρεις τιμές οι οποίες καλύπτουν επαρκώς το προτεινόμενο εύρος των τιμών της παραμέτρου για το αντίστοιχο βάθος. Οι τρεις τύποι απορριμματικού υλικού που εξετάζονται είναι οι εξής:

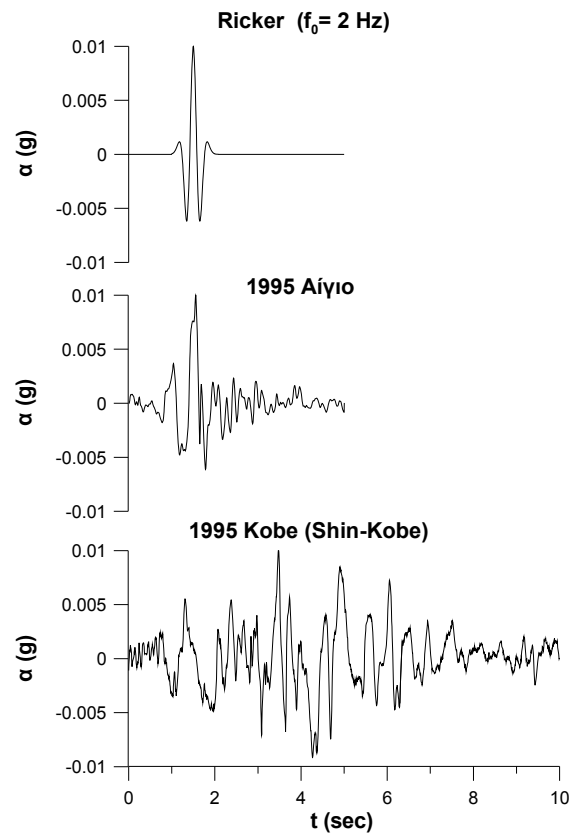
- Τύπος Α:  $V_s = 156\text{m/sec}$ ,
- Τύπος Β:  $V_s = 250\text{m/sec}$ , και
- Τύπος Γ:  $V_s = 400\text{m/sec}$ .



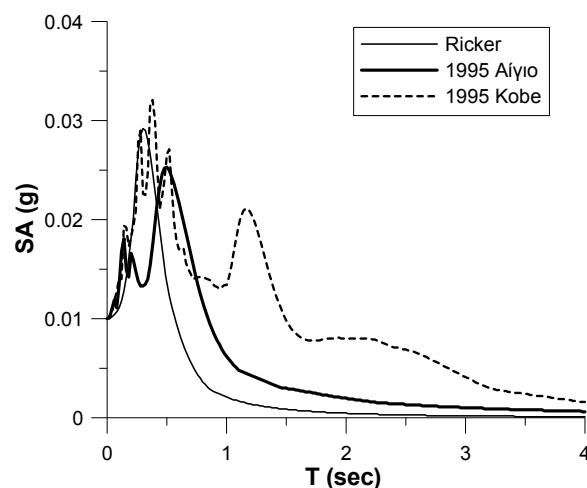
**Σχήμα 4.3.** Τυπικές διατάξεις Χ.Υ.Τ.Α. των οποίων μελετήθηκε η δυναμική απόκριση μέσω αριθμητικών εν χρόνω αναλύσεων αλλά και αναλύσεων στο πεδίο των συχνοτήτων.

Στις δυναμικές αναλύσεις που διεξήχθησαν, χρησιμοποιήθηκαν τρεις διαφορετικές διεγέρσεις με διαφορετικό συχνοτικό περιεχόμενο. Στο Σχήμα 4.4 παρουσιάζονται οι χρονοϊστορίες της επιτάχυνσης των τριών διεγέρσεων, ανηγμένες σε μέγιστη τιμή επιτάχυνσης ίση με  $0.01g$ , έτσι όπως χρησιμοποιήθηκαν για τις ανάγκες των ελαστικών δυναμικών αναλύσεων. Οι χρονοϊστορίες αναφέρονται σε ένα παλμό Ricker με κεντρική συχνότητα στα  $2\text{Hz}$ , στην καταγραφή του σεισμού του Αιγίου (1995) και στην καταγραφή Shin-Kobe από το σεισμό Hyogoken-Nanbu (1995 Kobe). Ο παλμός Ricker, αν και είναι σχετικά απλός, καλύπτει ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων, όπως άλλωστε φαίνεται και στο Σχήμα 4.5, όπου παρατίθενται τα ελαστικά φάσματα επιταχύνσεων των τριών χρονοϊστοριών. Οι σεισμικές καταγραφές που επιλέχθηκαν για τις δυναμικές αναλύσεις, αφενός έχουν πλούσιο συχνοτικό περιεχόμενο, αφετέρου καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων. Οι δεσπόζουσες περίοδοι των τριών διεγέρσεων είναι ίσες με  $0.32\text{sec}$ ,  $0.49\text{sec}$  και  $0.38\text{sec}$ , για τον παλμό Ricker, τη καταγραφή του σεισμού του Αιγίου και τη καταγραφή Shin-Kobe, αντίστοιχα. Η δυναμική συμπεριφορά των εξεταζόμενων περιπτώσεων μελετήθηκε και σε σχέση με τις ιδιοσυχνότητες και τις κύριες

ιδιομορφές τους, έπειτα από αναλύσεις στο πεδίο των συχνοτήτων που διενεργήθηκαν χρησιμοποιώντας το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS (2004).



**Σχήμα 4.4.** Οι χρονοϊστορίες επιτάχυνσης των τριών διεγέρσεων της παραμετρικής διερεύνησης οι οποίες παρουσιάζονται ανηγμένες σε μέγιστη επιτάχυνση 0.01g. Πρόκειται για έναν παλμό Ricker με κεντρική συχνότητα στα 2Hz, την καταγραφή του σεισμού του Αιγίου (1995), και την καταγραφή Shin-Kobe από τον σεισμό Hyogoken-Nanbu (1995 Kobe).



**Σχήμα 4.5.** Ελαστικά φάσματα απόκρισης επιτάχυνσης του παλμού Ricker και των δύο καταγραφών από το σεισμό του Αιγίου (1995) και του Kobe (1995).



### 4.3.1 Επίδραση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της τυπικής διατομής

Αρχικώς επιχειρείται η ερμηνεία των φαινομένων κυματικής διάδοσης τα οποία χαρακτηρίζουν καθοριστικά τη δυναμική απόκριση των τριών εξεταζόμενων τυπικών διατομών. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, οι επιφανειακές ή μη ανωμαλίες προκαλούν σύνθετα φαινόμενα κυματικής διάδοσης με άμεση συνέπεια τη διαμόρφωση της δυναμικής απόκρισής τους, η οποία συχνά εκφράζεται ως η κατανομή των μέγιστων επιταχύνσεων (οριζόντιας ή/ και κατακόρυφης συνιστώσας).

Για τον λόγο αυτό εξετάζεται η κατανομή της μέγιστης οριζόντιας επιτάχυνσης κανονικοποιημένης ως προς τη μέγιστη επιβαλλόμενη εδαφική επιτάχυνση (PGA), η οποία συνηθίζεται να αναφέρεται ως ενίσχυση της σεισμικής διέγερσης, εντός των τριών προσομοιωμάτων της παρούσας διερεύνησης. Στο Σχήμα 4.6. παρατίθενται η προαναφερθείσα κατανομή υπό μορφή ισοβαρών καμπυλών σε διάφορες χρονικές στιγμές, για την επιβολή παλμού Ricker σε απορριμματικό υλικό Τύπου Α.

Τα δύο πρώτα προσομοιώματα, τα οποία αφορούν ένα υπέργειο τραπεζοειδή Χ.Υ.Τ.Α. με διαφορετικό μήκος καταστώματος, φαίνεται ότι χαρακτηρίζονται από παρεμφερή διαδικασία κυματικής διάδοσης. Σημαντικό ρόλο σε αυτό διαδραματίζει η συμμετρία που χαρακτηρίζει τη γεωμετρία των δύο κατασκευών και πιθανώς η κοινή τιμή της κλίσης των απορριμματικών πρανών. Πιο συγκεκριμένα, η κατακόρυφη διάδοση των SV κυμάτων κατά την πρόσπτωση στα πρανή προκαλεί τη δημιουργία ανακλώμενων SV και P κυμάτων, γεγονός που γίνεται εμφανές από τη συγκέντρωση των ισοβαρών κατά την χρονική στιγμή  $t_1$ . Επιπροσθέτως, κατά την πρόσπτωση στην αιχμή του πρανούς το φαινόμενο γίνεται ακόμη πιο σύνθετο καθώς η ασυνέχεια (γωνία μεταξύ των δύο ευθειών) συντελεί στην ταυτόχρονη ανάπτυξη και διαθλώμενων SV και P κυμάτων και κυμάτων Rayleigh.

Η ενίσχυση της επιτάχυνσης λόγω της συγκέντρωσης των κυματικών ακτινών περί την αιχμή του πρανούς, γίνεται εμφανής από τις ισοβαρείς της χρονικής στιγμής  $t_2$ . Εν συνεχεία (χρονική στιγμή  $t_3$ ), παρατηρείται σημαντική ενίσχυση στη θέση του άξονα συμμετρίας των δύο προσομοιωμάτων, η οποία αποδίδεται στη δυσμενή σύγκλιση των άμεσων κυμάτων και των δευτερογενών που προέκυψαν λόγω των δύο αντισυμμετρικών γεωμετρικών ασυνεχειών. Όμως, η μεγαλύτερη διάσταση του καταστώματος του δεύτερου προσομοιώματος συμβάλλει στη χρονική υστέρηση της

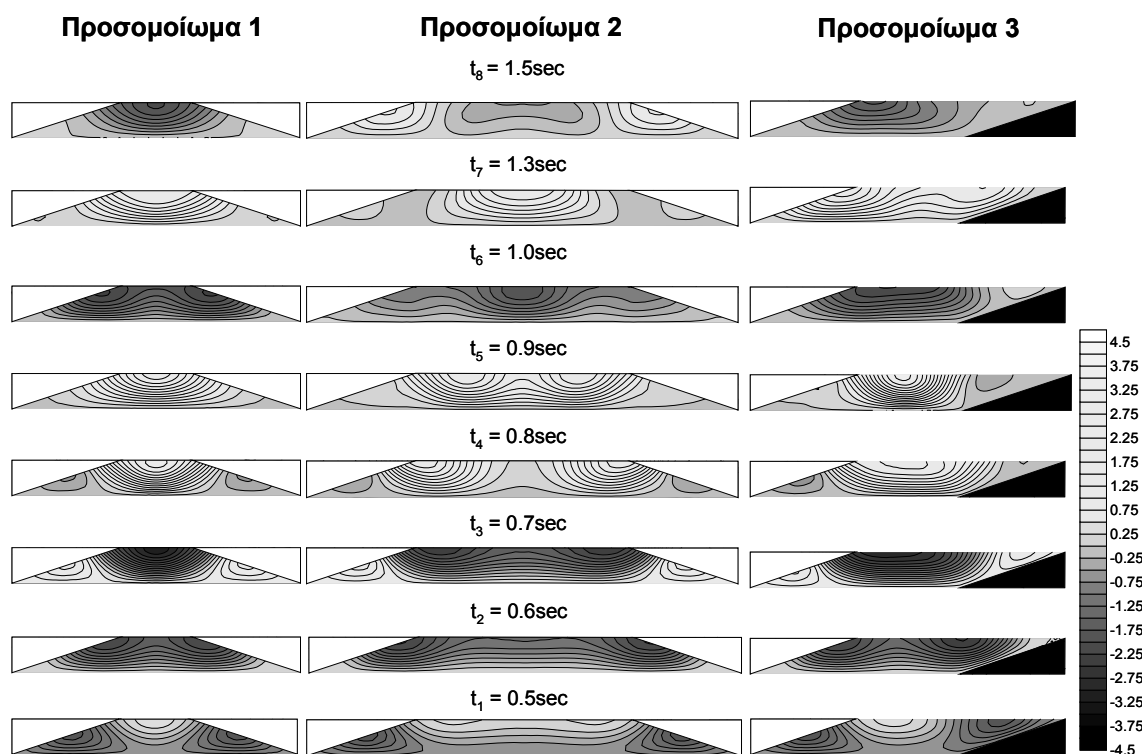
ανάπτυξης αυτού του φαινομένου, γεγονός που επιβεβαιώνει ότι η παρατηρούμενη ενίσχυση δεν οφείλεται μόνο στην απευθείας διάδοση διατμητικών κυμάτων.

Το τρίτο προσομοίωμα, το οποίο αφορά έναν Χ.Υ.Τ.Α. πλευρικής απόθεσης, αναπτύσσει ένα πολύ διαφορετικό μηχανισμό διάδοσης των σεισμικών κυμάτων. Σημαντικό ρόλο στη δυναμική απόκριση της περίπτωσης αυτής διαδραματίζουν δύο σημαντικά στοιχεία: (α) το γεγονός ότι δεν υφίσταται συμμετρία, και (β) η κατακόρυφη διάδοση των SV κυμάτων λαμβάνει χώρα από δύο σύνορα του Χ.Υ.Τ.Α., δηλαδή από την βάση του και από το πρηνές απόθεσης. Αποτέλεσμα των χαρακτηριστικών αυτών είναι η ανάκλαση των κυμάτων σε δύο κεκλιμένες επιφάνειες, εκ των οποίων μόνο η μία είναι ελεύθερη. Η διαφορά που χαρακτηρίζει τη διάδοση των κυμάτων στην περιοχή του πρηνούς πλευρικής απόθεσης είναι ότι κατά την πρόπτωση επί του πρηνούς των δευτερογενών SV κυμάτων, τα οποία προήλθαν από την ανάκλαση κατά την πρόπτωση στην ελεύθερη οριζόντια επιφάνεια, δημιουργούνται ανακλώμενα και διερχόμενα SV και P κύματα. Λόγω του δύσκαμπτου υποβάθρου, η ενέργεια των διερχόμενων κυμάτων είναι πολύ μικρή, με αποτέλεσμα τον εγκλωβισμό των κυμάτων εντός του πιο εύκαμπτου απορριμματικού όγκου.

Η συγκέντρωση των ισοβαρών κατά την χρονική στιγμή  $t_1$  στην περιοχή του ελεύθερου απορριμματικού πρηνούς και του πρηνούς απόθεσης είναι αποτέλεσμα των φαινομένων κυματικής διάδοσης που περιγράφηκαν. Ακολούθως, η επιτάχυνση ενισχύεται στην περιοχή της αιχμής του πρηνούς λόγω της συγκέντρωσης των κυματικών ακτινών, αλλά και στην ελεύθερη επιφάνεια λόγω της σύγκλισης ανακλώμενων και απευθείας κυμάτων. Τα φαινόμενα αυτά παρατηρούνται από τη συγκέντρωση των ισοβαρών τη χρονική στιγμή  $t_2$ . Η σύνθετη αυτή διαδικασία κυματικής διάδοσης καταλήγει στην σημαντική ενίσχυση (χρονική στιγμή  $t_3$ ) η οποία παρατηρείται σε απόσταση περίπου ίση με το ύψος του Χ.Υ.Τ.Α. από την αιχμή του πρηνούς.

Η δυναμική συμπεριφορά των εξεταζόμενων Χ.Υ.Τ.Α. μελετήθηκε και από τη σκοπιά του συχνотικού περιεχομένου των χρονοϊστοριών απόκρισης. Ένας αρκετά συνήθης τρόπος επισκόπησης των χαρακτηριστικών της δυναμικής απόκρισης εδαφικών αποθέσεων σε σχέση με το συχνотικό της περιεχόμενο είναι και οι συναρτήσεις μεταφοράς (Borcherdt, 1960). Ως συνάρτηση μεταφοράς (Transfer Function ή TF) ορίζεται ο λόγος του μετασχηματισμού Fourier της χρονοϊστορίας της επιτάχυνσης του

υπό εξέταση σημείου προς τον αντίστοιχο μετασχηματισμό της χρονοϊστορίας της επιβαλλόμενης επιτάχυνσης.



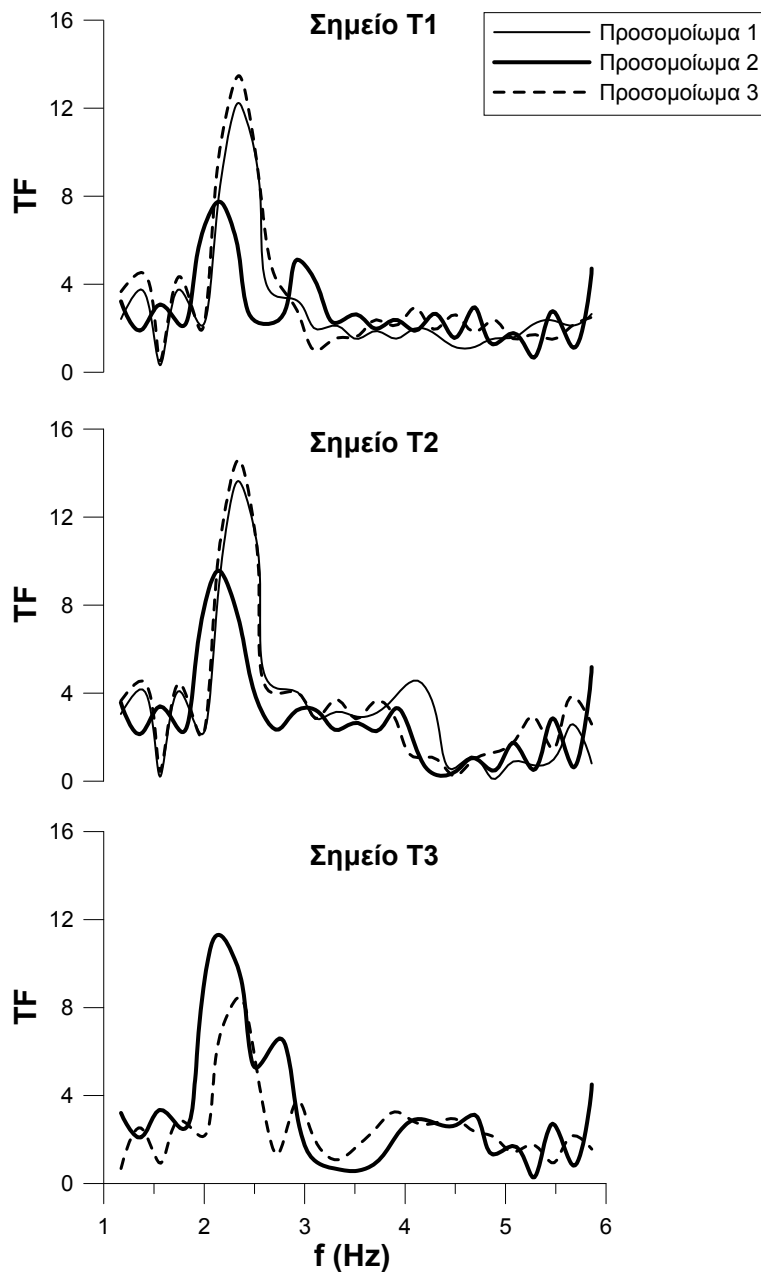
**Σχήμα 4.6.** Ισοβαρείς της κανονικοποιημένης οριζόντιας επιτάχυνσης ως προς τη μέγιστη επιβαλλόμενη επιτάχυνση σε διάφορες χρονικές στιγμές για τα τρία εξεταζόμενα προσομοιώματα.

Υπό αυτό το πρίσμα υπολογίστηκαν οι συναρτήσεις μεταφοράς μερικών χαρακτηριστικών επιφανειακών σημείων των τριών προσομοιωμάτων (βλ. Σχήμα 4.7.). Τα σημεία που επιλέχθηκαν για τον υπολογισμό των συναρτήσεων μεταφοράς φαίνονται στο Σχήμα 4.3. και αναφέρονται:

- στην αιχμή του πρανούς και για τα τρία προσομοιώματα (Σημείο T1)
- σε απόσταση ίση με το ύψος (20m) από την αιχμή του πρανούς (Σημείο T2), όπου ειδικά για το πρώτο προσομοίωμα το σημείο αυτό ταυτίζεται με την τομή με τον άξονα συμμετρίας,
- σε απόσταση 60m από την αιχμή του πρανούς (Σημείο T3), όπου ειδικά για το δεύτερο προσομοίωμα το σημείο αυτό ταυτίζεται με την τομή με τον άξονα συμμετρίας, ενώ για το τρίτο είναι η προβολή στην επιφάνεια του σημείου τομής των δύο συνόρων της βάσης.

Είναι εμφανές ότι, παρουσιάζεται κοινή πρώτη χαρακτηριστική συχνότητα για όλα τα εξεταζόμενα σημεία κάθε προσομοιώματος, χωρίς όμως να παρατηρείται και η ίδια

μέγιστη τιμή της ενίσχυσης. Συγκεκριμένα, αναφορικά με τα συχνотικά χαρακτηριστικά του κάθε προσομοιώματος, το πρώτο προσομοίωμα έχει πρώτη ιδιοσυχνότητα ίση με 2.34Hz, το δεύτερο 2.13Hz και το τρίτο 2.34Hz.



**Σχήμα 4.7.** Συναρτήσεις μεταφοράς (TF) των τριών προσομοιωμάτων στα χαρακτηριστικά σημεία T1, T2, T3. Οι κατανομές αναφέρονται στην περίπτωση επιβολής παλμού Ricker με μέγιστη επιτάχυνση 0.01g και απορριμματού υλικό Τύπου Α.

Η μέγιστη ενίσχυση παρατηρείται για το πρώτο και τρίτο προσομοίωμα στο σημείο T2, ενώ για το δεύτερο στο σημείο T3. Δυσμενέστερη απόκριση φαίνεται να χαρακτηρίζει το τρίτο προσομοίωμα, για το οποίο η μέγιστη τιμή της ενίσχυσης είναι μεγαλύτερη από 15, ενώ στον αντίποδα η μικρότερη τιμή της ενίσχυσης εντοπίζεται στο

δεύτερο προσομοίωμα (περίπου ίση με 12), η οποία είναι αντίστοιχη με την περίπτωση της μονοδιάστατης απόκρισης (12.7). Αυτή η παρατήρηση αποδίδεται στο μηχανισμό κυματικής διάδοσης, ο οποίος όπως προαναφέρθηκε είναι διαφορετικός για καθένα από τα τρία προσομοιώματα και είναι προφανώς δυσμενέστερος για τον Χ.Υ.Τ.Α. πλευρικής απόθεσης.

Καθώς η ακρίβεια του υπολογισμού της πρώτης ιδιοσυχνότητας ενός συστήματος μέσω των συναρτήσεων μεταφοράς δεν θεωρείται επαρκής, πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις ιδιοσυχνοτήτων για καθεμία από τις εξεταζόμενες περιπτώσεις. Η πρώτη ιδιοσυχνότητα του κάθε προσομοιώματος αντιπροσωπεύει την ιδιομορφή με χαρακτηριστικά παραμόρφωσης αντίστοιχα εκείνων της θεωρίας της διατμητικής δοκού, οπότε οι τιμές των ιδιοσυχνοτήτων τους είναι 2.17Hz, 2.02Hz και 2.17Hz για το πρώτο, το δεύτερο και το τρίτο προσομοίωμα, αντίστοιχα. Παρατηρείται ότι, ανεξαρτήτως του τρόπου υπολογισμού η πρώτη ιδιοσυχνότητα για το πρώτο και το τρίτο προσομοίωμα ταυτίζονται. Επιπλέον όμως, για τους δύο τραπεζοειδείς υπέργειους Χ.Υ.Τ.Α. είναι δυνατή και η εφαρμογή της Σχέσης 4.1 για τον προσδιορισμό της πρώτης ιδιοπεριόδου επιλέγοντας κάθε φορά την κατάλληλη τιμή της παραμέτρου  $a_n$  η οποία αποτελεί συνάρτηση του λόγου αποκοπής. Ο λόγος αποκοπής,  $k$  είναι ίσος με 0.25 και 0.5 για το πρώτο και δεύτερο προσομοίωμα αντίστοιχα, ενώ η παράμετρος  $a_n$  λαμβάνει αντίστοιχα τις τιμές 2.67 και 3.59 (Ambraseys, 1960). Προκύπτει τελικά ότι για το πρώτο και το δεύτερο προσομοίωμα η πρώτη ιδιοπερίοδος είναι αντίστοιχα 3.14 και 3.5 φορές πολλαπλάσια του λόγου του ύψους προς την ταχύτητα διάδοσης του διατμητικού κύματος.

Οι ελαστικές ιδιοπερίοδοι υπολογίστηκαν και για τους τρεις τύπους απορριμματικού υλικού έπειτα από την εφαρμογή της Σχέσης 4.1, από τον υπολογισμό των εκάστοτε συναρτήσεων μεταφοράς και από αριθμητικές αναλύσεις στο πεδίο των συχνοτήτων με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (ABAQUS, 2004). Τα αποτελέσματα που προέκυψαν παρατίθενται στον Πίνακα 4.1, ενώ ταυτόχρονα παρουσιάζεται και η απόκλιση των αποτελεσμάτων της αναλυτικής λύσης από την θεωρητικά ακριβέστερη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Παρατηρείται ότι η διαφορά μεταξύ των δύο μεθόδων αυξάνεται καθώς μειώνεται η τιμή του λόγου αποκοπής (πρώτο προσομοίωμα), ενώ και για τις δύο εξεταζόμενες περιπτώσεις λαμβάνει τιμές περίπου ίσες ή λίγο μεγαλύτερες του 10%. Σημειώνεται ότι, οι συναρτήσεις μεταφοράς παρέχουν πιο ακριβή

αποτελέσματα από την αναλυτική λύση, αν και η ακρίβειά τους εξαρτάται και από το συχνοτικό περιεχόμενο της επιβαλλόμενης διέγερσης.

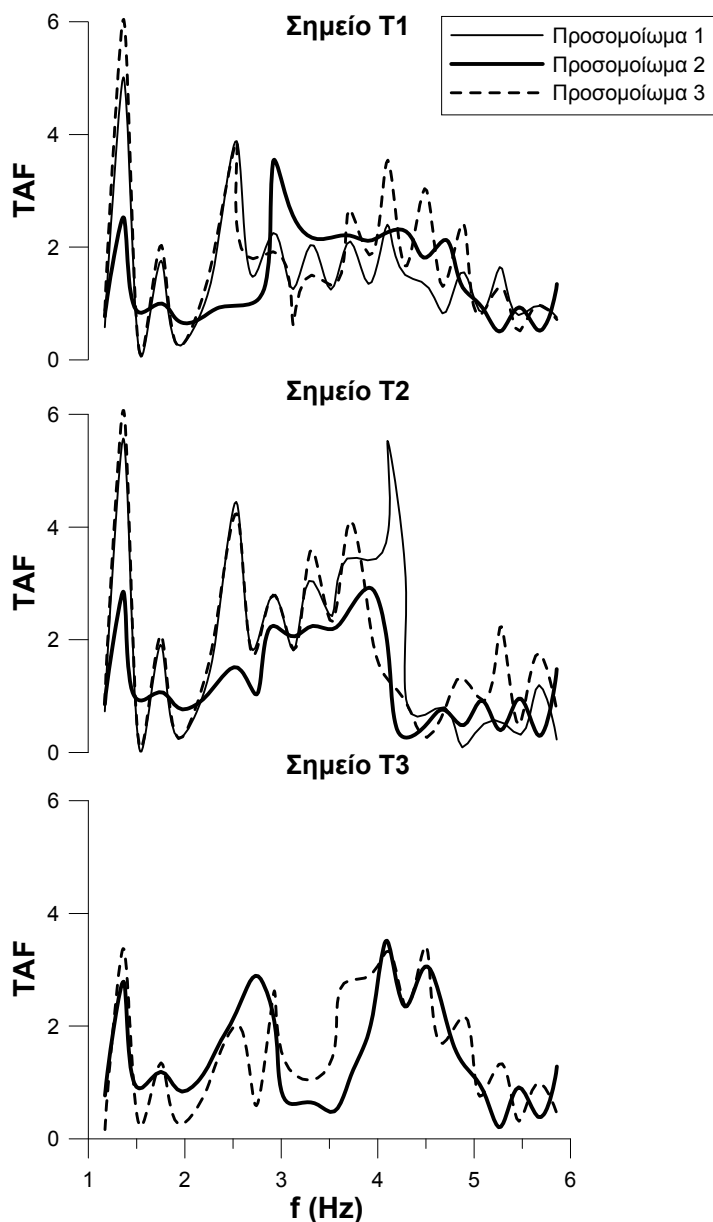
**Πίνακας 4.1.** Ελαστικές ιδιοπερίοδοι των δύο τραπεζοειδών προσομοιωμάτων για τις τρεις περιπτώσεις απορριμματικού υλικού. Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν έπειτα από την εφαρμογή τριών μεθόδων: της αναλυτικής λύσης, της συνάρτησης μεταφοράς και της αριθμητικής ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία. Η απόκλιση υπολογίζεται μεταξύ της πρώτης και τρίτης μεθόδου.

|                      | Προσομοίωμα 1 |         |         | Προσομοίωμα 2 |         |         |
|----------------------|---------------|---------|---------|---------------|---------|---------|
|                      | Τύπος Α       | Τύπος Β | Τύπος Γ | Τύπος Α       | Τύπος Β | Τύπος Γ |
| Αναλυτική λύση       | 0.40          | 0.25    | 0.16    | 0.45          | 0.28    | 0.18    |
| Συνάρτηση μεταφοράς  | 0.43          | 0.27    | 0.18    | 0.47          | 0.30    | 0.19    |
| Πεπερασμένα στοιχεία | 0.46          | 0.29    | 0.18    | 0.50          | 0.31    | 0.20    |
| Απόκλιση (%)         | 12.78         | 13.33   | 13.65   | 9.50          | 9.50    | 10.57   |

Όπως είναι προφανές, τα κύρια χαρακτηριστικά της δυναμικής απόκρισης δεν προσεγγίζουν τα αντίστοιχα που εκτιμώνται βάσει της θεώρησης μονοδιάστατων συνθηκών. Επειδή η κοινή πρακτική επικεντρώνεται στην εκτίμηση της μονοδιάστατης δυναμικής απόκρισης, όπως διαπιστώθηκε από την βιβλιογραφική ανασκόπηση του δεύτερου Κεφαλαίου, επιχειρείται σύγκριση των αποτελεσμάτων των διδιάστατων αναλύσεων με τις αντίστοιχες μονοδιάστατες. Η ποσοτικοποίηση της τοπογραφικής επίδρασης συχνά αναπαρίσταται από τον συντελεστή τοπογραφικής ενίσχυσης ή επιδείνωσης, TAF, δηλαδή από τον λόγο του φάσματος Fourier της απόκρισης, που προέκυψε από την αριθμητική ανάλυση της διδιάστατης γεωμετρίας, προς το αντίστοιχο φάσμα Fourier της απόκρισης για συνθήκες ελευθέρου πεδίου (ή από την αντίστοιχη μονοδιάστατη προσομοίωση).

Στο Σχήμα 4.8 απεικονίζεται η κατανομή του συντελεστή τοπογραφικής ενίσχυσης, TAF, συναρτήσει της συχνότητας για καθένα από τα τρία χαρακτηριστικά σημεία που επιλέχθηκαν για τα τρία προσομοιώματα (T1, T2 και T3). Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται για την περίπτωση επιβολής παλμού Ricker, κυρίως λόγω της ομοιόμορφης κατανομής τους φάσματος Fourier του παλμού η οποία παρατηρείται για συχνότητες 2Hz έως 5Hz. Εν γένει, ο συντελεστής τοπογραφικής επιδείνωσης φαίνεται

να επηρεάζεται από τα ιδιαίτερα γεωμετρικά χαρακτηριστικά καθενός εκ των τριών προσομοιωμάτων καθώς χαρακτηρίζεται από έντονη διακύμανση για το εξεταζόμενο εύρος συχνοτήτων. Πάντως, οι τιμές που λαμβάνει είναι μεγαλύτερες της μονάδας για αρκετά μεγάλο εύρος συχνοτήτων, υποδεικνύοντας ότι οι μονοδιάστατες αναλύσεις υποεκτιμούν σημαντικά την αναπτυσσόμενη επιτάχυνση εν συγκρίσει με τις αντίστοιχες διδιάστατες αναλύσεις.

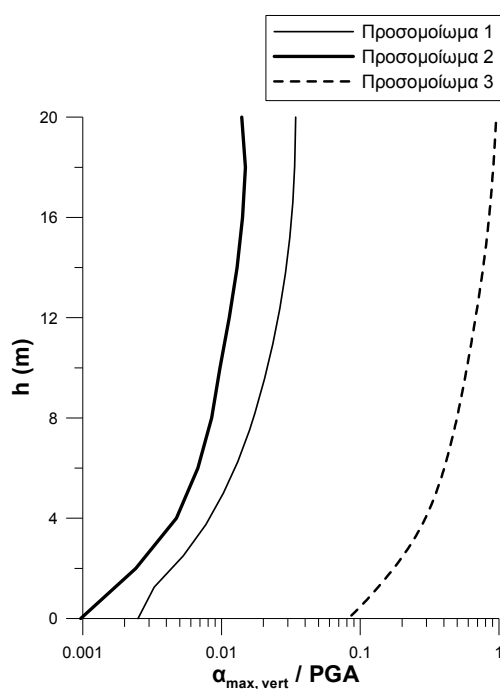


**Σχήμα 4.8.** Συναρτήσεις τοπογραφικής επιδείνωσης (TAF) των τριών προσομοιωμάτων στα υπό εξέταση σημεία. Οι κατανομές αναφέρονται στην περίπτωση επιβολής παλμού Ricker με μέγιστη επιτάχυνση 0.01g και απορριμματικό υλικό Τύπου Α.

Συγκεκριμένα, οι μέγιστες τιμές του συντελεστή (TAF) παρατηρούνται για το πρώτο προσομοίωμα και είναι περίπου ίσες με πέντε. Επίσης, στα σημεία T1 και T2 εντοπίζεται

παρεμφερές συχνотικό περιεχόμενο του συντελεστή τοπογραφικής επιδείνωσης για το πρώτο και το τρίτο προσομοίωμα. Αντιθέτως, ο συντελεστής τοπογραφικής επιδείνωσης λαμβάνει χαμηλότερες τιμές για το δεύτερο προσομοίωμα ενώ παράλληλα λιγότερο έντονη είναι και η συχνотική διακύμανσή του.

Ένα άλλο φαινόμενο που σχετίζεται με τη διδιάστατη απόκριση είναι η ανάπτυξη «παρασιτικής» κατακόρυφης συνιστώσας της επιτάχυνσης. Στις αριθμητικές αναλύσεις που διεξήχθησαν μολονότι η επιβαλλόμενη διέγερση ήταν οριζόντια, προσομοιώνοντας έτσι τη διάδοση κατακόρυφων SV κυμάτων, παρατηρήθηκε η ανάπτυξη κατακόρυφης επιτάχυνσης ως αποτέλεσμα των σύνθετων φαινομένων κυματικής διάδοσης που περιγράφηκαν προηγουμένως. Στο Σχήμα 4.9 φαίνονται οι κατανομές της κανονικοποιημένης μέγιστης κατακόρυφης ως προς τη μέγιστη επιβαλλόμενη επιτάχυνση, καθ' ύψος χαρακτηριστικών τομών των τριών προσομοιωμάτων.



**Σχήμα 4.9** Κατανομή της παρασιτικής κατακόρυφης συνιστώσας της επιτάχυνσης κανονικοποιημένης ως προς τη μέγιστη επιβαλλόμενη επιτάχυνση ( $\alpha_{\max, \text{vert}} / \text{PGA}$ ) καθ' ύψος των τριών προσομοιωμάτων. Οι διατομές εντοπίζονται στο σημείο T2 για το πρώτο προσομοίωμα και στο σημείο T3 για το δεύτερο και τρίτο.

Για το πρώτο προσομοίωμα η τομή θεωρήθηκε ότι διέρχεται από το σημείο T2 (θέση του άξονα συμμετρίας), ενώ για το δεύτερο και τρίτο προσομοίωμα από το σημείο T3. Σημειώνεται δε ότι τα αποτελέσματα αυτά αντιστοιχούν σε απόκριση λόγω επιβολής παλμού Ricker σε απορριμματικό υλικό Τύπου Α. Παρατηρείται ότι για τον Χ.Υ.Τ.Α. πλευρικής απόθεσης η κατακόρυφη συνιστώσα της επιτάχυνσης είναι ιδιαίτεως ισχυρή,

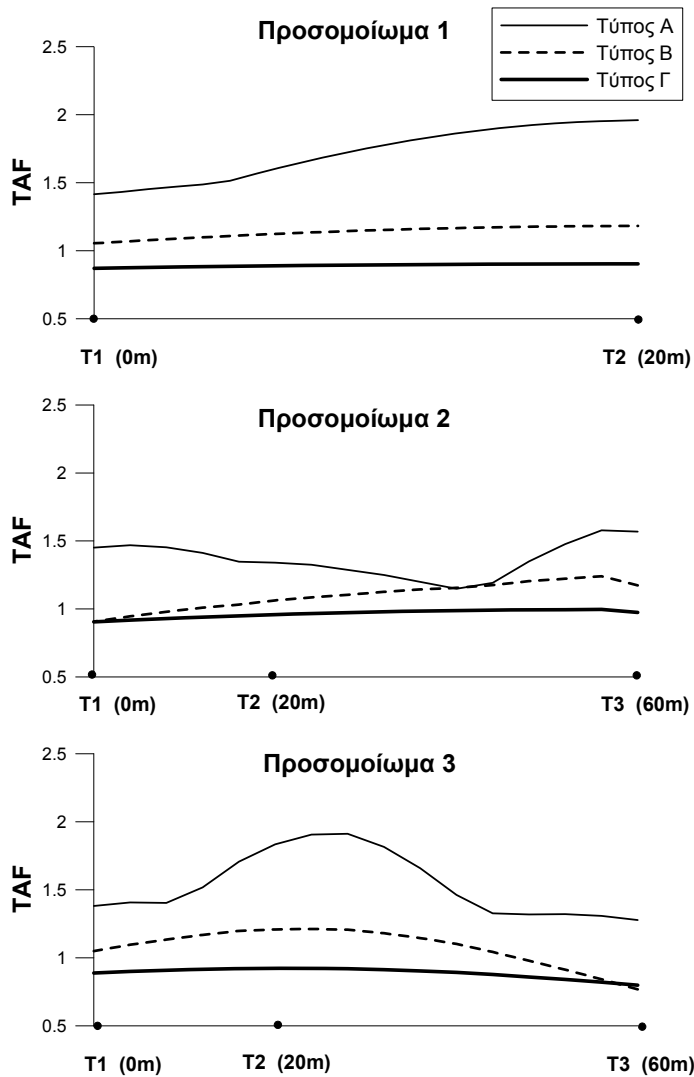


γεγονός που αποδίδεται στην διάδοση των σεισμικών κυμάτων εκ του πρηνούς πλευρικής απόθεσης, και τον συνεπαγόμενο σύνθετο μηχανισμό κυματικής διάδοσης ο οποίος περιγράφηκε προηγουμένως. Επιπλέον, τονίζεται ότι η επιλεχθείσα θέση αποτελεί για το τρίτο προσομοίωμα τη θέση της μέγιστης τιμής της κατακόρυφης επιτάχυνσης, κάτι που δεν ισχύει για τα άλλα δύο προσομοιώματα.

#### 4.3.2 Επίδραση των δυναμικών ιδιοτήτων του απορριμματικού υλικού

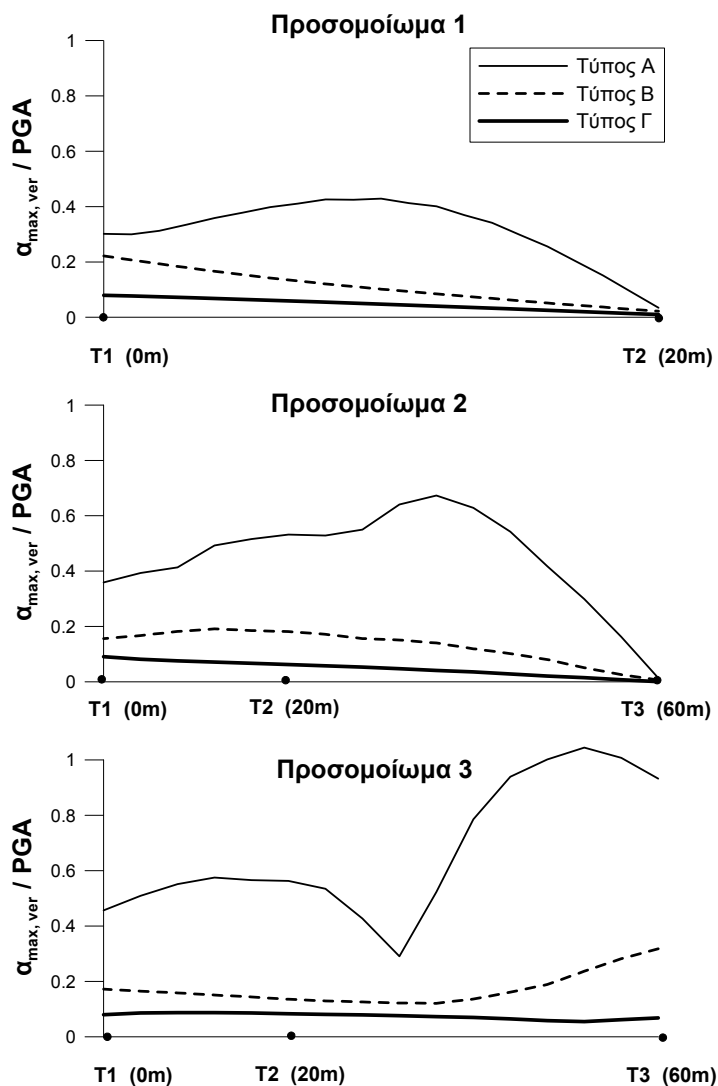
Στην ενότητα αυτή εξετάζεται η επίδραση των δυναμικών ιδιοτήτων του απορριμματικού υλικού για την περίπτωση της ελαστικής απόκρισης των τριών προσομοιωμάτων, μελετώντας τη δυναμική απόκριση των διαφόρων τύπων απορριμματικού υλικού. Η αύξηση της ταχύτητας διάδοσης του διατμητικού κύματος, όπως προέκυψε από τον υπολογισμό των ιδιοσυχνοτήτων, συνδέεται με αύξηση της πρώτης ιδιοσυχνότητας του εκάστοτε προσομοιώματος (βλ. Πίνακα 4.1). Το γεγονός αυτό επηρεάζει και τα αναπτυσσόμενα επίπεδα επιταχύνσεων, καθώς η συσχέτιση της ιδιοπεριόδου του Χ.Υ.Τ.Α. με τη δεσπόμενη περίοδο του κραδασμού καθορίζει το μέγεθος της ενίσχυσης της απόκρισης. Επιπλέον, είναι σημαντικό να προσδιοριστεί η επίδραση της αύξησης της ταχύτητας διάδοσης του διατμητικού κύματος στον συντελεστή τοπογραφικής ενίσχυσης.

Στο Σχήμα 4.10 παρατίθενται οι κατανομές του λόγου της μέγιστης τιμής της οριζόντιας επιτάχυνσης από διδιάστατες αναλύσεις προς την αντίστοιχη τιμή από μονοδιάστατες αναλύσεις (ΤΑΦ), κατά μήκος της επιφάνειας κάθε προσομοιώματος. Η αύξηση του μέτρου διάτμησης φαίνεται να ελαττώνει την ένταση των φαινομένων τοπογραφικής επιδείνωσης που σχετίζονται με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της κατασκευής, ανεξαρτήτως του εξεταζόμενου προσομοιώματος. Γενικά, για καθένα από τα τρία προσομοιώματα ο συντελεστής τοπογραφικής επιδείνωσης λαμβάνει τιμές μικρότερες της μονάδας για την περίπτωση πολύ δύσκαμπτου απορριμματικού υλικού. Η παρατήρηση αυτή αποδίδεται στο γεγονός ότι στη συγκεκριμένη περίπτωση το μήκος κύματος είναι περίπου εξαπλάσιο του ύψους των προσομοιωμάτων. Η αύξηση της δυστημσίας του απορριμματικού υλικού σχετίζεται και με πιο ομοιόμορφη κατανομή του συντελεστή κατά μήκος της επιφάνειας κάθε προσομοιώματος. Στον αντίποδα, για πολύ εύκαμπτο απορριμματικό υλικό οι κατανομές λαμβάνουν τη μέγιστη τιμή τους στο σημείο T2 για τα προσομοιώματα 1 και 3, και στο σημείο T3 για το δεύτερο προσομοίωμα, σε αντιστοιχία με την ανάλυση της προηγούμενης ενότητας.



**Σχήμα 4.10** Κατανομή του λόγου της μέγιστης οριζόντιας επιτάχυνσης από διδιάστατες αναλύσεις προς την αντίστοιχη από μονοδιάστατες (ΤΑΦ) κατά μήκος της επιφάνειας των τριών εξεταζόμενων προσομοιωμάτων. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται και για τους τρεις τύπους απορριμματικού υλικού και για επιβολή παλμού Ricker.

Επειδή οι τοπογραφικές ιδιαιτερότητες χαρακτηρίζονται και από την ανάπτυξη «παρασιτικής» κατακόρυφης συνιστώσας της επιτάχυνσης, παρόμοια είναι και η επίδραση της αύξησης της ταχύτητας διάδοσης του διατμητικού κύματος σε αυτήν την παράμετρο. Στο Σχήμα 4.11 παρουσιάζεται η κατανομή της κανονικοποιημένης κατακόρυφης παρασιτικής συνιστώσας της επιτάχυνσης ως προς τη μέγιστη τιμή της επιβαλλόμενης οριζόντιας επιτάχυνσης και για τα τρία προσομοιώματα. Παρατηρείται ότι για τον Τύπο Α η κατακόρυφη συνιστώσα στην ελαστική απόκριση φτάνει το 50%, 70% και 100% της μέγιστης επιβαλλόμενης επιτάχυνσης, για το πρώτο, δεύτερο, και τρίτο προσομοίωμα αντίστοιχα. Επίσης, για το πρώτο και δεύτερο προσομοίωμα παρατηρούνται μικρότερες τιμές κοντά στον άξονα συμμετρίας.



**Σχήμα 4.11** Κατανομή του λόγου της μέγιστης κατακόρυφης επιτάχυνσης προς τη μέγιστη επιβαλλόμενη επιτάχυνση ( $a_{\max, \text{ver}}/\text{PGA}$ ) κατά μήκος της επιφάνειας των τριών εξεταζόμενων προσομοιωμάτων. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται και για τους τρεις τύπους απορριμματικού υλικού και για επιβολή παλμού Ricker.

Καθώς αυξάνει η δυσμησία του υλικού η κατανομή της κατακόρυφης συνιστώσας της επιτάχυνσης παρουσιάζει διαφορετική μορφή με μέγιστη τιμή στην ακμή του πρανούς και παράλληλα το μέγεθός της είναι σημαντικά μειωμένο, λαμβάνοντας τιμές μικρότερες κι από το 20% της μέγιστης επιβαλλόμενης επιτάχυνσης. Πάντως πρέπει να σημειωθεί ότι τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την παρούσα ανάλυση αναφέρονται στην περίπτωση επιβαλλόμενης διέγερσης παλμού Ricker, και επειδή προφανώς τα αποτελέσματα επηρεάζονται και από το συχνотικό περιεχόμενο της επιβαλλόμενης ιστορίας της επιτάχυνσης παρακάτω εξετάζεται η επίδραση της παραμέτρου αυτής.

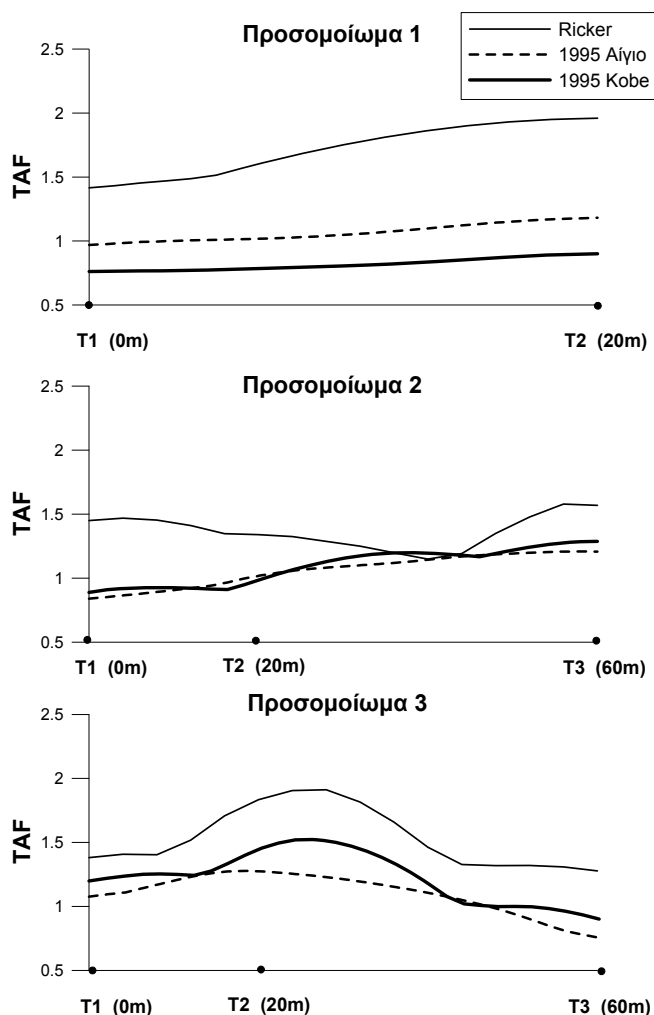
#### 4.3.3 Επίδραση των χαρακτηριστικών της επιβαλλόμενης διέγερσης

Είναι γνωστό ότι ακόμη και η απλή περίπτωση της μονοδιάστατης απόκρισης εδαφικών σχηματισμών σχετίζεται άμεσα με το συχνотικό περιεχόμενο της επιβαλλόμενης χρονοϊστορίας της επιτάχυνσης. Παράλληλα, όπως έχει ήδη αναφερθεί, η ένταση των φαινομένων τοπογραφικής επιδείνωσης αποτελεί συνάρτηση της συχνότητας των διαδιδόμενων σεισμικών κυμάτων. Στις περιπτώσεις που εξετάζονται στην παρούσα διερεύνηση παρατηρήθηκε ότι η ενίσχυση της δυναμικής απόκρισης σε όρους οριζόντιας επιτάχυνσης εξαρτάται από τη σχέση της πρώτης ιδιοσυχνότητας του κάθε προσομοιώματος με τη δεσπόζουσα συχνότητα της διέγερσης. Επιπροσθέτως, η μέγιστη ενίσχυση (κοντά στον συντονισμό) είναι της τάξης του τέσσερα, ενώ μειώνεται έως και κατά 50% καθώς μειώνεται ο λόγος της δεσπόζουσας συχνότητας της διέγερσης προς την πρώτη ιδιοσυχνότητα του κάθε προσομοιώματος.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει και η επίδραση της εξεταζόμενης παραμέτρου στην εκτίμηση της έντασης των φαινομένων τοπογραφικής επιδείνωσης. Για τον λόγο αυτό εξετάζεται η κατανομή του λόγου της μέγιστης τιμής της οριζόντιας επιτάχυνσης από διδιάστατες αναλύσεις προς την αντίστοιχη τιμή από μονοδιάστατες αναλύσεις, κατά μήκος της επιφάνειας κάθε προσομοιώματος. Στο Σχήμα 4.12 παρατίθενται οι κατανομές του συντελεστή τοπογραφικής ενίσχυσης για απορριμματικό υλικό Τύπου Α, το οποίο σημαίνει ότι η ιδιοσυχνότητα των τριών προσομοιωμάτων είναι 2.17Hz, 2.02Hz, και 2.17Hz αντίστοιχα. Παρατηρείται αρχικά ότι οι μέγιστες τιμές του συντελεστή τοπογραφικής ενίσχυσης προκύπτουν για την επιβολή παλμού Ricker, ο οποίος είναι πιο υψίσυχνος συγκριτικά με τις δύο σεισμικές καταγραφές. Ακόμη είναι εμφανές ότι, παρόλο που το πρώτο και τρίτο προσομοίωμα χαρακτηρίζονται από αντίστοιχη ιδιοσυχνότητα, η επίδραση των συχνотικών χαρακτηριστικών της διέγερσης είναι διαφορετική για το καθένα. Δηλαδή, για το μεν πρώτο προσομοίωμα οι ελάχιστες τιμές του συντελεστή τοπογραφικής ενίσχυσης είναι μικρότερες της μονάδας και αφορούν την καταγραφή του σεισμού του Kobe, ενώ για το τρίτο η μικρότερη τιμή του συντελεστή τοπογραφικής ενίσχυσης αναφέρεται στην καταγραφή του σεισμού του Αιγίου.

Το δεύτερο προσομοίωμα, πιθανώς λόγω της μικρότερης ιδιοσυχνότητάς του και των παρόμοιων χαρακτηριστικών της απόκρισής του με τη μονοδιάστατη προσομοίωση, εξαιτίας του μεγαλύτερου μήκους του καταστρώματός του, χαρακτηρίζεται από

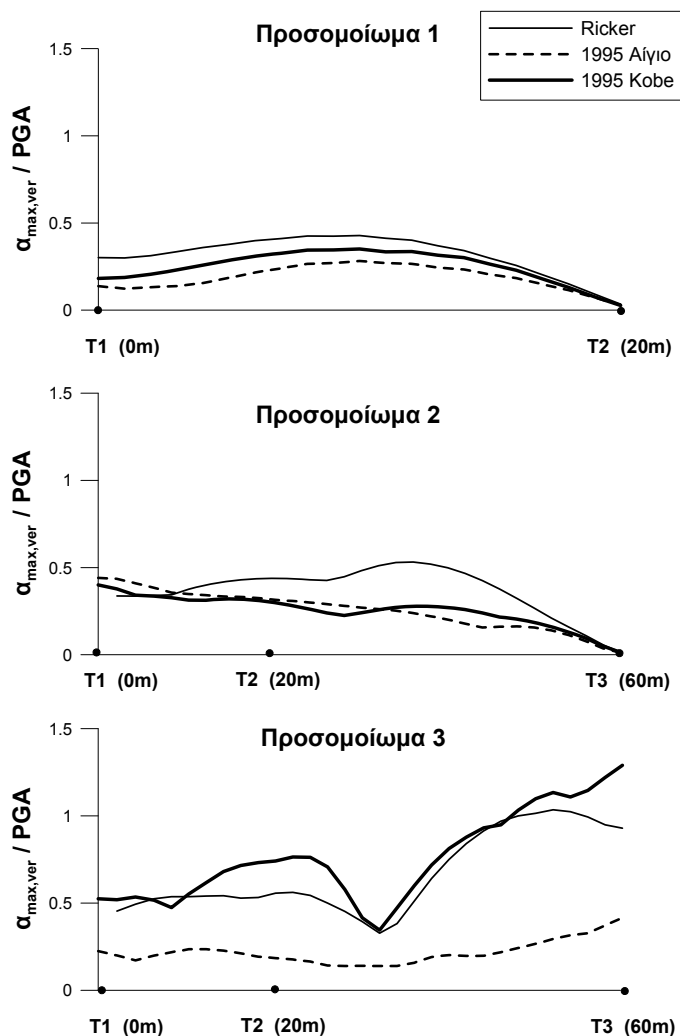
αξιοσημείωτη σύγκλιση στην υπολογισθείσα μέγιστη οριζόντια επιτάχυνση από διδιάστατες και μονοδιάστατες αριθμητικές αναλύσεις για τις δύο σεισμικές καταγραφές. Αυτό διαπιστώνεται από το γεγονός ότι οι τιμές του συντελεστή τοπογραφικής επιδείνωσης κυμαίνονται πολύ κοντά στη μονάδα.



**Σχήμα 4.12.** Κατανομή του λόγου της μέγιστης οριζόντιας επιτάχυνσης από διδιάστατες αναλύσεις προς την αντίστοιχη από μονοδιάστατες (TAF) κατά μήκος της επιφάνειας των τριών εξεταζόμενων προσομοιωμάτων. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται και για τις τρεις επιβαλλόμενες διεγέρσεις και για την περίπτωση απορριμματικού υλικού Τύπου Α.

Προφανώς τα συχνотικά χαρακτηριστικά της επιβαλλόμενης σεισμικής διέγερσης παίζουν σημαντικό ρόλο και για την κατακόρυφη συνιστώσα της επιτάχυνσης. Στο Σχήμα 4.13 παρατηρείται ότι, ενώ η μορφή της κατανομής της μέγιστης κατακόρυφης επιτάχυνσης δεν αλλάζει για το πρώτο προσομοίωμα, το μέγεθος της μειώνεται για την περίπτωση της απόκρισης στην καταγραφή του σεισμού του Kobe και ακόμη περισσότερο για την καταγραφή του σεισμού του Αιγίου. Για το δεύτερο προσομοίωμα, αντίστοιχα με την εικόνα που προέκυψε για τον συντελεστή τοπογραφικής ενίσχυσης, οι

δύο σεισμικές καταγραφές εμφανίζουν παρόμοιες κατανομές της κατακόρυφης επιτάχυνσης, η οποία λαμβάνει τιμές αρκετά μειωμένες συγκριτικά με τον παλμό Ricker. Τέλος, μόνο η καταγραφή του σεισμού του Αιγίου φαίνεται να μειώνει την αναπτυσσόμενη παρασιτική κατακόρυφη συνιστώσα της επιτάχυνσης για το τρίτο προσομοίωμα.



**Σχήμα 4.13.** Κατανομή του λόγου της μέγιστης κατακόρυφης επιτάχυνσης προς τη μέγιστη επιβαλλόμενη επιτάχυνση ( $\alpha_{\max,ver} / PGA$ ) κατά μήκος της επιφάνειας των τριών εξεταζόμενων προσομοιωμάτων. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται και για τις τρεις επιβαλλόμενες διεγέρσεις και για την περίπτωση απορριμματικού υλικού Τύπου Α.

#### 4.4 ΙΣΟΔΥΝΑΜΑ ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΑΠΟΡΡΙΜΜΑΤΙΚΟΥ ΥΛΙΚΟΥ

Η προαναφερθείσα διερεύνηση της δυναμικής απόκρισης των Χ.Υ.Τ.Α. θεωρώντας ελαστική συμπεριφορά του απορριμματικού υλικού είχε ως αποτέλεσμα την εξαγωγή κατατοπιστικών συμπερασμάτων, που αφορούν κυρίως στην ενίσχυση της σεισμικής κίνησης λόγω σύνθετων φαινομένων κυματικής διάδοσης. Όμως, η διάδοση των

σεισμικών κυμάτων σχετίζεται συνήθως με την ανάπτυξη σημαντικών διατμητικών παραμορφώσεων, για τις οποίες η μηχανική συμπεριφορά των εδαφικών υλικών και αντιστοιχώς και του απορριμματικού υλικού απέχει πολύ από το να χαρακτηρίζεται ως ελαστική. Πιο συγκεκριμένα, η ελαστική συμπεριφορά αναφέρεται σε διατμητικές παραμορφώσεις της τάξης του 0,001%, ενώ για μεγαλύτερες τιμές (μέχρι 1%) η συμπεριφορά του υλικού είναι ελαστοπλαστική (Ishihara, 1996). Η δυστημψία του υλικού για τέτοια επίπεδα παραμορφώσεων μειώνεται καθώς αυξάνονται οι διατμητικές παραμορφώσεις. Παράλληλα, η σεισμική ενέργεια αποσβεννύεται σε κάθε κύκλο φόρτισης, φαινόμενο το οποίο εκφράζεται ποσοτικά από το εμβαδό του διαμορφούμενου βρόγχου υστέρησης.

Για την προσέγγιση της ανακυκλικής συμπεριφοράς του εδάφους έχουν διατυπωθεί αρκετά προσομοιώματα τα οποία μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε:

- ισοδύναμα γραμμικά προσομοιώματα,
- ανακυκλικά μη γραμμικά υστερητικά προσομοιώματα, και
- ελαστοπλαστικά καταστατικά προσομοιώματα.

Από τις μεθοδολογίες αυτές η πρώτη είναι η πλέον χρησιμοποιούμενη, κυρίως λόγω της απλότητας της εφαρμογής της, χωρίς όμως να είναι εφικτό να εκτιμηθούν οι μόνιμες παραμορφώσεις, όπως συμβαίνει και με τα πιο σύνθετα ανακυκλικά προσομοιώματα (Kramer, 1996). Τα μη γραμμικά υστερητικά προσομοιώματα αποτελούνται από μία συσχέτιση για την καμπύλη μονοτονικής φόρτισης και ένα σύνολο κανόνων που περιγράφουν την συμπεριφορά φόρτισης-αποφόρτισης και απομείωσης της δυστημψίας. Από τα πιο χαρακτηριστικά υστερητικά προσομοιώματα είναι το λεγόμενο υπερβολικό προσομοίωμα και το προσομοίωμα Ramberg-Osgood. Το πλεονέκτημα του τελευταίου έγκειται στη δυνατότητα προσαρμογής των παραμέτρων του προσομοιώματος ώστε να μπορεί να είναι αντιπροσωπευτικό πειραματικών αποτελεσμάτων. Παρόλα αυτά, στα βασικά μειονεκτήματα της κατηγορίας αυτής συγκαταλέγεται το γεγονός ότι, τα δύο προαναφερθέντα προσομοιώματα είναι προσανατολισμένα σε αναλύσεις δυναμικής απόκρισης μονοβάθμιων συστημάτων, και συνεπώς μπορούν να εφαρμοστούν μόνο για κατακόρυφη διάδοση κυμάτων σε στρωσιγενές έδαφος (Towhata, 2007).

Τέλος, τα πιο ακριβή καταστατικά προσομοιώματα μπορούν να αποδώσουν τη μηχανική συμπεριφορά του εδάφους για διάφορες εντατικές καταστάσεις, και για τον λόγο αυτό μπορούν να έχουν ένα ευρύτερο πεδίο εφαρμογών. Όμως το κυριότερο

πρόβλημα στην εφαρμογή των προσομοιωμάτων αυτών είναι το ότι συνήθως απαιτείται ο προσδιορισμός ενός μεγάλου πλήθους παραμέτρων για την περιγραφή της μηχανικής συμπεριφοράς του κάθε υλικού, ο οποίος μπορεί να είναι εξαιρετικά δυσχερής ή και πρακτικά αδύνατος.

Για την εκτίμηση της δυναμικής απόκρισης των Χ.Υ.Τ.Α. σε σεισμική κίνηση μεγαλύτερης έντασης εφαρμόζεται στην παρούσα ανάλυση η ισοδύναμα γραμμική μέθοδος. Η επιλογή της μεθόδου βασίζεται στο ότι οι δυναμικές αναλύσεις αποσκοπούν εκτός των άλλων στον προσδιορισμό της έντασης της τοπογραφικής επιδείνωσης, η οποία φάνηκε ιδιαίτερα σημαντική κατά την ανάλυση της δυναμικής απόκρισης για ελαστική συμπεριφορά του απορριμματικού υλικού. Επιπλέον, από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση του δεύτερου Κεφαλαίου κατέστη σαφές ότι οι μηχανικές ιδιότητες του απορριμματικού υλικού χαρακτηρίζονται από μεγάλη αβεβαιότητα κυρίως λόγω της εξαιρετικής ανομοιογένειας του υλικού, αλλά και ενός συνόλου άλλων παραμέτρων. Πιο συγκεκριμένα, για τις δυναμικές ιδιότητες του απορριμματικού υλικού έχουν προταθεί διάφορες συσχετίσεις στη βιβλιογραφία, ενώ λαμβάνοντας υπόψη τη διασπορά που τις χαρακτηρίζει η εφαρμογή ακριβέστερων μεθόδων προσομοίωσης της μη γραμμικής συμπεριφοράς καθίσταται μάλλον ανέφικτη.

#### **4.4.1 Παραδοχές της παραμετρικής διερεύνησης**

Η ισοδύναμα γραμμική ανάλυση ακολουθεί μία επαναληπτική διαδικασία προκειμένου το μέτρο διάτμησης και ο λόγος απόσβεσης του απορριμματικού υλικού να αντιστοιχούν στην αναπτυσσόμενη διατμητική παραμόρφωση. Η σύγκλιση ελέγχεται με την χρήση μίας σχέσης απομείωσης του μέτρου διάτμησης ( $G$ ) και αύξησης της υστερητικής απόσβεσης ( $\xi$ ) συναρτήσει της διατμητικής παραμόρφωσης ( $\gamma$ ). Στο Σχήμα 2.8. απεικονίζονται οι βασικότερες δημοσιευμένες συσχετίσεις για απορριμματικό υλικό. Καθώς οι προτεινόμενες καμπύλες απομείωσης του μέτρου διάτμησης-αύξησης της απόσβεσης παρουσιάζουν μεγάλη διασπορά, στην παρούσα παραμετρική διερεύνηση της μη γραμμικής δυναμικής απόκρισης Χ.Υ.Τ.Α. που ακολουθεί, εκτός των βασικών εξεταζόμενων παραμέτρων που αναλύθηκαν και για την ελαστική απόκριση, εξετάζεται και η σχετική επίδραση των καμπυλών απομείωσης του μέτρου διάτμησης-αύξησης του λόγου απόσβεσης.

Για τον σκοπό αυτό, οι καμπύλες απομείωσης του μέτρου διάτμησης-αύξησης της απόσβεσης, που προτάθηκαν από τους Singh and Murphy (1990) και από τον Zekkos



(2005) για απορριμματικό υλικό με ποσοστό εδαφοειδούς υλικού εντός του ορίου 62-76%, χρησιμοποιήθηκαν στις δυναμικές αναλύσεις. Η επιλογή αυτή αποσκοπεί στην ανάδειξη του ρόλου της συσχέτισης του μέτρου διάτμησης και της απόσβεσης με τη διατμητική παραμόρφωση, μέσω δύο σχετικά ακραίων περιπτώσεων, καθώς το πρώτο ζεύγος καμπυλών (Singh and Murphy, 1990) χαρακτηρίζεται από πιο έντονα μη γραμμική συμπεριφορά εν συγκρίσει με το δεύτερο (Zekkos, 2005). Παράλληλα, η επιλογή αυτή καλύπτει και το εύρος των προτεινόμενων συσχετίσεων στη διάρκεια των τελευταίων ετών.

Προκειμένου να είναι εφικτή η άμεση σύγκριση των αποτελεσμάτων, οι λοιπές παραδοχές της παραμετρικής διερεύνησης εν γένει δεν μεταβλήθηκαν σε σχέση με την περίπτωση της ελαστικής συμπεριφοράς. Πιο συγκεκριμένα, αναλύονται οι τρεις εξεταζόμενες τυπικές διατομές Χ.Υ.Τ.Α., των οποίων η δυναμική απόκριση εξετάστηκε για ελαστική συμπεριφορά, και για τους τρεις διαφορετικούς τύπους απορριμματικού υλικού που έχουν ήδη αναφερθεί. Οι χρονοϊστορίες της επιτάχυνσης που χρησιμοποιήθηκαν στις δυναμικές αναλύσεις ήταν ο παλμός Ricker, η καταγραφή από τον σεισμό του Αιγίου (1995) και η καταγραφή Shin-Kobe από τον σεισμό Hyogoken-Nanbu (1995 Kobe). Στις χρονοϊστορίες της επιβαλλόμενης επιτάχυνσης εφαρμόστηκε επικλιμάκια αναγωγή προκειμένου να αντιστοιχούν σε μέγιστη επιβαλλόμενη επιτάχυνση στο υπόβαθρο (PGA) ίση με 0.1g και 0.36g, για μέση και μεγάλη σεισμική καταπόνηση αντίστοιχα.

Συνεπώς, η παραμετρική διερεύνηση που εκτελέστηκε αποτελείται από 108 ισοδύναμα γραμμικές δυναμικές αναλύσεις με χρήση του κώδικα πεπερασμένων στοιχείων QUAD4M (Hudson et al., 1994). Επιπλέον των δυναμικών αναλύσεων διεξήχθησαν ίδιου πλήθους ιδιομορφικές αναλύσεις της γεωκατασκευής, για κάθε μία από τις εξεταζόμενες περιπτώσεις με χρήση του κώδικα ABAQUS (2004). Σε αυτό το σημείο πρέπει να αναφερθεί ότι οι αναλύσεις ιδιομορφών για τη μη γραμμική συμπεριφορά διενεργήθηκαν έπειτα από την αντιστοίχιση των καταλλήλων παραμέτρων συμπεριφοράς του υλικού (απομειωμένο μέτρο διάτμησης, αυξημένος συντελεστής απόσβεσης) σε κάθε πεπερασμένο στοιχείο του προσομοιώματος.

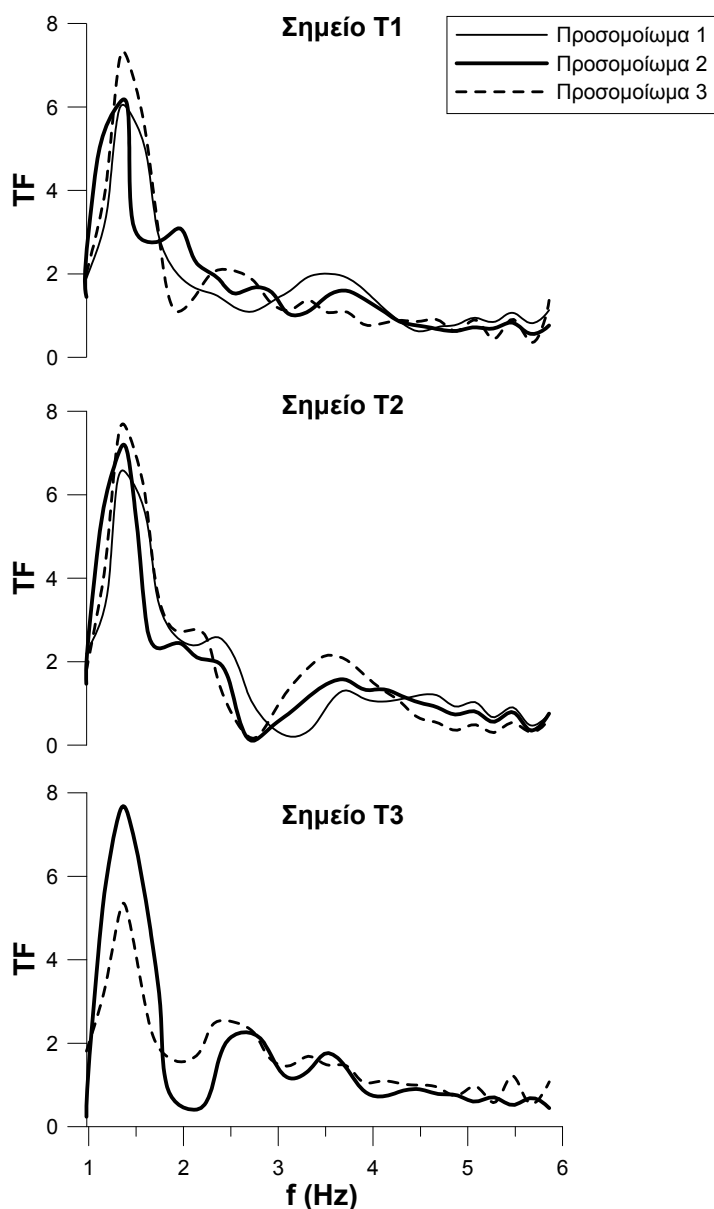
#### **4.4.2 Επίδραση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της τυπικής διατομής**

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η αύξηση του μεγέθους των αναπτυσσόμενων διατμητικών παραμορφώσεων συνεπάγεται τη μείωση του μέτρου διάτμησης και την αύξηση της

υστερητικής απόσβεσης του απορριμματικού υλικού. Όμως, το πρώτο χαρακτηριστικό σχετίζεται με τη μείωση της ιδιοσυχνότητας της γεωκατασκευής, ενώ το δεύτερο οδηγεί σε ελάττωση του μεγέθους της ενίσχυσης της σεισμικής απόκρισης. Αυτές οι παρατηρήσεις μπορούν εύκολα να επιβεβαιωθούν συγκρίνοντας τα Σχήματα 4.7 και 4.14, το δεύτερο εκ των οποίων απεικονίζει τις συναρτήσεις μεταφοράς για τα τρία εξεταζόμενα προσομοιώματα στα χαρακτηριστικά σημεία τους και για την περίπτωση επιβολής παλμού Ricker με μέγιστη επιτάχυνση ίση με 0.1g. Η μη γραμμική συμπεριφορά του απορριμματικού υλικού χαρακτηρίζεται από τις καμπύλες απομείωσης του μέτρου διάτμησης-αύξησης της απόσβεσης που προτάθηκαν από τους Singh and Murphy (1990). Πιο συγκεκριμένα, η μέγιστη τιμή της ενίσχυσης μειώνεται σημαντικά και για τα τρία προσομοιώματα, ενώ παράλληλα μειώνεται και η ιδιοσυχνότητά τους, με αποτέλεσμα και οι τρεις περιπτώσεις να φαίνεται ότι χαρακτηρίζονται από την ίδια πρώτη ιδιοσυχνότητα που είναι ίση με 1.37Hz.

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα αυτά με τα αντίστοιχα των ιδιομορφικών αναλύσεων παρατηρείται απόκλιση, δηλαδή για το πρώτο και τρίτο προσομοίωμα η ιδιοσυχνότητα εξακολουθεί να ταυτίζεται (όπως και στην ελαστική περίπτωση) και είναι ίση με 1.25Hz, ενώ για το δεύτερο προσομοίωμα υπολογίστηκε λίγο μικρότερη πρώτη ιδιοσυχνότητα ίση με 1.19Hz. Η απόκλιση αυτή μεταξύ των δύο μεθόδων προσδιορισμού της ιδιοσυχνότητας των προσομοιωμάτων μπορεί να αποδοθεί, αφενός στο συχνοτικό περιεχόμενο του παλμού Ricker το οποίο φθίνει σε ένταση για συχνότητες μικρότερες των 2Hz, αφετέρου στο βήμα της συχνότητας κατά τον υπολογισμό του φάσματος Fourier.

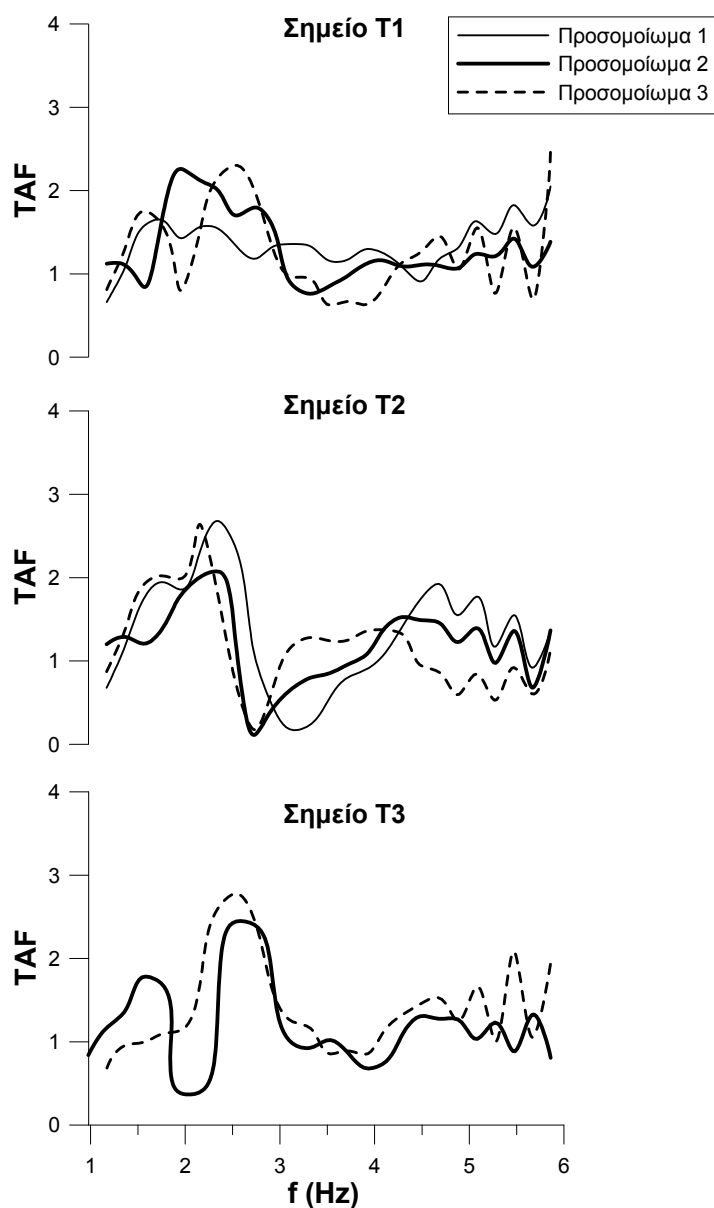
Ένα από τα στοιχεία της δυναμικής μη γραμμικής απόκρισης, το οποίο παρατηρείται και στην περίπτωση ελαστικής συμπεριφοράς του απορριμματικού υλικού, είναι η θέση ανάπτυξης των μέγιστων ενισχύσεων περί την πρώτη ιδιοσυχνότητα του συστήματος, δηλαδή για το πρώτο και το τρίτο προσομοίωμα το σημείο T2, ενώ για το δεύτερο προσομοίωμα το σημείο T3. Όμως, συγκρίνοντας τη μέγιστη ενίσχυση των τριών προσομοιωμάτων παρατηρείται ότι δυσμενέστερη είναι για το τρίτο προσομοίωμα (όπως και στην ελαστική συμπεριφορά), ενώ ευμενέστερη είναι για το πρώτο ενώ στην ελαστική ανάλυση ήταν το δεύτερο.



**Σχήμα 4.14.** Συναρτήσεις μεταφοράς (TF) των τριών προσομοιωμάτων στα υπό εξέταση σημεία. Οι κατανομές αναφέρονται στην περίπτωση επιβολής παλμού Ricker με μέγιστη επιτάχυνση 0.1g και απορριμματικό υλικό Τύπου Α με σχέση απομείωσης του μέτρου διάτμησης-αύξησης της απόσβεσης σύμφωνα με τους Singh and Murphy (1990).

Παρατηρώντας τις συναρτήσεις τοπογραφικής επιδείνωσης των τριών προσομοιωμάτων στο Σχήμα 4.15 γίνεται περισσότερο εμφανής η συμβολή των γεωμετρικών χαρακτηριστικών στην δυναμική απόκριση. Γενικά διαπιστώνεται ότι η διακύμανση του συντελεστή τοπογραφικής επιδείνωσης συναρτήσει της συχνότητας δεν είναι τόσο έντονη, όπως στην περίπτωση της ελαστικής συμπεριφοράς. Επίσης, οι τιμές που λαμβάνει ο συντελεστής για το εύρος των συχνοτήτων στο οποίο είναι αρκετά ισχυρή η επίδραση του παλμού Ricker (2Hz έως 5Hz) είναι κατά μέγιστο ίσες με 3, ενώ για την ελαστική συμπεριφορά είναι διπλάσιες, δηλαδή της τάξης του 6. Πιο ισχυρή

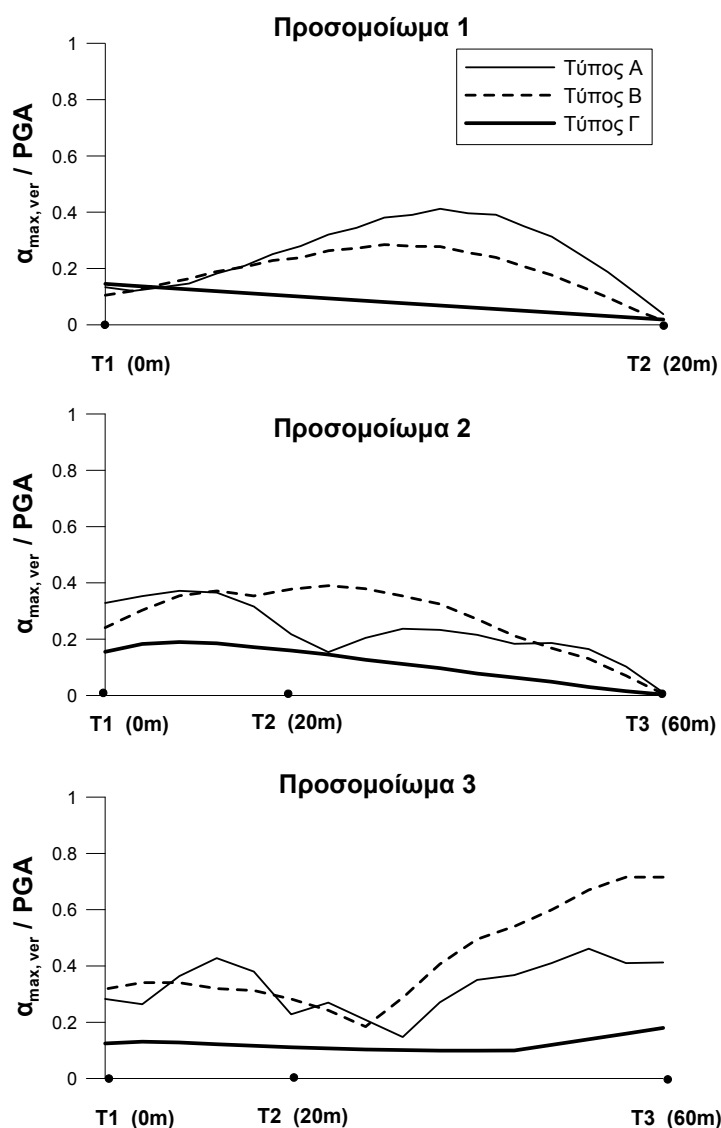
φαίνεται να είναι η επίδραση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών στη δυναμική απόκριση του τρίτου και δεύτερου προσομοιώματος συγκριτικά με το πρώτο.



**Σχήμα 4.15.** Συναρτήσεις τοπογραφικής επιδείνωσης (TAF) των τριών προσομοιωμάτων στα υπό εξέταση σημεία. Οι κατανομές αναφέρονται στην περίπτωση επιβολής παλμού Ricker με μέγιστη επιτάχυνση 0.1g και απορριμματικό υλικό Τύπου Α με σχέση απομείωσης του μέτρου διάτμησης-αύξησης της απόσβεσης σύμφωνα με τους Singh and Murphy (1990).

Όπως έχει ήδη γίνει σαφές από την ανάλυση της δυναμικής απόκρισης για ελαστική συμπεριφορά του απορριμματικού υλικού, εκτός από την επίδραση στο συχνотικό περιεχόμενο και την ενίσχυση της απόκρισης, τα ιδιαίτερα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της κάθε εξεταζόμενης περίπτωσης σχετίζονται και με την ανάπτυξη της παρασιτικής κατακόρυφης επιτάχυνσης. Στο Σχήμα 4.16 παρατίθενται οι κατανομές της

κανονικοποιημένης μέγιστης κατακόρυφης επιτάχυνσης στην επιφάνεια των τριών προσομοιωμάτων ως προς τη μέγιστη επιβαλλόμενη επιτάχυνση.



**Σχήμα 4.16.** Κατανομή του λόγου της μέγιστης κατακόρυφης επιτάχυνσης προς την μέγιστη επιβαλλόμενη επιτάχυνση ( $\alpha_{\max, \text{ver}} / \text{PGA}$ ) κατά μήκος της επιφάνειας των τριών εξεταζόμενων προσομοιωμάτων. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται και για τις τρεις περιπτώσεις απορριμματικού υλικού με σχέση απομείωσης του μέτρου διάτμησης-αύξησης της απόσβεσης σύμφωνα με τους Singh and Murphy (1990) και για την επιβολή παλμού Ricker με μέγιστη επιτάχυνση 0.1g.

Στο πρώτο προσομοίωμα παρατηρείται αμυδρή αύξηση του μεγέθους της εξεταζόμενης παραμέτρου συγκριτικά με την αντίστοιχη περίπτωση της ελαστικής συμπεριφοράς (σε αντιπαράβολή με το Σχήμα 4.11). Στο δεύτερο προσομοίωμα και για το εύκαμπτο απορριμματικό υλικό (Τύπος Α) η μέγιστη κατακόρυφη επιτάχυνση μειώνεται, σε αντίθεση με το πιο δύσκαμπτο απορριμματικό υλικό (Τύποι Β και Γ) για το οποίο η μη γραμμική συμπεριφορά συντελεί σε αύξηση της κατακόρυφης επιτάχυνσης.

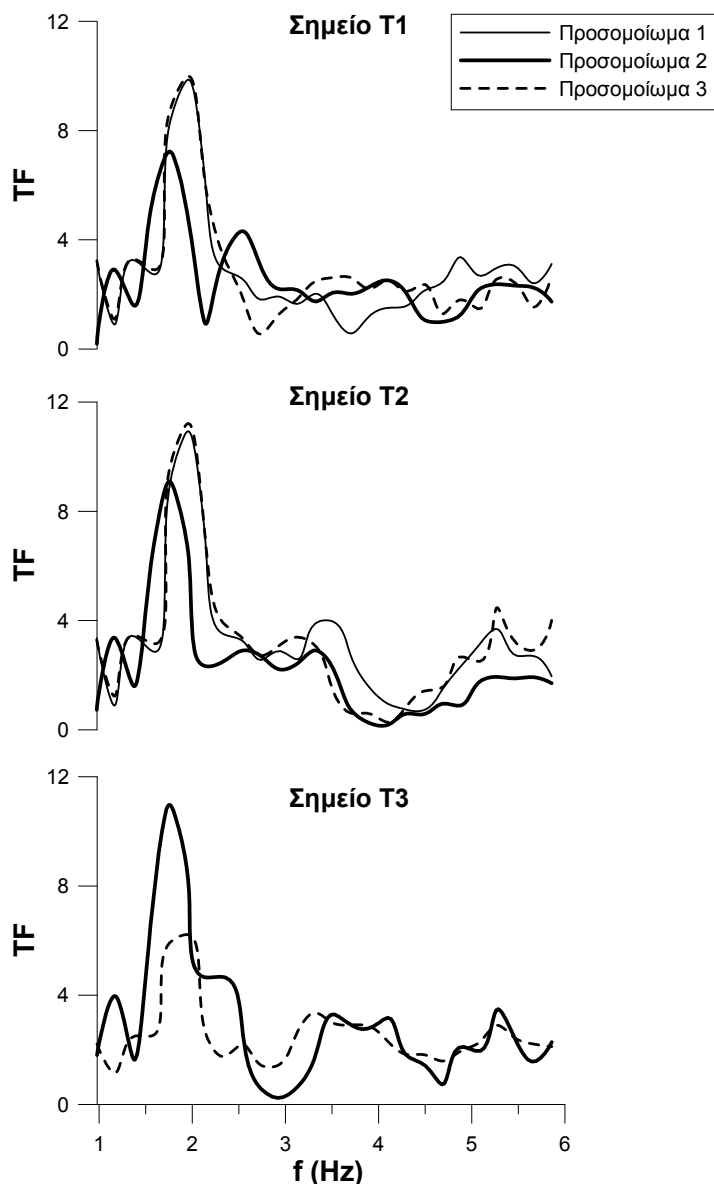
Αντίστοιχα, και για το τρίτο προσομοίωμα αυξάνεται η κατακόρυφη επιτάχυνση, ειδικά για απορριμματικό υλικό Τύπου Β, ενώ και η μορφή της κατανομής και συνεπώς η θέση της μέγιστης τιμής μεταβάλλεται σε σχέση με την ελαστική δυναμική απόκριση.

Σε αυτό το σημείο πρέπει να επισημανθεί ότι τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στην ενότητα αυτή αφορούν αποκλειστικά την περίπτωση παλμού Ricker και τις καμπύλες απομείωσης του μέτρου διάτμησης-αύξησης της απόσβεσης των Singh and Murphy (1990). Στη συνέχεια θα εξεταστούν τόσο η επίδραση των δυναμικών ιδιοτήτων του απορριμματικού υλικού όσο και τα χαρακτηριστικά της επιβαλλόμενης διέγερσης (μέγιστη επιτάχυνση και συχνοτικό περιεχόμενο).

#### **4.4.3 Επίδραση των δυναμικών ιδιοτήτων του απορριμματικού υλικού**

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η επίδραση της ταχύτητας διάδοσης του διατμητικού κύματος (που αντιστοιχεί σε μικρό εύρος διατμητικών παραμορφώσεων, δηλαδή ελαστική συμπεριφορά) στη δυναμική απόκριση συνδέεται ουσιαστικά με την συσχέτιση της ιδιοσυχνότητας της κατασκευής με τη δεσπίζουσα περίοδο της επιβαλλόμενης διέγερσης. Θεωρώντας ταυτόχρονα και τη μη γραμμική συμπεριφορά του υλικού η ενίσχυση της σεισμικής κίνησης γίνεται ιδιαίτερα σύνθετο πρόβλημα, αφού αυξανόμενης της μη γραμμικής συμπεριφοράς η ιδιοσυχνότητα της κατασκευής μειώνεται διαρκώς. Για παράδειγμα, για την περίπτωση του παλμού Ricker με μέγιστη επιβαλλόμενη επιτάχυνση 0.1g οι ιδιοσυχνότητες του πρώτου προσομοιώματος για απορριμματικό υλικό Τύπου Α, Β και Γ είναι ίσες με 1.25Hz, 2.04Hz και 4.02Hz για την περίπτωση που η μη γραμμική συμπεριφορά προσομοιώνεται από τις καμπύλες των Singh and Murphy (1990), ενώ οι αντίστοιχες τιμές για τις αντίστοιχες καμπύλες του Zekkos (2005) είναι ίσες με 1.93Hz, 3.13Hz και 5.35Hz. Η συσχέτιση των ιδιοσυχνοτήτων αυτών με την κεντρική συχνότητα του παλμού Ricker καθορίζει και την αναπτυσσόμενη ενίσχυση.

Πιο σύνθετη είναι η επίδραση της αύξησης του αρχικού μέτρου διάτμησης στην αναπτυσσόμενη κατακόρυφη συνιστώσα της επιτάχυνσης, όπως φάνηκε και από το Σχήμα 4.16. Διαπιστώνεται ακόμα και αλλαγή στην κατανομή της κατά μήκος της επιφάνειας (ειδικά για το τρίτο προσομοίωμα) σε σύγκριση με την αντίστοιχη της ελαστικής δυναμικής απόκρισης. Αν και για την περίπτωση του απορριμματικού υλικού Τύπου Γ οι μέγιστες τιμές της κατακόρυφης συνιστώσας της επιτάχυνσης εξακολουθούν να είναι μικρότερες από το 20% της μέγιστης επιβαλλόμενης επιτάχυνσης, σε αντιστοιχία με τις τιμές που προέκυψαν για την ελαστική δυναμική απόκριση.



**Σχήμα 4.17.** Συναρτήσεις μεταφοράς (TF) των τριών προσομοιωμάτων στα υπό εξέταση σημεία. Οι κατανομές αναφέρονται στην περίπτωση επιβολής παλμού Ricker με μέγιστη επιτάχυνση 0.1g και απορριμματικό υλικό Τύπου Α με σχέση απομείωσης του μέτρου διάτμησης-αύξησης της απόσβεσης σύμφωνα με τον Zekkos (2005).

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει και η σύγκριση της δυναμικής απόκρισης, η οποία υπολογίζεται για απορριμματικό υλικό που ακολουθεί τη συμπεριφορά της σχέσης απομείωσης του μέτρου διάτμησης-αύξησης της απόσβεσης των Singh and Murphy (1990) με την αντίστοιχη από τον Zekkos (2005). Στο Σχήμα 4.17 παρατίθενται οι συναρτήσεις μεταφοράς (TF) για τα τρία προσομοιώματα στα χαρακτηριστικά σημεία τους για την περίπτωση απορριμματικού υλικού Τύπου Α, όπως υπολογίστηκαν από τις χρονοϊστορίες επιτάχυνσης λόγω απόκρισης σε παλμό Ricker μέγιστης επιτάχυνσης 0.1g. Η αντιπαράβολή με το Σχήμα 4.14 δείχνει ότι η λιγότερο έντονη μη γραμμική

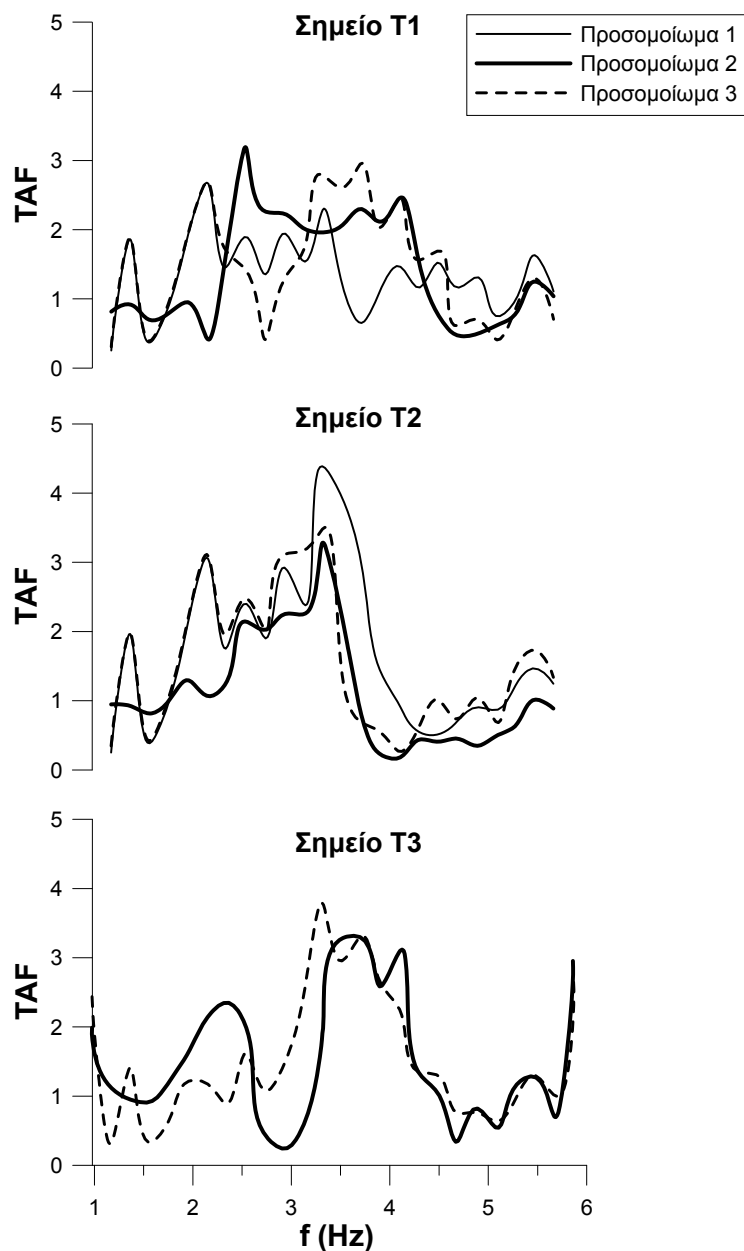
συμπεριφορά (Zekkos, 2005) σχετίζεται με μικρότερη μείωση τόσο της ιδιοσυχνότητας των τριών προσομοιωμάτων, όσο και της μέγιστης ενίσχυσής τους. Επίσης, κατ' αντιστοιχία με την ελαστική συμπεριφορά, εξακολουθεί να είναι δυσμενέστερη η απόκριση του πρώτου και του τρίτου προσομοιώματος.

Επιπροσθέτως, παρατηρώντας τις συναρτήσεις τοπογραφικής επιδείνωσης των τριών προσομοιωμάτων (βλ. Σχήμα 4.18) γίνεται αντιληπτό ότι δυσμενέστερη είναι η επίδραση των γεωμετρικών στοιχείων για το πρώτο προσομοίωμα. Πιο συγκεκριμένα, παρατηρείται ότι η διακύμανση του συντελεστή τοπογραφικής επιδείνωσης συναρτήσει της συχνότητας είναι αρκετά έντονη όπως και στην περίπτωση της ελαστικής συμπεριφοράς, ενώ και οι μέγιστες τιμές του συντελεστή εντοπίζονται για συχνότητες μεγαλύτερες των 3Hz. Αντιθέτως, στην περίπτωση των καμπυλών απομείωσης του μέτρου διάτμησης-αύξησης της απόσβεσης των Singh and Murphy (1990), οι μέγιστες τιμές του συντελεστή παρατηρούνται σε μικρότερο πεδίο συχνοτήτων (βλ. Σχήμα 4.15). Επίσης, οι μέγιστες τιμές που λαμβάνει ο συντελεστής είναι κατά μέγιστο ίσες με 4.5 (βλ. Σχήμα 4.18), μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες που χαρακτηρίζουν την απόκριση του πιο έντονα μη γραμμικού απορριμματικού υλικού (Singh and Murphy, 1990).

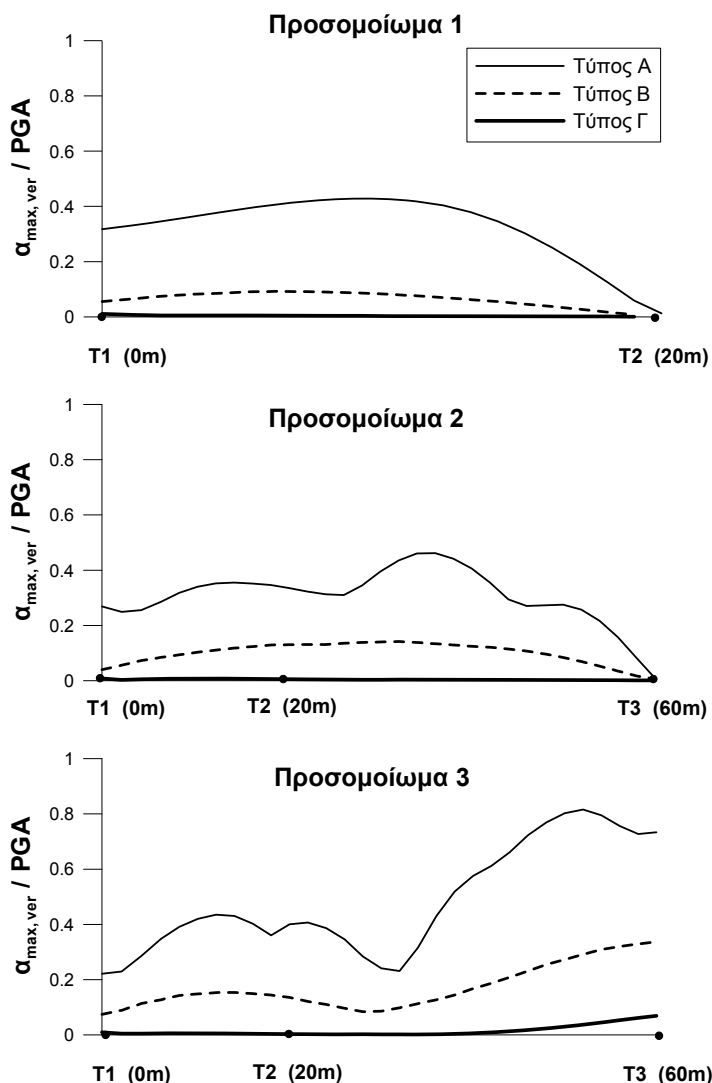
Επιπλέον, συγκρίνοντας τα Σχήματα 4.16 και 4.19 είναι δυνατή η εκτίμηση της επίδρασης των μη γραμμικών χαρακτηριστικών του απορριμματικού υλικού στην αναπτυσσόμενη μέγιστη κατακόρυφη επιτάχυνση. Για τα απορριμματικά υλικά Τύπου Β και Γ είναι εμφανές ότι η λιγότερο έντονη μη γραμμική συμπεριφορά σχετίζεται με μικρότερο μέγεθος της παρασιτικής κατακόρυφης επιτάχυνσης. Αυτή η παρατήρηση δεν φαίνεται να ισχύει και για το πιο εύκαμπτο απορριμματικό υλικό (Τύπου Α).

Για την περίπτωση αυτή οι μέγιστες τιμές είναι της ίδιας τάξης μεγέθους ανεξαρτήτως της σχέσης απομείωσης του μέτρου διάτμησης-αύξησης της απόσβεσης, αλλά η κατανομή στην επιφάνεια του απορριμματικού όγκου μεταβάλλεται. Επιπλέον, όπως σε όλες τις μέχρι τώρα εξεταζόμενες περιπτώσεις, οι μέγιστες τιμές κατακόρυφης επιτάχυνσης αναπτύσσονται κατά την απόκριση του τρίτου προσομοιώματος.





**Σχήμα 4.18.** Συναρτήσεις τοπογραφικής επιδείνωσης (TAF) των τριών προσομοιωμάτων στα υπό εξέταση σημεία. Οι κατανομές αναφέρονται στην περίπτωση επιβολής παλμού Ricker με μέγιστη επιτάχυνση 0.1g και απορριμματικό υλικό Τύπου Α με σχέση απομείωσης του μέτρου διάτμησης-αύξησης της απόσβεσης σύμφωνα με τον Zekkos (2005).

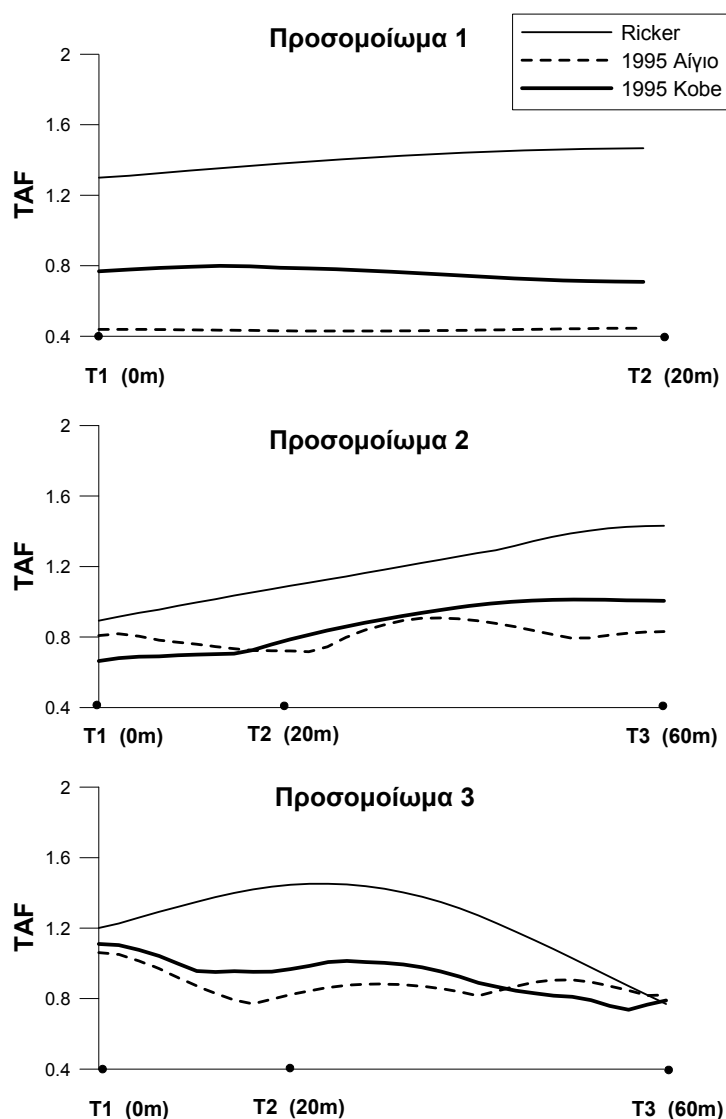


**Σχήμα 4.19.** Κατανομή του λόγου της μέγιστης κατακόρυφης επιτάχυνσης προς την μέγιστη επιβαλλόμενη επιτάχυνση ( $a_{\max, \text{ver}}/\text{PGA}$ ) κατά μήκος της επιφάνειας των τριών εξεταζόμενων προσομοιωμάτων. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται και για τις τρεις περιπτώσεις απορριμματικού υλικού με σχέση απομείωσης του μέτρου διάτμησης-αύξησης της απόσβεσης σύμφωνα με τον Zekkos (2005) και για την επιβολή παλμού Ricker με μέγιστη επιτάχυνση 0.1g.

#### 4.4.4 Επίδραση των χαρακτηριστικών της διέγερσης

Η επίδραση των χαρακτηριστικών της επιβαλλόμενης σεισμικής διέγερσης στη μη γραμμική δυναμική απόκριση σχετίζεται αφενός με τη μέγιστη επιβαλλόμενη επιτάχυνση αφετέρου δε με το συχνотικό περιεχόμενο της διέγερσης. Ο ρόλος του συχνотικού περιεχομένου της χρονοϊστορίας της επιτάχυνσης είναι διττός καθώς σχετίζεται τόσο με τη μείωση της ιδιοσυχνότητας της γεωκατασκευής λόγω της μη γραμμικής δυναμικής απόκρισης όσο και με την ενίσχυση της σεισμικής κίνησης. Άμεση

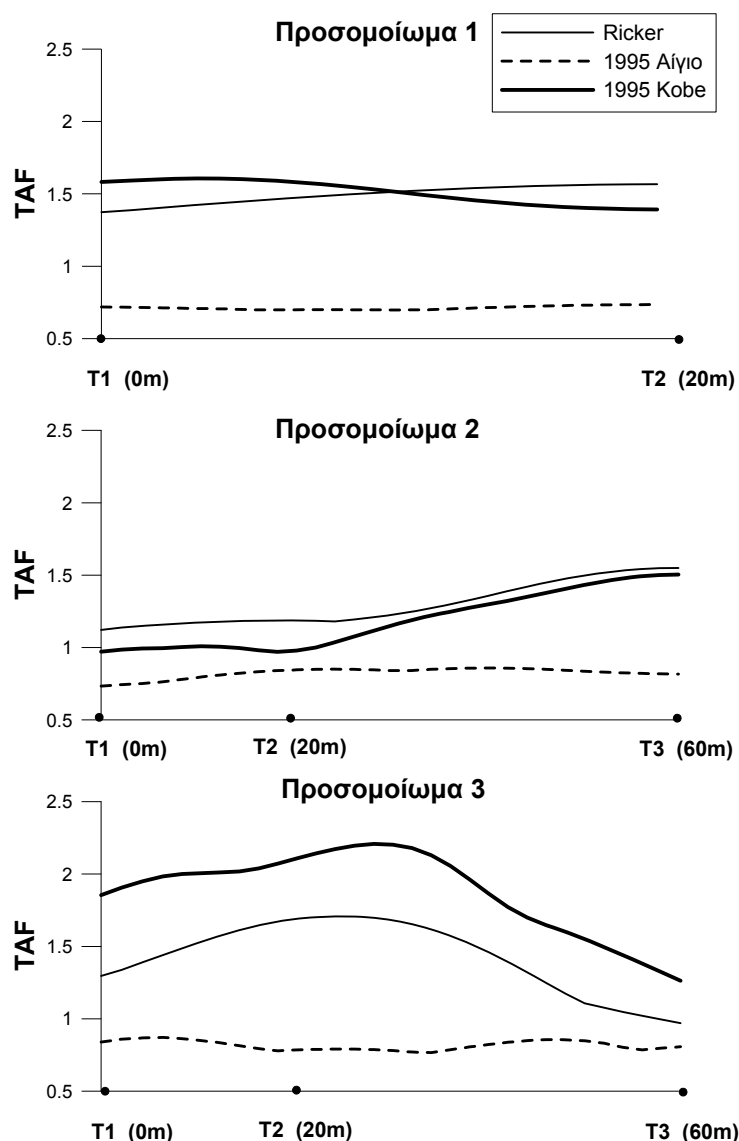
συνέπεια αυτής της αλληλεξάρτησης είναι η ανάπτυξη μιας πολύπλοκης σχέσης της δυναμικής απόκρισης με το συχνοτικό περιεχόμενο της σεισμικής κίνησης.



**Σχήμα 4.20.** Κατανομή του λόγου της μέγιστης οριζόντιας επιτάχυνσης από διδιάστατες αναλύσεις προς την αντίστοιχη από μονοδιάστατες (TAF) κατά μήκος της επιφάνειας των τριών εξεταζόμενων προσομοιωμάτων. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται για τις τρεις χρονοϊστορίες επιτάχυνσης με μέγιστη επιτάχυνση 0.1g και για απορριμματικό υλικό Τύπου Β με σχέση απομείωσης του μέτρου διάτμησης-αύξησης της απόσβεσης σύμφωνα με τον Zekkos (2005).

Όπως είναι αναμενόμενο, τα προαναφερθέντα θα πρέπει να ενυπάρχουν και στον συντελεστή τοπογραφικής επιδείνωσης (TAF), ο οποίος αποτελεί την ποσοτικοποίηση της επίδρασης των γεωμετρικών στοιχείων στη δυναμική απόκριση του κάθε προσομοιώματος. Στο Σχήμα 4.20 φαίνεται η κατανομή της εν λόγω παραμέτρου στην επιφάνεια των τριών προσομοιωμάτων για τις τρεις εξεταζόμενες διεγέρσεις θεωρώντας απορριμματικό υλικό Τύπου Β και τη μη γραμμική συσχέτιση των καμπυλών του

Zekkos (2005). Παρατηρείται γενικά ότι, για τη σεισμική καταγραφή του σεισμού του Αιγίου ο συντελεστής τοπογραφικής επιδείνωσης λαμβάνει τις μικρότερες τιμές (μικρότερες της μονάδας) και για τα τρία προσομοιώματα, γεγονός το οποίο αποτελεί ένδειξη ότι οι μονοδιάστατες αναλύσεις μπορεί να είναι συντηρητικές στον υπολογισμό της μέγιστης οριζόντιας επιτάχυνσης. Αντιθέτως, η δυσμενέστερη απόκριση προκύπτει για τον παλμό Ricker, όπου οι διδιάστατες αναλύσεις προβλέπουν αισθητά μεγαλύτερες τιμές επιτάχυνσης συγκριτικά με τις μονοδιάστατες.



**Σχήμα 4.21.** Κατανομή του λόγου της μέγιστης οριζόντιας επιτάχυνσης από διδιάστατες αναλύσεις προς την αντίστοιχη από μονοδιάστατες (TAF) κατά μήκος της επιφάνειας των τριών εξεταζόμενων προσομοιωμάτων. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται για τις τρεις ιστορίες επιτάχυνσης με μέγιστη επιτάχυνση 0.36g και για απορριμματικό υλικό Τύπου Β με σχέση απομείωσης του μέτρου διάτμησης-αύξησης της απόσβεσης σύμφωνα με τον Zekkos (2005).

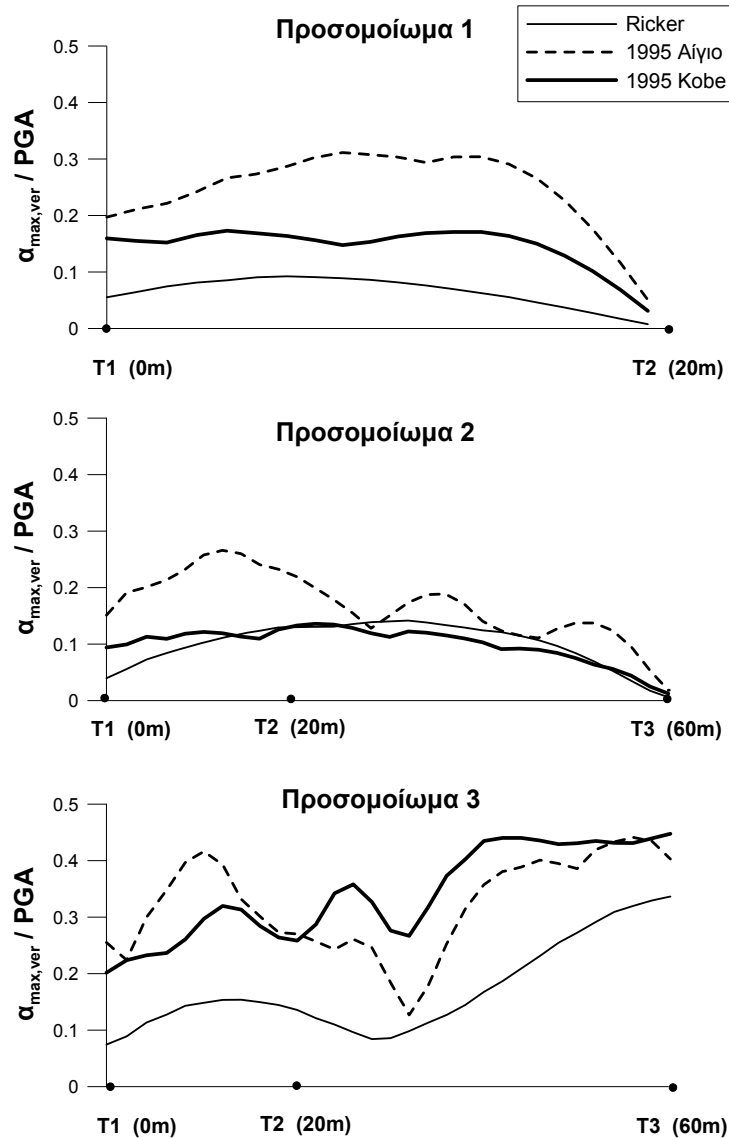
Όμως, εκτός από το συχνотικό περιεχόμενο, σημαντική είναι και η συμβολή του μεγέθους της επιβαλλόμενης επιτάχυνσης στην εκτίμηση της μη γραμμικής δυναμικής απόκρισης. Η αύξηση της μέγιστης επιβαλλόμενης επιτάχυνσης συνεπάγεται περαιτέρω αύξηση των αναπτυσσόμενων διατμητικών παραμορφώσεων και πιο έντονη μη γραμμική συμπεριφορά, η οποία εκφράζεται ως πιο έντονη μείωση της ιδιοσυχνότητας της κατασκευής αλλά και της ενίσχυσης της σεισμικής κίνησης.

Συγκρίνοντας τα Σχήματα 4.20 και 4.21 (λαμβάνοντας υπόψη και τη διαφορά κλίμακας) παρατηρούνται αισθητές διαφοροποιήσεις στον συντελεστή τοπογραφικής επιδείνωσης, για το απορριμματικό υλικό Τύπου Β, λόγω της αύξησης της μέγιστης οριζόντιας επιτάχυνσης. Διαπιστώνεται ότι για το πρώτο προσομοίωμα η αύξηση της επιβαλλόμενης επιτάχυνσης συνεπάγεται και αύξηση του συντελεστή τοπογραφικής επιδείνωσης και για τις τρεις περιπτώσεις σεισμικής διέγερσης, ενώ για το δεύτερο και για το τρίτο η συμπεριφορά αυτή ισχύει κυρίως για την καταγραφή του σεισμού του Kobe (1995), αλλά και για τον παλμό Ricker. Πάντως, σε αντιστοιχία με την προηγούμενη περίπτωση (για μεσαίας κλίμακας ένταση ίση με 0.1g), οι μονοδιάστατες αναλύσεις είναι συντηρητικές στον υπολογισμό της μέγιστης οριζόντιας επιτάχυνσης για την καταγραφή του σεισμού του Αιγίου.

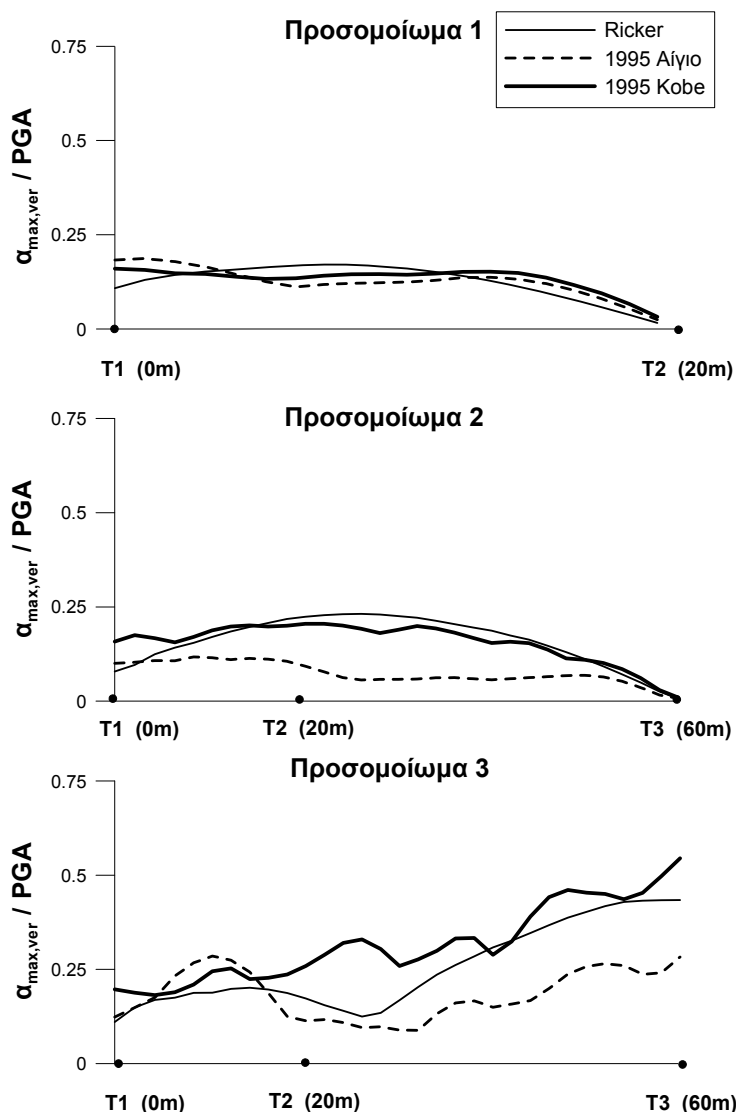
Η επίδραση των χαρακτηριστικών της χρονοϊστορίας της επιβαλλόμενης επιτάχυνσης είναι εμφανής και για την παρασιτική κατακόρυφη συνιστώσα της επιτάχυνσης. Στο Σχήμα 4.22 φαίνονται οι κατανομές της κανονικοποιημένης κατακόρυφης επιτάχυνσης στην επιφάνεια των τριών προσομοιωμάτων για το απορριμματικό υλικό ενδιάμεσης δυστημσίας (Τύπου Β). Είναι φανερό ότι και για τις τρεις εξεταζόμενες τυπικές διατομές οι μεγαλύτερες τιμές της παρασιτικής κατακόρυφης επιτάχυνσης εντοπίζονται στην καταγραφή του σεισμού του Αιγίου (1995). Στην περίπτωση του παλμού Ricker, η μη γραμμική συμπεριφορά οδηγεί σε μείωση των τιμών της κατακόρυφης επιτάχυνσης, με αποτέλεσμα να είναι και η ευμενέστερη περίπτωση.

Η επίδραση της πιο έντονης μη γραμμικής συμπεριφοράς στην αναπτυσσόμενη παρασιτική κατακόρυφη επιτάχυνση μπορεί να διαπιστωθεί από την αντιπαραβολή των Σχημάτων 4.22 και 4.23. Η επίδραση τόσο της αύξησης της μέγιστης επιτάχυνσης όσο και του συχνотικού περιεχομένου της διέγερσης είναι αρκετά σύνθετη οδηγώντας σε άλλες περιπτώσεις σε αύξηση του μεγέθους της κατακόρυφης επιτάχυνσης και σε άλλες

περιπτώσεις σε μείωση, όπως συμβαίνει για την καταγραφή του σεισμού του Kobe (1995) για το δεύτερο και πρώτο προσομοίωμα, αντίστοιχα.



**Σχήμα 4.22.** Κατανομή του λόγου της μέγιστης κατακόρυφης επιτάχυνσης προς την μέγιστη επιβαλλόμενη επιτάχυνση ( $\alpha_{\max, \text{ver}} / \text{PGA}$ ) κατά μήκος της επιφάνειας των τριών εξεταζόμενων προσομοιωμάτων. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται για τις τρεις χρονοϊστορίες επιτάχυνσης με μέγιστη επιτάχυνση 0.1g και για απορριμματικό υλικό Τύπου Β με σχέση απομείωσης του μέτρου διάτμησης-αύξησης της απόσβεσης σύμφωνα με τον Zekkos (2005).



**Σχήμα 4.23.** Κατανομή του λόγου της μέγιστης κατακόρυφης επιτάχυνσης προς την μέγιστη επιβαλλόμενη επιτάχυνση ( $\alpha_{\max,ver}/PGA$ ) κατά μήκος της επιφάνειας των τριών εξεταζόμενων προσομοιωμάτων. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται για τις τρεις χρονοϊστορίες επιτάχυνσης με μέγιστη επιτάχυνση 0.36g και για απορριμματικό υλικό Τύπου Β με σχέση απομείωσης του μέτρου διάτμησης-αύξησης της απόσβεσης σύμφωνα με τον Zekkos (2005).

#### 4.4.5 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα

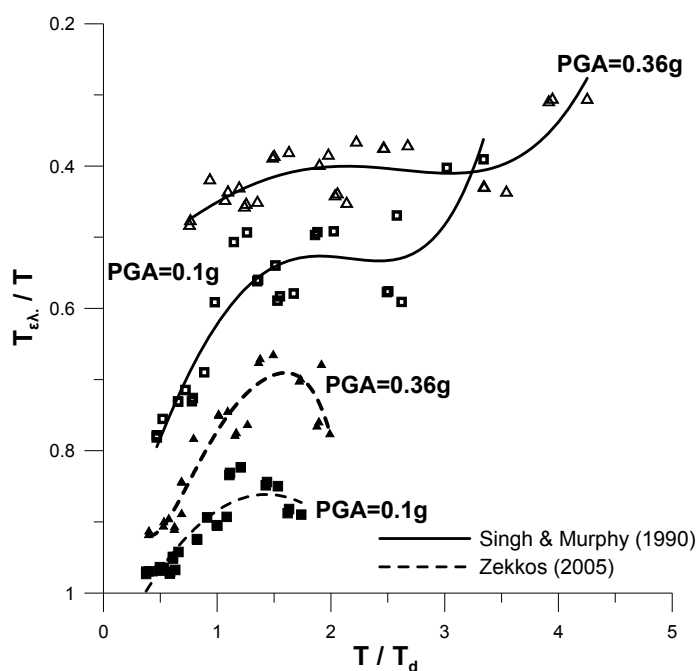
Η εκτενής διερεύνηση της δυναμικής απόκρισης που προηγήθηκε συνετέλεσε στην εξαγωγή κάποιων χρήσιμων συμπερασμάτων. Προκειμένου να συμπυκνωθούν τα παραπάνω αποτελέσματα, αλλά και να παραμετροποιηθεί η επίδραση των επιμέρους παραγόντων, παρουσιάζονται στη συνέχεια συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα των δυναμικών και των ιδιομορφικών αναλύσεων που διεξήχθησαν.

Μία σημαντική συνιστώσα της δυναμικής απόκρισης που εμπεριέχει τα περισσότερα χαρακτηριστικά ενός Χ.Υ.Τ.Α. αποτελεί η ιδιοπερίοδός του, λόγω γραμμικώς ελαστικής και ισοδύναμα γραμμικής συμπεριφοράς. Διαπιστώθηκε ότι, ως αποτέλεσμα της ισοδύναμα γραμμικής συμπεριφοράς η ιδιοπερίοδος αυξάνεται και μάλιστα η αύξηση αυτή εξαρτάται από το συχνотικό περιεχόμενο της σεισμικής κίνησης και από το επίπεδο της επιβαλλόμενης επιτάχυνσης. Για τον λόγο αυτό μορφώθηκε η συσχέτιση του λόγου της ελαστικής ιδιοπεριόδου προς την αντίστοιχη ισοδύναμα γραμμική ( $T_{el}/T$ ), συναρτήσει του λόγου της ισοδύναμα γραμμικής ιδιοπεριόδου προς την δεσπόζουσα περίοδο της σεισμικής κίνησης ( $T/T_d$ ). Στο Σχήμα 4.24 παρατίθενται τα αποτελέσματα για τη σχέση απομείωσης του μέτρου διάτμησης-αύξησης της απόσβεσης που προτάθηκε από τους Singh and Murphy (1990) αλλά και από τον Zekkos (2005). Παρατηρείται ότι, για τη δεύτερη μη γραμμική συσχέτιση η ιδιοπερίοδος δεν παρουσιάζει σημαντική αύξηση, ακόμα και για το μεγαλύτερο εξεταζόμενο επίπεδο επιτάχυνσης (0.36g). Αντιθέτως, για την πρώτη μη γραμμική σχέση η αύξηση της ιδιοπεριόδου είναι ιδιαίτερα σημαντική, λαμβάνοντας για την περίπτωση μέγιστης επιβαλλόμενης επιτάχυνσης ίσης με 0.36g τιμή μεγαλύτερη και από τη διπλάσια της ελαστικής ιδιοπεριόδου. Επιπλέον, και για τις δύο σχέσεις διαπιστώνεται ότι η αύξηση της ιδιοπεριόδου είναι πιο έντονη, καθώς μειώνεται η δεσπόζουσα περίοδος του κραδασμού για  $T/T_d$  μικρότερο ίσο του 1.5, ενώ για μεγαλύτερες τιμές ισχύει το αντίθετο.

Όσον αφορά στη δυναμική απόκριση, παρατηρήθηκε ότι υπάρχει συνάρτηση της ενίσχυσης της σεισμικής κίνησης αφενός με τα χαρακτηριστικά της κατασκευής, δηλαδή την ιδιοπεριόδό της ( $T_{str}$ ), αφετέρου με τα χαρακτηριστικά της ίδιας της επιβαλλόμενης χρονοϊστορίας, δηλαδή τη δεσπόζουσα περίοδο ( $T_d$ ) και τη μέγιστη επιβαλλόμενη επιτάχυνση (PGA). Για τον λόγο αυτό διαμορφώνονται συσχετίσεις του λόγου της μέγιστης οριζόντιας και κατακόρυφης επιτάχυνσης προς τη μέγιστη επιβαλλόμενη επιτάχυνση συναρτήσει του λόγου της ισοδύναμα γραμμικής ιδιοπεριόδου προς τη δεσπόζουσα περίοδο της σεισμικής κίνησης ( $T_{str}/T_d$ ) (βλ. Σχήμα 4.25). Παρατηρείται ότι, τόσο η ελαστική όσο και η ισοδύναμα γραμμική απόκριση που χαρακτηρίζονται από τη σχέση που προτείνεται από τον Zekkos (2005) σχετίζονται με μεγάλες τιμές ενίσχυσης που είναι μεγαλύτερες του 3.5 και φθάνουν έως 5, ειδικά για τιμές του λόγου  $T_{str}/T_d$  κοντά στη μονάδα (φαινόμενο συντονισμού). Επιπλέον, για τις ίδιες συνθήκες διαπιστώνεται και μεγαλύτερη ενίσχυση της επιβαλλόμενης επιτάχυνσης για τον πλευρικό Χ.Υ.Τ.Α. (τρίτο προσομοίωμα), κάτι που δεν είναι προφανές για την

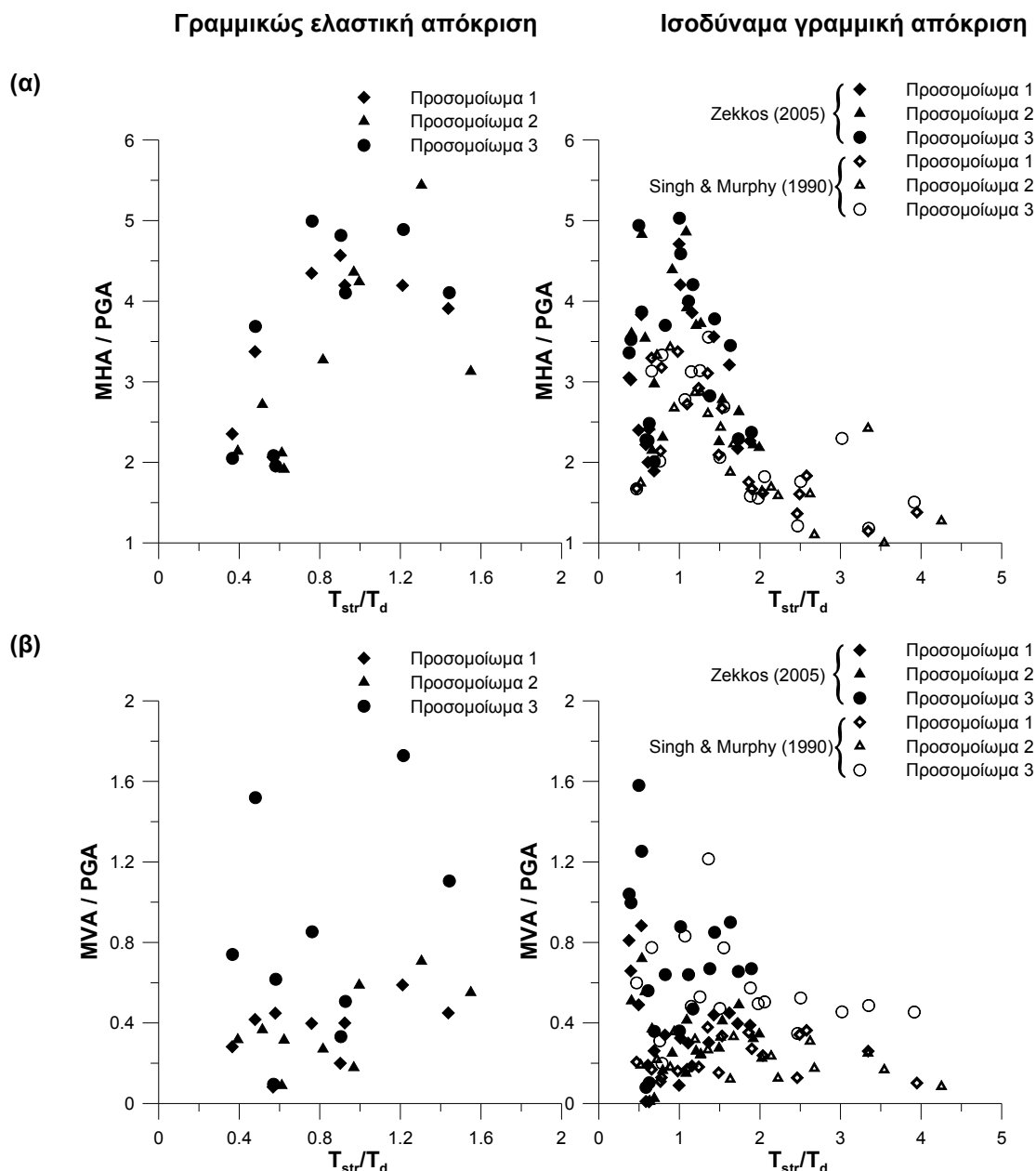


περίπτωση της μη γραμμικής συμπεριφοράς κατά Singh and Murphy (1990). Πιο συγκεκριμένα, η ενίσχυση που προέκυψε από τις αντίστοιχες αριθμητικές αναλύσεις λαμβάνει κατά μέγιστο τιμές ίσες με 3.



**Σχήμα 4.24.** Κατανομή του λόγου της ελαστικής προς την ισοδύναμα γραμμική ιδιοπερίοδο ( $T_{ελ}/T$ ) συναρτήσει του λόγου της ισοδύναμα γραμμικής ιδιοπεριόδου προς τη δεσπόζουσα περίοδο της σεισμικής κίνησης. Τα αποτελέσματα παρατίθενται και για τα δύο επίπεδα ισχυρής εδαφικής επιτάχυνσης και τις δύο εξεταζόμενες συσχετίσεις απομείωσης του μέτρου διάτμησης-αύξησης της απόσβεσης.

Πρέπει να τονισθεί ότι η διασπορά των υπολογισθεισών τιμών επιτάχυνσης μπορεί να αποδοθεί αφενός στην αδυναμία εύρεσης μίας μοναδικής παραμέτρου που να μπορεί να περιγράψει επαρκώς τα σύνθετα φαινόμενα κυματικής διάδοσης που αναλύθηκαν εκτενώς στην προηγούμενη διερεύνηση, αφετέρου στην περιορισμένη απόδοση του συχνотικού περιεχομένου της σεισμικής κίνησης από τη δεσπόζουσα περίοδο. Παρόλα αυτά, διαπιστώνεται μια τάση κατανομής της παραμέτρου που προσεγγίζει την μορφή ενός φάσματος σχεδιασμού. Τέλος πρέπει να σημειωθεί ότι τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται αφορούν θεμελίωση σε απολύτως άκαμπτο βράχο, γεγονός που οδηγεί σε πρακτικά μηδενική απόσβεση ακτινοβολίας και αποτελεί έναν ακόμη λόγο για την ανάπτυξη σημαντικών ενισχύσεων.

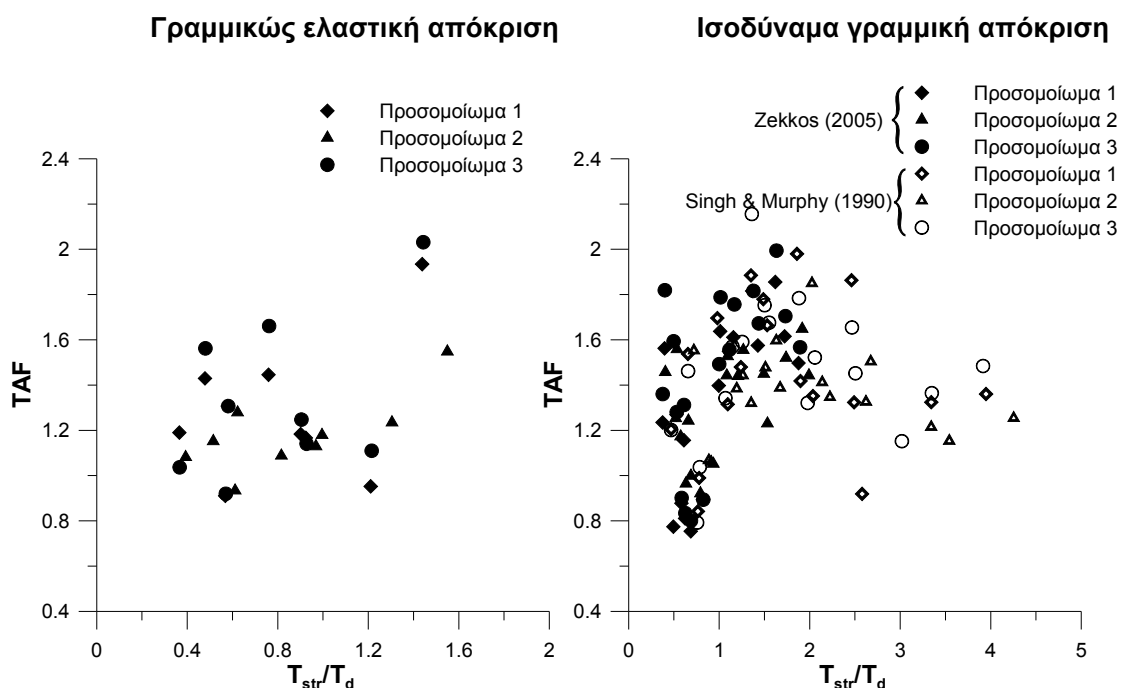


**Σχήμα 4.25.** Κατανομή του λόγου: (α) της μέγιστης οριζόντιας επιτάχυνσης προς τη μέγιστη επιβαλλόμενη επιτάχυνση ( $MHA/PGA$ ), και (β) της μέγιστης παρασιτικής κατακόρυφης επιτάχυνσης προς τη μέγιστη επιβαλλόμενη επιτάχυνση ( $MVA/PGA$ ), συναρτήσεως του λόγου της ισοδύναμα γραμμικής ιδιοπεριόδου προς τη δεσπόζουσα περίοδο της σεισμικής κίνησης ( $T_{str}/T_d$ ). Τα αποτελέσματα παρατίθενται για ελαστική και ισοδύναμα γραμμική απόκριση και τις δύο εξεταζόμενες συσχετίσεις απομείωσης του μέτρου διάτμησης-αύξησης της απόσβεσης.

Η ανάπτυξη της κατακόρυφης παρασιτικής συνιστώσας της επιτάχυνσης φάνηκε να επηρεάζεται από αντίστοιχες παραμέτρους με την οριζόντια συνιστώσα. Στο Σχήμα 4.25β, σε συμφωνία με τις αντίστοιχες παρατηρήσεις για την οριζόντια συνιστώσα της επιτάχυνσης, οι τιμές που προκύπτουν για ελαστική συμπεριφορά και για μη γραμμική κατά τον Zekkos (2005) είναι ιδιαίτερα υψηλές και οι μεγαλύτερες εντοπίζονται για τον

πλευρικό Χ.Υ.Τ.Α. (τρίτο προσομοίωμα), όπου ξεπερνούν και το 100% της μέγιστης επιβαλλόμενης οριζόντιας επιτάχυνσης. Για τα άλλα δύο προσομοιώματα (υπέργειο Χ.Υ.Τ.Α.) η κατακόρυφη συνιστώσα της επιτάχυνσης περιορίζεται εν γένει σε τιμές μικρότερες του 50% της μέγιστης επιβαλλόμενης οριζόντιας επιτάχυνσης. Για την περίπτωση μη γραμμικής συμπεριφοράς κατά Singh and Murphy (1990) οι τιμές αυτές μειώνονται ακόμη περισσότερο, αν και για την περίπτωση του πλευρικού Χ.Υ.Τ.Α. η παρασιτική συνιστώσα της επιτάχυνσης εξακολουθεί να είναι μεγάλη.

Ένα ακόμη μείζον θέμα που σχετίζεται με τη δυναμική απόκριση των Χ.Υ.Τ.Α. είναι η ικανότητα των μονοδιάστατων αναλύσεων να αποδώσουν με επαρκή ακρίβεια τις μέγιστες αναπτυσσόμενες οριζόντιες επιταχύνσεις. Υπενθυμίζεται ότι οι Rathje and Bray (2001) έχουν προτείνει τον πολλαπλασιασμό των χρονοϊστοριών επιτάχυνσης με έναν συντελεστή ίσο με 1.3, προκειμένου να λαμβάνεται υπόψη η επίδραση της τοπογραφικής επιδείνωσης στις μονοδιάστατες αναλύσεις.



**Σχήμα 4.26.** Κατανομή του λόγου της μέγιστης οριζόντιας επιτάχυνσης από διδιάστατες αναλύσεις προς την αντίστοιχη από μονοδιάστατες αναλύσεις (TAF), συναρτήσει του λόγου της ισοδύναμα γραμμικής ιδιοπεριόδου προς τη δεσπόζουσα περίοδο της σεισμικής κίνησης ( $T_{str}/T_d$ ). Τα αποτελέσματα παρατίθενται για ελαστική και ισοδύναμα γραμμική απόκριση και τις δύο εξεταζόμενες συσχετίσεις απομείωσης του μέτρου διάτμησης-αύξησης της απόσβεσης.

Στο Σχήμα 4.26 παρατίθενται τα αποτελέσματα του συνόλου των παραμετρικών αναλύσεων, ως ο λόγος της μέγιστης οριζόντιας επιτάχυνσης από διδιάστατες προς τις

αντίστοιχες μονοδιάστατες αναλύσεις (ΤΑΕ), συναρτήσει του λόγου της ισοδύναμα γραμμικής ιδιοπεριόδου προς τη δεσπόζουσα περίοδο της σεισμικής κίνησης ( $T_{str}/T_d$ ). Αρχικά διαπιστώνεται ότι δεν υφίσταται κάποια συσχέτιση με τον λόγο  $T_{str}/T_d$ , αν και, όπως προέκυψε από την προηγηθείσα ανάλυση της δυναμικής απόκρισης, υπό ελαστικές και ισοδύναμα γραμμικές συνθήκες, η τοπογραφική επιδείνωση εξαρτάται από το συχνотικό περιεχόμενο της σεισμικής κίνησης. Ακόμη, παρατηρείται μεγάλη διασπορά των τιμών οι οποίες είναι εν γένει μεγαλύτερες από 1.2 αλλά φθάνουν μέχρι και ίσες με 2. Φαίνεται λοιπόν ότι η προτεινόμενη από τους Rathje and Bray (2001) τιμή 1.3 πλησιάζει μάλλον προς το κατώτατο όριο και όχι προς τη μέση κατανομή του συντελεστή τοπογραφικής επιδείνωσης.

#### **4.5 ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ Χ.Υ.Τ.Α. ΚΑΙ ΕΔΑΦΟΥΣ ΘΕΜΕΛΙΩΣΗΣ**

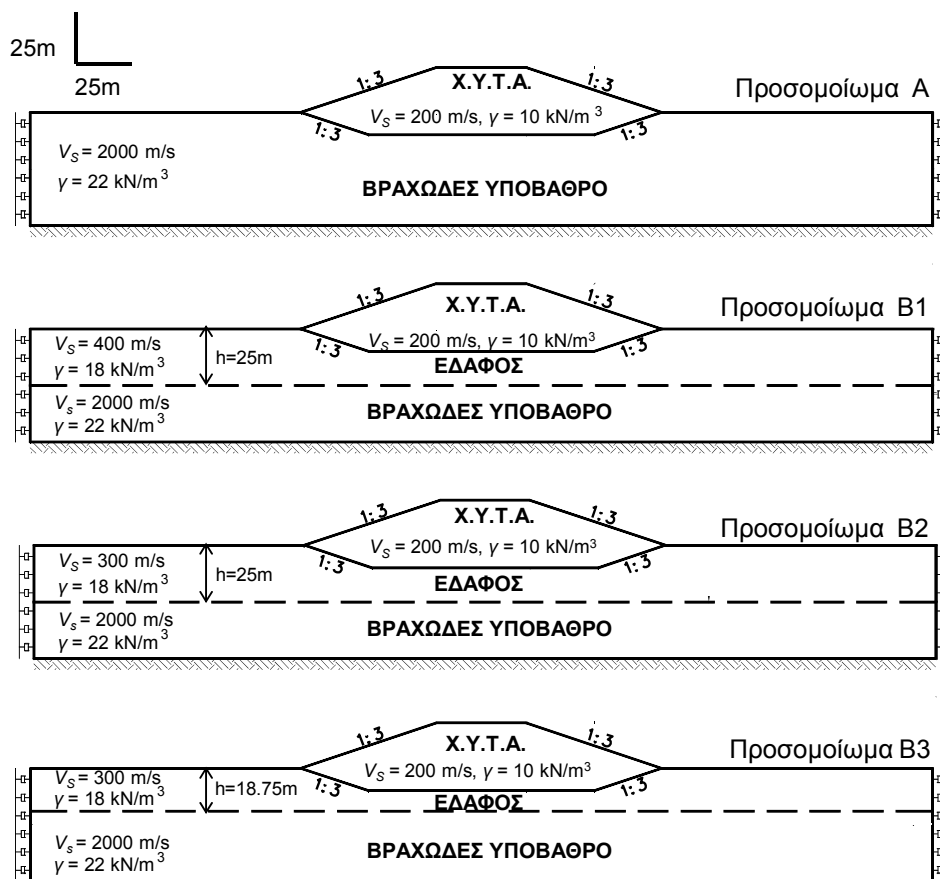
Η παραμετρική διερεύνηση που προηγήθηκε αφορούσε την ειδική περίπτωση για την οποία το έδαφος θεμελίωσης είναι απολύτως δύσκαμπτο. Εν γένει, η επιλογή της τοποθέτησης ενός Χ.Υ.Τ.Α. σε περιοχή με έδαφος θεμελίωσης αποτελούμενο από άρρηκτο βράχο έχει διάφορα πλεονεκτήματα, όπως για παράδειγμα την ευστάθεια της θεμελίωσης καθώς και την ευστάθεια των πρανών απόθεσης σε πλευρικούς Χ.Υ.Τ.Α., αλλά και τον περιορισμό του κινδύνου διαρροών των στραγγισμάτων στον υδροφόρο ορίζοντα. Όμως δεν είναι πάντοτε εφικτή η επιλογή μιας θέσης με αυτά τα χαρακτηριστικά για την κατασκευή ενός Χ.Υ.Τ.Α., γεγονός που συντελεί στο ότι το έδαφος θεμελίωσης είναι μία επιπλέον παράμετρος η οποία θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά την εκτίμηση της δυναμικής απόκρισης.

Για τον λόγο αυτό διερευνάται στη συνέχεια ποιοτικά το φαινόμενο της δυναμικής αλληλεπίδρασης Χ.Υ.Τ.Α. και εδάφους θεμελίωσης. Καθώς στις προηγηθείσες ενότητες προσεγγίστηκαν λεπτομερώς μέσω μιας εκτενούς παραμετρικής διερεύνησης τα χαρακτηριστικά της δυναμικής απόκρισης των Χ.Υ.Τ.Α., παρακάτω θα δοθεί έμφαση κυρίως στις βασικές αρχές της δυναμικής αλληλεπίδρασης. Στόχος είναι να παρουσιαστεί ο ρόλος των τοπικών εδαφικών συνθηκών τονίζοντας την επίδραση των επιμέρους λοιπών παραμέτρων εκτός των χαρακτηριστικών του Χ.Υ.Τ.Α., οι οποίες συνιστούν και την ανάγκη διενέργειας χαρακτηριστικών δυναμικών αναλύσεων για κάθε έργο.

#### 4.5.1 Παραδοχές της παραμετρικής διερεύνησης

Ακολουθώντας την αριθμητική μεθοδολογία που έχει ήδη περιγραφεί, με την εφαρμογή του προγράμματος QUAD4M (Hudson et al., 1994), υπολογίστηκε η δυναμική απόκριση των τεσσάρων προσομοιωμάτων, τα οποία παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.27. Όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του Χ.Υ.Τ.Α. δεν μεταβάλλονται για τις τέσσερις περιπτώσεις και πιο συγκεκριμένα το υπέργειο τμήμα του, ύψους 20m, ταυτίζεται με το Προσομοίωμα 1 των προηγούμενων παραγράφων. Στη συγκεκριμένη περίπτωση θεωρείται και υπόγειο τμήμα, ύψους 10m, το οποίο αποτελεί κοινή πρακτική για την περίπτωση μαλακού εδάφους θεμελίωσης. Επιπλέον, όσον αφορά στις μηχανικές ιδιότητες του απορριμματικού υλικού, επιλέγονται ταχύτητα διάδοσης διατμητικού κύματος και πυκνότητα σταθερές καθ' ύψος (λόγω της μικρής τιμής του ύψους) και ίσες προς 200m/sec και 1tn/m<sup>3</sup> αντίστοιχα. Η μη γραμμική συμπεριφορά του απορριμματικού υλικού θεωρείται ότι αποδίδεται από τη συσχέτιση απομείωσης του μέτρου διάτμησης-αύξησης της απόσβεσης συναρτήσει της διατμητικής παραμόρφωσης, η οποία προτείνεται από τον Zekkos (2005) για απορριμματικό υλικό με ποσοστό εδαφοειδούς υλικού 62-76%.

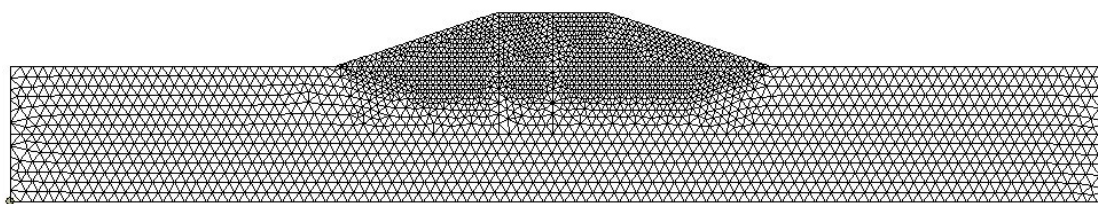
Αποσκοπώντας στην αποτίμηση των βασικών χαρακτηριστικών του εδάφους θεμελίωσης, δηλαδή της ταχύτητας διάδοσης του διατμητικού κύματος και του πάχους της εδαφικής στρώσης, διαμορφώθηκαν τα προσομοιώματα B1, B2 και B3. Στο Σχήμα 4.27 φαίνεται ότι το έδαφος θεμελίωσης χαρακτηρίζεται από ταχύτητα διάδοσης του διατμητικού κύματος ίση με 400m/sec για το προσομοίωμα B1 και 300m/sec για τα προσομοιώματα B2 και B3. Επίσης, ενώ στα προσομοιώματα B1 και B2 το ύψος της εδαφικής στρώσης στο ελεύθερο πεδίο είναι 25m με συνέπεια η πρώτη ιδιοσυχνότητα στο ελεύθερο πεδίο να είναι ίση με 4Hz και 3Hz αντίστοιχα, στο προσομοίωμα B3 το ύψος της εδαφικής στρώσης στο ελεύθερο πεδίο είναι 18.75m και άρα η πρώτη ιδιοσυχνότητα στο ελεύθερο πεδίο είναι ίση με 4Hz. Η σχέση απομείωσης του μέτρου διάτμησης-αύξησης της απόσβεσης συναρτήσει της αναπτυσσόμενης διατμητικής παραμόρφωσης για την ενδιάμεση εδαφική στρώση θεωρείται ότι προσδιορίζεται από τις καμπύλες που προτείνονται από τους Idriss et al. (1995) για αμμώδες έδαφος. Η εν λόγω συσχέτιση χαρακτηρίζεται από λίγο πιο έντονη απομείωση του μέτρου διάτμησης συναρτήσει της διατμητικής παραμόρφωσης συγκριτικά με την αντίστοιχη του απορριμματικού υλικού, όμως η απόσβεση είναι μικρότερη από την αντίστοιχη του απορριμματικού υλικού για αρκετά ευρύ πεδίο διατμητικών παραμορφώσεων.



**Σχήμα 4.27.** Εξεταζόμενα προσομοιώματα για τη διερεύνηση της δυναμικής αλληλεπίδρασης Χ.Υ.Τ.Α. – εδάφους θεμελίωσης.

Όπως και στις προηγούμενες αριθμητικές αναλύσεις εκτιμάται ο ρόλος των συχνοτικών χαρακτηριστικών και της έντασης της σεισμικής κίνησης. Οι χρονοϊστορίες της επιτάχυνσης που χρησιμοποιήθηκαν στις δυναμικές αναλύσεις ταυτίζονται με αυτές των προηγούμενων ενοτήτων δηλαδή είναι: (α) ένας παλμός Ricker, (β) η καταγραφή από τον σεισμό του Αιγίου (1995) και (γ) η καταγραφή Shin-Kobe από τον σεισμό Hyogoken-Nanbu (1995 Kobe). Στις χρονοϊστορίες της επιβαλλόμενης επιτάχυνσης εφαρμόστηκε επικλιμάκια αναγωγή προκειμένου να αντιστοιχούν σε γραμμικώς ελαστική και μη γραμμική συμπεριφορά του απορριμματικού υλικού με μέγιστη επιβαλλόμενη επιτάχυνση στο υπόβαθρο (PGA) ίση με 0.01g και 0.36g, αντίστοιχα.

Τέλος, η διακριτοποίηση των τεσσάρων προσομοιωμάτων έγινε με τριγωνικά στοιχεία επίπεδης παραμόρφωσης ενώ το μέγεθός τους επιλέχθηκε σε αντιστοιχία με το μικρότερο δυνατό μήκος κύματος (βλ. Σχήμα 4.28).

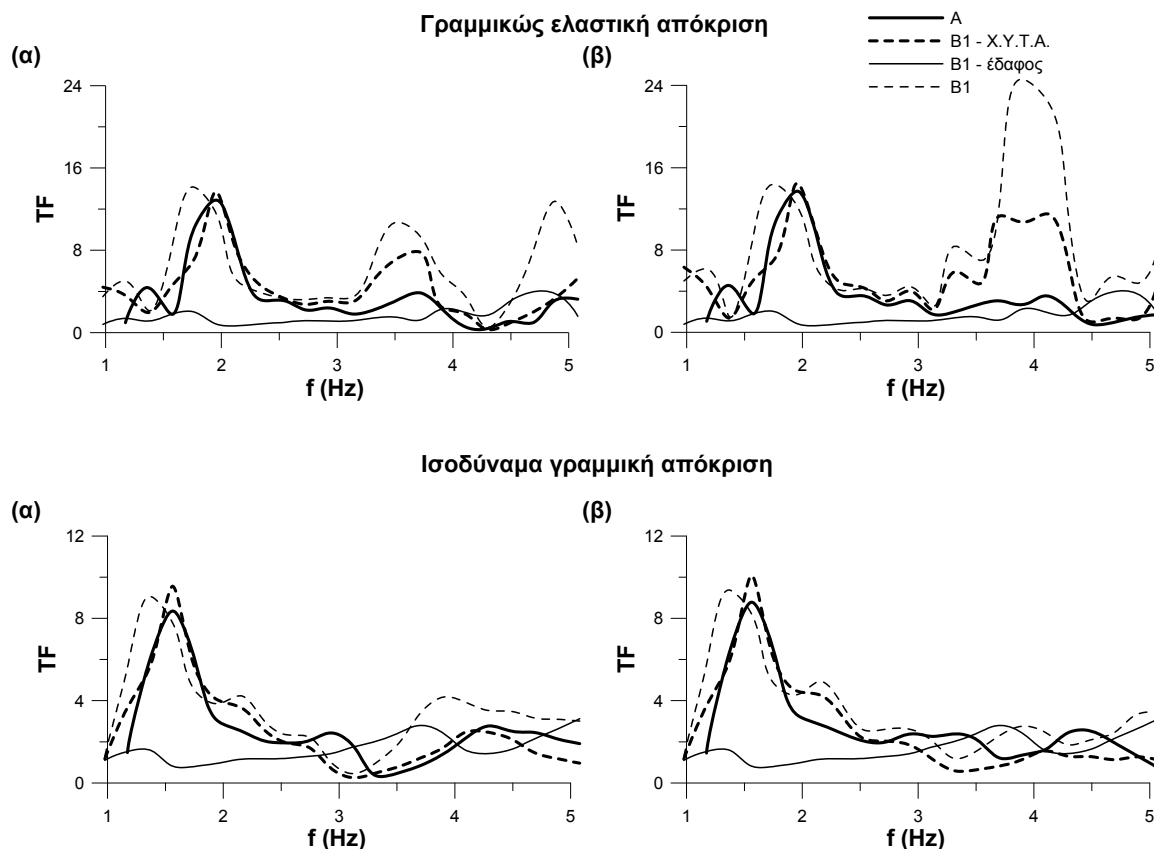


**Σχήμα 4.28.** Ο κοινός κάνναβος πεπερασμένων στοιχείων, που χρησιμοποιήθηκε στις δυναμικές αναλύσεις των τεσσάρων προσομοιωμάτων (A, B1, B2 και B3).

#### 4.5.2 Μελέτη της δυναμικής αλληλεπίδρασης θεμελίωσης - Χ.Υ.Τ.Α.

Αρχικά τα βασικά στοιχεία που καθορίζουν τη δυναμική αλληλεπίδραση Χ.Υ.Τ.Α.-εδάφους θεμελίωσης προσδιορίζονται συγκρίνοντας τη δυναμική απόκριση των προσομοιωμάτων A και B1 τόσο για την περίπτωση γραμμικώς ελαστικής όσο και για την περίπτωση μη γραμμικής συμπεριφοράς του απορριμματού υλικού και του εδάφους. Για τον σκοπό αυτό και προκειμένου να προσδιοριστούν τα συχνотικά χαρακτηριστικά της απόκρισης αλλά και οι μέγιστες τιμές της ενίσχυσης της σεισμικής κίνησης, υπολογίστηκαν κατάλληλες συναρτήσεις μεταφοράς (TF) σύμφωνα με τη διαδικασία που έχει ήδη περιγραφεί (βλ. Σχήμα 29). Οι συναρτήσεις μεταφοράς που παρατίθενται αφορούν δύο σημεία της επιφάνειας του προσομοιώματος, την αιχμή του πρανούς και τη θέση του άξονα συμμετρίας για την περίπτωση επιβολής παλμού Ricker, ο οποίος έχει πλούσιο συχνотικό περιεχόμενο και μπορεί να αποδώσει ικανοποιητικά τα συχνотικά χαρακτηριστικά της απόκρισης για το πεδίο των 1Hz έως 5Hz.

Στο Σχήμα 4.29 παρουσιάζονται και συγκρίνονται τα αποτελέσματα για την απόκριση των προσομοιωμάτων A και B1. Για το προσομοίωμα B1 προσδιορίστηκαν οι συναρτήσεις μεταφοράς του Χ.Υ.Τ.Α., λαμβάνοντας τον λόγο των φασμάτων Fourier της απόκρισης στην επιφάνεια προς την απόκριση στη διεπιφάνεια εδάφους - Χ.Υ.Τ.Α., οι συνολικές συναρτήσεις μεταφοράς, λαμβάνοντας το λόγο των φασμάτων Fourier της απόκρισης στην επιφάνεια προς της επιβαλλόμενης κίνησης, και οι συναρτήσεις μεταφοράς της εδαφικής στρώσης, λαμβάνοντας το λόγο των φασμάτων Fourier της απόκρισης στη διεπιφάνεια εδάφους - Χ.Υ.Τ.Α προς της επιβαλλόμενης κίνησης. Η συνάρτηση μεταφοράς της εδαφικής στρώσης στο ελεύθερο πεδίο δεν παρατίθεται καθώς η μορφή της είναι γνωστή με πρώτη ιδιοσυχνότητα στα 4Hz.



**Σχήμα 4.29.** Συναρτήσεις μεταφοράς: (α) στην αιχμή του προσομοιώματος και (β) στη θέση του άξονα συμμετρίας για το προσομοίωμα A, τον Χ.Υ.Τ.Α. του προσομοιώματος B1, την εδαφική στρώση που υπόκειται του Χ.Υ.Τ.Α. στο προσομοίωμα B1, και το συνολικό προσομοίωμα B1. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται για γραμμικώς ελαστική απόκριση (άνω) και ισοδύναμα γραμμική απόκριση (κάτω) κατά την επιβολή παλμού Ricker.

Εξετάζοντας την ελαστική δυναμική απόκριση, παρατηρείται ότι η πρώτη (κύρια) ιδιοσυχνότητα του προσομοιώματος A είναι κοινή και για τα δύο εξεταζόμενα σημεία και ίση με 2Hz, ενώ η δεύτερη ιδιοσυχνότητα εντοπίζεται περίπου στα 3.7Hz αλλά με σημαντικά μειωμένη ενίσχυση. Για το προσομοίωμα B1, και συγκεκριμένα για τη συνάρτηση μεταφοράς μόνο του Χ.Υ.Τ.Α., η πρώτη ιδιοσυχνότητα και η αντίστοιχη σε αυτήν τιμή της ενίσχυσης είναι παραπλήσιες του προσομοιώματος A. Όμως η ενίσχυση στη δεύτερη ιδιοσυχνότητα είναι σημαντικά μεγαλύτερη. Επίσης ειδικά για το σημείο που αντιστοιχεί στον άξονα συμμετρίας η δεύτερη ιδιοσυχνότητα αναφέρεται στο πεδίο συχνοτήτων 3.7 έως 4.2Hz και παρουσιάζει μεγαλύτερες τιμές ενίσχυσης εν συγκρίσει με την απόκριση της αιχμής του πρανούς. Το γεγονός αυτό αποδίδεται στο γεγονός ότι η πρώτη ιδιοσυχνότητα της εδαφικής στρώσης εντοπίζεται στα 4Hz.

Όσον αφορά στην απόκριση της εδαφικής στρώσης που υπόκειται του Χ.Υ.Τ.Α., η κύρια ιδιοσυχνότητα φαίνεται ότι πλησιάζει τα 5Hz γεγονός το οποίο αποδίδεται στο



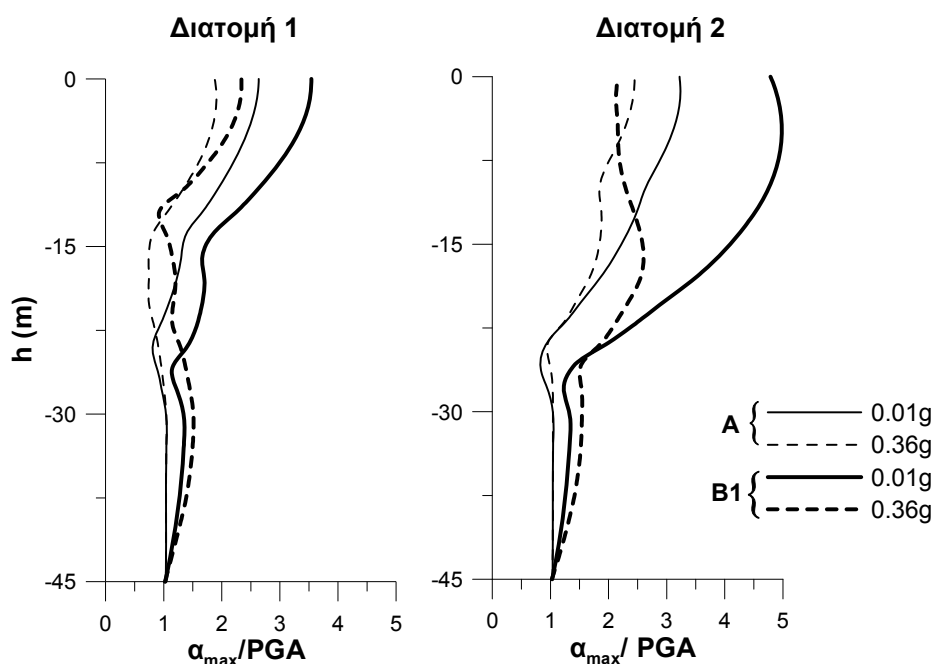
μειωμένο ύψος της εδαφικής στρώσης κάτω από τον Χ.Υ.Τ.Α. Επιπροσθέτως, ελάχιστα αυξημένη ενίσχυση παρατηρείται στην περιοχή των συχνοτήτων κοντά στην πρώτη ιδιοσυχνότητα του Χ.Υ.Τ.Α. το οποίο αποδίδεται στην αλληλεπίδραση της γεωκατασκευής με την εδαφική στρώση. Όλες οι προαναφερθείσες παρατηρήσεις συμπυκνώνονται καθώς εξετάζεται η συνολική συνάρτηση μεταφοράς του συστήματος για το προσομοίωμα B1. Πιο συγκεκριμένα, η πρώτη ιδιοσυχνότητα παρατηρείται ελαφρώς μειωμένη συγκριτικά με την αρχική του Χ.Υ.Τ.Α. ως αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης με την εδαφική στρώση. Η δεύτερη ιδιοσυχνότητα παρόλο που δεν αλλάζει τιμή για την απόκριση της αιχμής του πρανούς, παρουσιάζει ιδιαίτερα αυξημένη ενίσχυση, η οποία είναι πολύ μικρότερη της αντίστοιχης ενίσχυσης (στη δεύτερη ιδιοσυχνότητα) της απόκρισης στον άξονα συμμετρίας. Η δεύτερη ιδιοσυχνότητα παρουσιάζει τη μέγιστη ενίσχυση στο σημείο του άξονα συμμετρίας και ταυτίζεται με την αντίστοιχη της εδαφικής στρώσης στο ελεύθερο πεδίο.

Με εξαίρεση μια πολύ μικρή περιοχή συχνοτήτων (2Hz έως 2.5Hz) η ενίσχυση της σεισμικής κίνησης για το προσομοίωμα B1 είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη του προσομοιώματος A. Αυτό γίνεται αντιληπτό παρατηρώντας και την καθ' ύψος κατανομή της κανονικοποιημένης μέγιστης οριζόντιας επιτάχυνσης ως προς την μέγιστη επιβαλλόμενη επιτάχυνση (Σχήμα 4.30). Για τις δύο διατομές (στην αιχμή του πρανούς και στη θέση του άξονα συμμετρίας) η μέγιστη επιτάχυνση αυξάνεται καθ' ύψος, λαμβάνοντας όπως ήταν αναμενόμενο τη μέγιστη τιμή της στην επιφάνεια και για το προσομοίωμα B1.

Τα αντίστοιχα στοιχεία της δυναμικής απόκρισης των δύο προσομοιωμάτων εκτιμήθηκαν και για την περίπτωση της μη γραμμικής συμπεριφοράς. Πιο συγκεκριμένα, η πρώτη ιδιοσυχνότητα του Χ.Υ.Τ.Α. μειώνεται σημαντικά, αν και είναι κοινή για το προσομοίωμα A και B1 όπως άλλωστε ίσχυε και για την ελαστική απόκριση, χωρίς όμως να είναι εμφανής η ύπαρξη δεύτερης ιδιοσυχνότητας με ικανό μέγεθος ενίσχυσης. Η κύρια ιδιοσυχνότητα μειώνεται για την εδαφική στρώση λαμβάνοντας τιμές μικρότερες των 4Hz, ενώ και η ενίσχυση σχεδόν υποδιπλασιάζεται. Η συνολική συνάρτηση μεταφοράς του προσομοιώματος B1 ενδείκνυται για την εκτίμηση της δυναμικής αλληλεπίδρασης του Χ.Υ.Τ.Α. με το έδαφος θεμελίωσης.

Όπως και στην ελαστική συμπεριφορά η κύρια ιδιοσυχνότητα του συστήματος στο B1 είναι ελάχιστα μειωμένη σε σχέση με την αντίστοιχη του Χ.Υ.Τ.Α. μόνον. Επίσης οι

τιμές της ενίσχυσης αυξάνουν ελαφρώς κοντά στην ιδιοσυχνότητα της εδαφικής στρώσης, χωρίς όμως να παρατηρούνται οι εντυπωσιακά μεγάλες τιμές ενίσχυσης της ελαστικής απόκρισης. Το γεγονός αυτό αποδίδεται στην πιο έντονη μη γραμμική συμπεριφορά του εδαφικού υλικού σε σύγκριση με αυτή του απορριμματού υλικού. Εν γένει, στην περίπτωση της ισοδύναμα γραμμικής απόκρισης, φαίνεται ότι η ευνοϊκή ή μη συνεισφορά της αλληλεπίδρασης στη δυναμική απόκριση του Χ.Υ.Τ.Α. εξαρτάται πιο έντονα από το συχνотικό περιεχόμενο της διέγερσης, καθώς δεν είναι ξεκάθαρη η υπεροχή κάποιας από τις δύο περιπτώσεις. Το γεγονός αυτό αντικατοπτρίζεται και στις καθ' ύψος κατανομές της κανονικοποιημένης επιτάχυνσης για την περίπτωση επιβολής παλμού Ricker, όπου για την αιχμή του πρσανούς οι μέγιστες τιμές παρατηρούνται για την απόκριση του Χ.Υ.Τ.Α. που θεμελιώνεται σε μαλακό έδαφος, ενώ για την θέση του άξονα συμμετρίας οι μέγιστες τιμές κοντά στην επιφάνεια προκύπτουν για τον Χ.Υ.Τ.Α. που είναι θεμελιωμένος σε άρρηκτο βράχο.

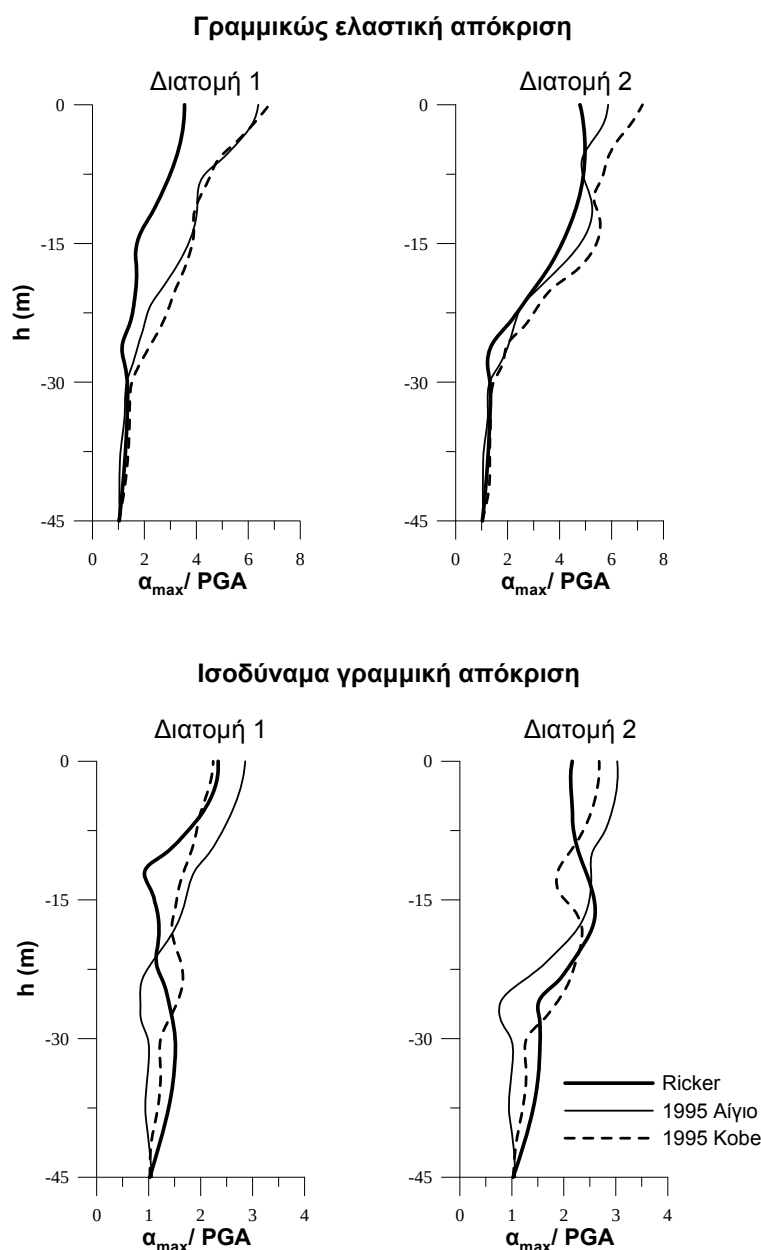


**Σχήμα 4.30.** Καθ' ύψος κατανομές της κανονικοποιημένης μέγιστης οριζόντιας επιτάχυνσης ως προς τη μέγιστη επιβαλλόμενη επιτάχυνση στην αιχμή του προσομοιώματος (Διατομή 1) και στη θέση του άξονα συμμετρίας (Διατομή 2) για τα προσομοιώματα A και B1 και την επιβολή παλμού Ricker.

#### 4.5.3 Επίδραση των συχνотικών χαρακτηριστικών της σεισμικής κίνησης

Η δυναμική αλληλεπίδραση του Χ.Υ.Τ.Α. με το έδαφος θεμελίωσης εξαρτάται όπως άλλωστε είναι αναμενόμενο και από τα συχνотικά χαρακτηριστικά της σεισμικής διέγερσης. Στο Σχήμα 4.31 παρουσιάζονται οι καθ' ύψος κατανομές της

κανονικοποιημένης οριζόντιας επιτάχυνσης στην αιχμή του Χ.Υ.Τ.Α. (Διατομή 1) και στη θέση του άξονα συμμετρίας (Διατομή 2). Για την περίπτωση της γραμμικώς ελαστικής συμπεριφοράς παρατηρείται ότι η αύξηση της περιόδου της χρονοϊστορίας της επιτάχυνσης από τον παλμό Ricker έως την καταγραφή του σεισμού του Kobe συντελεί σε αύξηση της απόκρισης στην επιφάνεια. Το γεγονός αυτό εύκολα ερμηνεύεται από την επισκόπηση των συναρτήσεων μεταφοράς του Σχήματος 4.29, στο οποίο φαίνεται ότι για ελαστική απόκριση από συχνότητα 3Hz έως 1.7Hz η ενίσχυση αυξάνει.



**Σχήμα 4.31.** Καθ' ύψος κατανομές της κανονικοποιημένης μέγιστης οριζόντιας επιτάχυνσης ως προς τη μέγιστη επιβαλλόμενη επιτάχυνση στην αιχμή του προσομοιώματος (Διατομή 1) και στη θέση του άξονα συμμετρίας (Διατομή 2) για το προσομοίωμα B1 και την επιβολή των τριών εξεταζόμενων χρονοϊστοριών επιτάχυνσης.

Παρόμοια συμπεράσματα δεν μπορούν να εξαχθούν και για την ισοδύναμα γραμμική απόκριση. Αυτό οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι η επίδραση του συχνοτικού περιεχομένου της διέγερσης αφορά και τα χαρακτηριστικά της απόκρισης του συστήματος, καθιστώντας δυσχερή την ερμηνεία των αποτελεσμάτων της δυναμικής απόκρισης. Παρόλα αυτά, παρατηρείται ότι η δυσμενέστερη απόκριση είναι αυτή που προκύπτει από τη σεισμική καταγραφή του Αιγίου, ενώ και το μέγεθος της ενίσχυσης είναι αρκετά μειωμένο, σχεδόν κατά 50% σε σύγκριση με την ελαστική απόκριση.

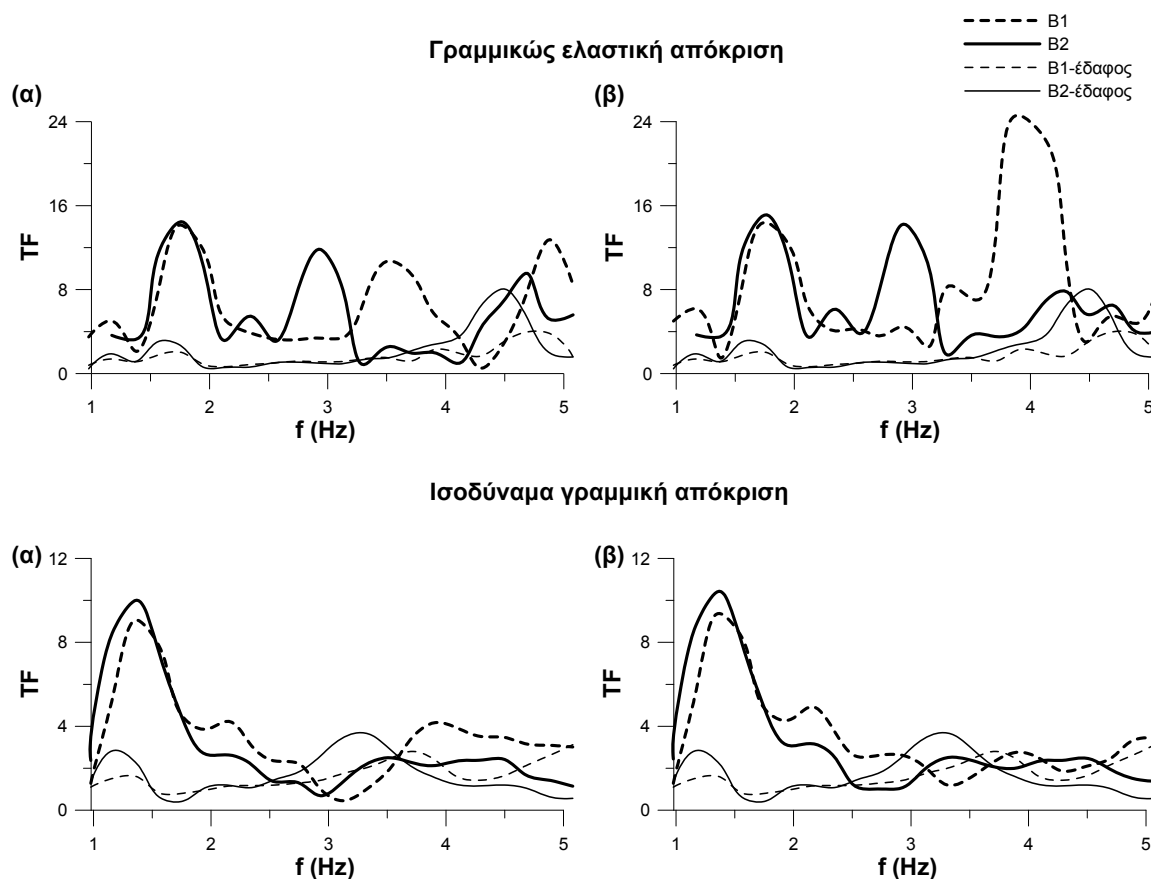
#### 4.5.4 Επίδραση των ιδιοτήτων του εδάφους θεμελίωσης

Ο ρόλος των ιδιοτήτων του εδάφους θεμελίωσης στη δυναμική αλληλεπίδραση Χ.Υ.Τ.Α.-εδάφους θεμελίωσης εκτιμάται μέσω δύο χαρακτηριστικών περιπτώσεων, δηλαδή για μικρότερη τιμή της ταχύτητας διάδοσης του διατμητικού κύματος και για μικρότερο ύψος της εδαφικής στρώσης, χωρίς όμως να μεταβάλλεται για τη δεύτερη περίπτωση η ιδιοπερίοδος της εδαφικής στρώσης στο ελεύθερο πεδίο. Οι δύο περιπτώσεις αυτές αποτελούν παραλλαγές του προσομοιώματος B1 του Σχήματος 4.27 και αντιπροσωπεύονται από τα προσομοιώματα B2 και B3, αντίστοιχα.

Στο Σχήμα 4.32 παρατίθενται οι συναρτήσεις μεταφοράς και για τη συνολική απόκριση αλλά και μόνο για την εδαφική στρώση των προσομοιωμάτων B1 και B2, στα σημεία που εξετάστηκαν και προηγουμένως. Τα αποτελέσματα της ελαστικής απόκρισης δείχνουν ότι η πρώτη ιδιοσυχνότητα του συστήματος Χ.Υ.Τ.Α. – έδαφος θεμελίωσης παραμένει αμετάβλητη, παρόλο που η ιδιοσυχνότητα της εδαφικής στρώσης στο ελεύθερο πεδίο μειώνεται. Αντιθέτως, τόσο η δεύτερη ιδιοσυχνότητα όσο και η τιμή της απόκρισης που αντιστοιχεί σε αυτήν μειώνονται λόγω της μείωσης της ταχύτητας διάδοσης του διατμητικού κύματος που χαρακτηρίζει την εδαφική στρώση. Επίσης, η τιμή της ενίσχυσης που αντιστοιχεί στην πρώτη ιδιοσυχνότητα του συστήματος αυξάνεται ελάχιστα, γεγονός που μπορεί να αποδοθεί στη μικρή αύξηση της ενίσχυσης στο αντίστοιχο πεδίο συχνοτήτων της απόκρισης στην εδαφική στρώση. Ακόμη, για την εδαφική στρώση οι τιμές της ενίσχυσης αυξάνονται σε όλο το εξεταζόμενο πεδίο συχνοτήτων, ενώ η κύρια συχνότητα εμφανίζεται ελαφρώς μειωμένη συγκριτικά με το προσομοίωμα B1, αλλά και πάλι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη του ελεύθερου πεδίου.

Για την ισοδύναμα γραμμική απόκριση δε διακρίνεται εύκολα η δεύτερη ιδιοσυχνότητα του συστήματος, ενώ η πρώτη ιδιοσυχνότητα φαίνεται να μην επηρεάζεται από τη μείωση της ταχύτητας διάδοσης του διατμητικού κύματος. Η

ενίσχυση στο πεδίο των συχνοτήτων περί την κύρια ιδιοσυχνότητα του συστήματος είναι αυξημένη για το προσομοίωμα B2 συγκριτικά με το προσομοίωμα B1. Ακόμη πιθανολογείται ότι μια μικρή αύξηση της ενίσχυσης για συχνότητες περίπου 3.5Hz μπορεί να οφείλεται στην αντίστοιχη ενίσχυση που παρουσιάζει η απόκριση της εδαφικής στρώσης.

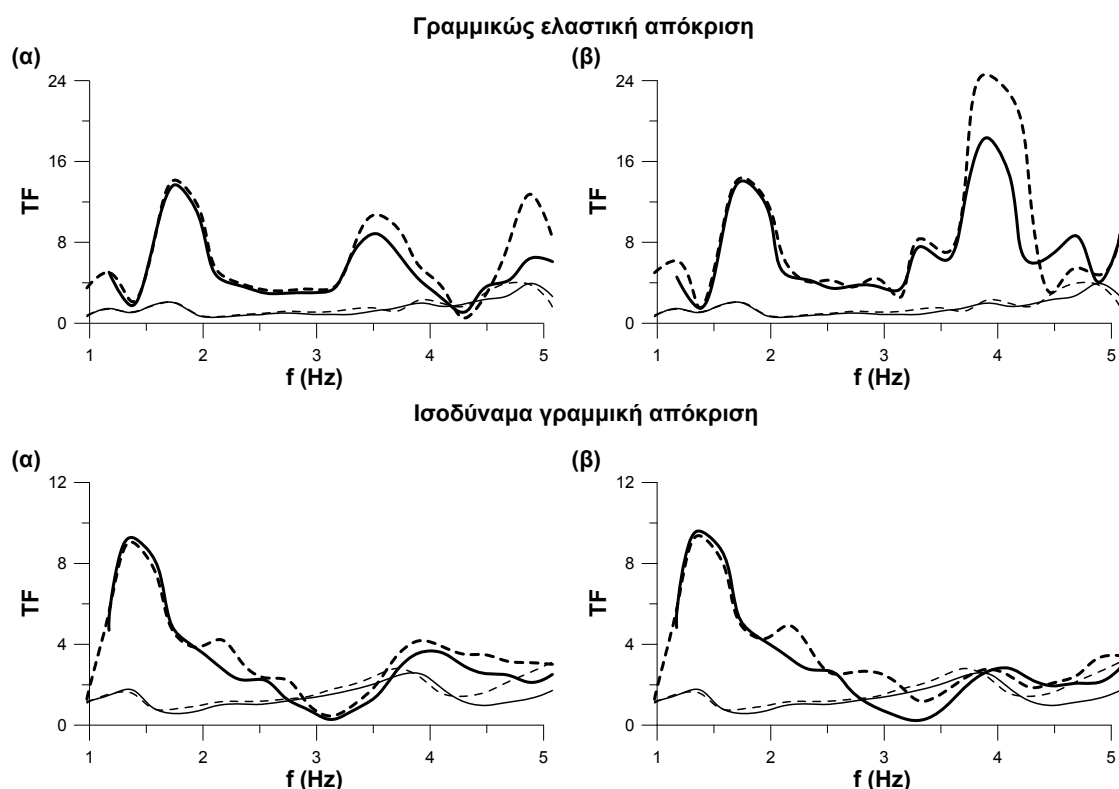


**Σχήμα 4.32.** Συναρτήσεις μεταφοράς (α) στην αιχμή του προσομοιώματος, και (β) στη θέση του άξονα συμμετρίας για τα προσομοιώματα B1 και B2, για την εδαφική στρώση που υπόκειται του προσομοιώματος B1 και του B2. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται για γραμμικώς ελαστική απόκριση και ισοδύναμα γραμμική απόκριση για την επιβολή παλμού Ricker.

Προκειμένου να εξεταστεί η επίδραση του ύψους της εδαφικής στρώσης στη δυναμική απόκριση του συστήματος, επιλέγεται κατάλληλος συνδυασμός ταχύτητας διάδοσης του διατμητικού κύματος και ύψους της εδαφικής στρώσης ώστε η ιδιοσυχνότητα της εδαφικής στρώσης στο ελεύθερο πεδίο να παραμένει σταθερή. Στο Σχήμα 4.33 φαίνονται οι συναρτήσεις μεταφοράς των δύο προσομοιωμάτων (B1 και B3) για γραμμικώς ελαστική και ισοδύναμα γραμμική απόκριση. Στην περίπτωση της ελαστικής απόκρισης παρατηρείται ταύτιση των ιδιοσυχνοτήτων του συστήματος και εν γένει συμφωνία και στο μέγεθος της ενίσχυσης της σεισμικής κίνησης. Όμως, για το

πεδίο συχνοτήτων περί την ιδιοσυχνότητα της εδαφικής στρώσης (4Hz), η ενίσχυση λαμβάνει μεγαλύτερες τιμές για μεγαλύτερο ύψος της εδαφικής στρώσης (προσομοίωμα B1).

Αντίστοιχη ομοιότητα παρατηρείται και στις συναρτήσεις μεταφοράς που υπολογίστηκαν για την επιβολή παλμού Ricker με μέγιστη επιτάχυνση 0.36g. Ελάχιστη μεγαλύτερη είναι η ενίσχυση που αναπτύσσεται για συχνότητες μεγαλύτερες της ιδιοσυχνότητας του συστήματος για το προσομοίωμα B1. Η συμπεριφορά αυτή αποτελεί ένδειξη ότι τα κύρια συχνотικά χαρακτηριστικά της απόκρισης του συστήματος Χ.Υ.Τ.Α. – εδάφους θεμελίωσης επηρεάζονται κυρίως από την ιδιοπερίοδο του εδάφους θεμελίωσης στο ελεύθερο πεδίο, και όχι από τα επιμέρους χαρακτηριστικά του (ταχύτητα διάδοσης, πάχος εδάφους θεμελίωσης). Επιπροσθέτως, η μεγαλύτερη ταχύτητα διάδοσης του διατμητικού κύματος σχετίζεται με μεγαλύτερα επίπεδα ενίσχυσης της σεισμικής κίνησης στο πεδίο των συχνοτήτων τόσο για ελαστική, όσο και για ισοδύναμα γραμμική συμπεριφορά.



**Σχήμα 4.33.** Συναρτήσεις μεταφοράς: (α) στην αιχμή του προσομοιώματος και (β) στη θέση του άξονα συμμετρίας για τα προσομοιώματα B1 και B3, και την εδαφική στρώση που υπόκειται των προσομοιωμάτων B1 και B3. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται για γραμμικώς ελαστική απόκριση και ισοδύναμα γραμμική απόκριση για την επιβολή παλμού Ricker.

## 4.6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο παρόν Κεφάλαιο εξετάστηκαν τα αποτελέσματα μίας εκτενούς παραμετρικής διερεύνησης, η οποία εμπεριείχε διδιάστατες και μονοδιάστατες αριθμητικές εν χρόνω αναλύσεις και από ιδιομορφικές αναλύσεις για χαρακτηριστικά προσομοιώματα Χ.Υ.Τ.Α., εφαρμόζοντας τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Σκοπός των αριθμητικών αναλύσεων ήταν η μελέτη της δυναμικής απόκρισης των Χ.Υ.Τ.Α., προσδιορίζοντας παράλληλα και το ρόλο των επιμέρους παραμέτρων που επηρεάζουν το συγκεκριμένο πρόβλημα.

Όσον αφορά στην ενίσχυση της σεισμικής κίνησης διαπιστώθηκε ότι η κατανομή των μέγιστων τιμών της, όταν συσχετίζεται με τον λόγο της ισοδύναμα γραμμικής περιόδου της κατασκευής προς την περίοδο της διέγερσης, διατηρεί τα χαρακτηριστικά ενός φάσματος απόκρισης. Αν και η ανάλυση της δυναμικής απόκρισης των προσομοιωμάτων που εξετάστηκαν κατέδειξε ότι, η ενίσχυση της σεισμικής κίνησης καθορίζεται από τα επιμέρους γεωμετρικά χαρακτηριστικά της κάθε περίπτωσης, αντίστοιχη διαφοροποίηση δεν εντοπίστηκε κατά την προαναφερθείσα κανονικοποίηση. Αντιθέτως, ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο στις υπολογισθείσες τιμές της οριζόντιας επιτάχυνσης φαίνεται ότι παίζει η επιλογή της μη γραμμικής συσχέτισης που χαρακτηρίζει το απορριμματικό υλικό.

Επίσης αποδείχτηκε ότι, λόγω των επιφανειακών ή μη ανωμαλιών που μπορεί να σχετίζονται με τη διαμόρφωση της απόθεσης του απορριμματικού όγκου, αναπτύσσεται κατακόρυφη «παρασιτική» συνιστώσα της επιτάχυνσης κατά την διάδοση κατακόρυφων διατμητικών κυμάτων. Ιδιαίτερα ισχυρή είναι αυτή η συνιστώσα της σεισμικής κίνησης για την περίπτωση Χ.Υ.Τ.Α. πλευρικής απόθεσης, λαμβάνοντας τιμές έως και ίσες της μέγιστης επιβαλλόμενης επιτάχυνσης. Αντιθέτως, για τους υπέργειους Χ.Υ.Τ.Α. η κατακόρυφη επιτάχυνση φτάνει μόλις κατά μέγιστο σε ποσοστό 40% της μέγιστης επιβαλλόμενης επιτάχυνσης. Λόγω της έντονης συσχέτισης της παραμέτρου με τα σύνθετα φαινόμενα κυματικής διάδοσης που παρουσιάστηκαν κατά την ανάλυση της δυναμικής απόκρισης των Χ.Υ.Τ.Α., δεν κατέστη εφικτή η ικανοποιητική συσχέτισή της κατακόρυφης επιτάχυνσης με τον λόγο της ισοδύναμα γραμμικής περιόδου της κατασκευής προς την περίοδο της διέγερσης.

Ένα επιπλέον μείζον θέμα της δυναμικής απόκρισης των Χ.Υ.Τ.Α. είναι η ακρίβεια των μονοδιάστατων αναλύσεων σε σύγκριση με τις αντίστοιχες διδιάστατες πιο

λεπτομερείς αναλύσεις. Η έντονη επίδραση του συχνοτικού περιεχομένου της επιβαλλόμενης κίνησης σε συνδυασμό με τις ιδιαιτερότητες της δυναμικής απόκρισης ανάλογα με τα γεωμετρικά στοιχεία του Χ.Υ.Τ.Α., συντελούν στην έντονη διασπορά του λόγου της μέγιστης επιτάχυνσης από διδιάστατες αναλύσεις προς την αντίστοιχη από μονοδιάστατες. Πιο συγκεκριμένα, οι μονοδιάστατες αναλύσεις υποεκτιμούν την αναπτυσσόμενη επιτάχυνση από 20% έως 50%.

Τέλος, η δυναμική αλληλεπίδραση εδάφους-κατασκευής αποδείχτηκε αρκετά σύνθετο φαινόμενο, το οποίο εξαρτάται από τις τοπικές εδαφικές συνθήκες και ειδικά από την ιδιοσυχνότητα των υποκείμενων εδαφικών στρώσεων. Για τον λόγο αυτό δεν θα πρέπει να λαμβάνεται απλουστευτικά υπόψη καθώς η ευεργετική ή μη δράση της εν λόγω αλληλεπίδρασης δεν μπορεί να λαμβάνεται ως δεδομένη εκ των προτέρων.

#### 4.7 ΑΝΑΦΟΡΕΣ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

- ABAQUS, (2004) "Analysis User's Manual Version 6.4", ABAQUS Inc., USA.
- Ambraseys, N.N., (1960) "On the shear response of a two-dimensional truncated wedge subjected to an arbitrary disturbance", Bulletin of Seismological Society of America, 50(1), 45-56.
- Assimaki, D., Kausel, E., and Gazetas, G., (2005) "Wave propagation and soil-structure interaction on a cliff crest during the Athens 1999 earthquake", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 25, 513-527.
- Athanasopoulos, D.A., Pelekis, P.C., and Leonidou, E.A., (1999) "Effects of surface topography on seismic ground response in the Egion (Greece) 15 June 1995 earthquake", Soil Dynamics and Earthquake Engineering 18, 135-149.
- Borcherdt, R.D., (1970) "Effects of local geology on ground motion near San Francisco Bay", Bulletin of Seismological Society of America, 60, 29-61.
- Bouckovalas, G.D., and Papadimitriou, A.G., (2005) "Numerical evaluation of slope topography effects on seismic ground motion", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 25, 547-558.
- Bray, J.D., and Repetto, P.C., (1994) "Seismic design considerations for lined solid waste landfills", Geotextiles and Geomembranes, 13, 497 - 518.
- Celebi, M., (1991) "Topographical and geological amplification: Case studies and engineering implications", Structural Safety, 10, 199 - 217.
- Gazetas, G., (1987) "Seismic response of earth dams: some recent developments", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 6(1), 3-47.
- Gazetas, G., Kallou, P.V., and Psarropoulos, P.N., (2002) "Topography and soil effects in the MS 5.9 Parnitha (Athens) earthquake: the case of Adames", Natural Hazards, 27, 133-169.
- Hudson, M., Idriss, I.M., and Beikae, M., (1994) "User's Manual for QUAD4M", Center for Geotechnical Modeling, Department of Civil and Environmental Engineering, University of California, Davis, CA, USA.



- Idriss, I.M., Fiegel, G., Hudson, M.B., Mundy, P.K., and Herzig, R., (1995) "Seismic response of the Operating Industries Landfill", in *Earthquake Design and Performance of Solid Waste Landfills-Geotechnical special publication No.54*, ed. M.K. Yegian and W.D.L. Finn (American Society of Civil Engineers, New York), 83-118.
- Ishihara, K., (1996) "Soil behaviour in Earthquake Geotechnics", Oxford Science Publications, pp. 16-39.
- Kawase, H., (1993) "Effects of surface and subsurface irregularities", in *Earthquake motion and ground conditions, in commemoration of the 20<sup>th</sup> anniversary of the research subcommittee on earthquake motion* (Architectural Institute of Japan), 118 - 129.
- Kramer, S.L., (1996) "Geotechnical Earthquake Engineering", Prentice-Hall, New Jersey.
- Rathje, E.M., and Bray, J.D., (2001) "One- and two-dimensional seismic analysis of solid-waste landfills", *Canadian Geotechnical Journal*, 38, 850-862.
- Sanchez- Sesma, F.J., (1990) "Elementary solutions for response of a wedge shaped medium to incident SH and SV waves", *Bulletin of Seismological Society of America* 80(3), 737-742.
- Sanchez-Sesma, F.J., and Campillo, M., (1993) "Topographic effects for incident P, SV and Rayleigh waves", *Tectonophysics*, 218, 113 - 125.
- Schnabel, P., Lysmer, J., and Seed, H.B., (1972) "SHAKE: A computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites", Report No. EERC 72-2, Earthquake Engineering Research Centre, University of California at Berkeley.
- Sharma, H., and Lewis, S.P., (1994) "Waste containment systems, waste stabilization and landfills: design and evaluation", John Wiley & Sons, Inc., USA.
- Singh, S. and Murphy, B., (1990) "Evaluation of the Stability of Sanitary Landfills", in *Geotechnics of Waste Fills - Theory and Practice*, eds. A. Landya and G.D. Knowles (Philadelphia: American Society for Testing and Materials), 240-258.
- Towahata, I., (2007) "Geotechnical Earthquake Engineering", Springer- Verlag, Berlin, Heidelberg.
- Zekkos, D.P., (2005) "Evaluation of static and dynamic properties of municipal solid waste", Dissertation, Doctor of Philosophy, Department of Civil and Environmental Engineering, University of California, Berkeley, California, USA.



### Σεισμική ευστάθεια πρανών Χ.Υ.Τ.Α.: Απλοποιητικές μεθοδολογίες

#### 5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η εκτίμηση της σεισμικής ευστάθειας αποτελεί καίριο τμήμα του αντισεισμικού σχεδιασμού των Χ.Υ.Τ.Α., για την υλοποίηση της οποίας εφαρμόζονται οι μεθοδολογίες υπολογισμού της σεισμικής ευστάθειας εδαφικών πρανών. Οι εν λόγω τεχνικές διακρίνονται στις εξής τρεις βασικές κατηγορίες: (α) ψευδοστατική μέθοδος, (β) μέθοδος των μονίμων παραμορφώσεων, και (γ) μέθοδος τάσεων-παραμορφώσεων.

Η ψευδοστατική μέθοδος είναι η πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη, αλλά και η πιο απλουστευτική από τις υπόλοιπες. Βασική αρχή κάθε ψευδοστατικής μεθόδου είναι ότι, η επίδραση της δυναμικής φόρτισης περιορίζεται στην ανάπτυξη της αδρανειακής φόρτισης που προκαλείται κατά την επιβολή σταθερής τιμής της οριζόντιας και κατακόρυφης επιτάχυνσης στο εδαφικό πρανές. Η παραδοχή αυτή συνεπάγεται την άμεση εφαρμογή της ψευδοστατικής μεθόδου σε οποιαδήποτε εκ των μεθόδων εκτίμησης ευστάθειας πρανών υπό στατική φόρτιση, καταλήγοντας στον προσδιορισμό της ευστάθειας σε όρους συντελεστή ασφαλείας. Εναλλακτικά έχει προταθεί αντί του συντελεστή ασφαλείας και η χρήση της κρίσιμης επιτάχυνσης ( $k_y$ ), η οποία ορίζεται ως η τιμή της επιτάχυνσης για την οποία ο συντελεστής ασφαλείας ισούται με τη μονάδα, ως αντιπροσωπευτικό μέτρο εκτίμησης της ευστάθειας (Sarma, 1974).

Είναι φανερό ότι, η ακρίβεια της ψευδοστατικής μεθόδου σχετίζεται άμεσα με την τιμή της κατακόρυφης και οριζόντιας συνιστώσας του σεισμικού συντελεστή που εφαρμόζεται επί του βάρους της εδαφικής μάζας της οποίας η ευστάθεια εξετάζεται. Η ομοιόμορφα εφαρμοζόμενη αδρανειακή δύναμη για την εκτέλεση της ψευδοστατικής ανάλυσης συντελεί στη συντηρητική εκτίμηση της ευστάθειας, ειδικά αν επιλεγεί η

μέγιστη τιμή της αναπτυσσόμενης εδαφικής επιτάχυνσης ως σεισμικός συντελεστής. Για το λόγο αυτό στη βιβλιογραφία έχουν προταθεί διάφορες εκδοχές οι οποίες αποσκοπούν στο να ενσωματώσουν στην υιοθετούμενη τιμή του σεισμικού συντελεστή τις ακόλουθες ιδιότητες:

- τη χωρική μεταβλητότητα της μέγιστης επιτάχυνσης, η οποία οφείλεται στην ευκαμψία της εδαφικής μάζας, αλλά και σε φαινόμενα τοπογραφικής ενίσχυσης που αναπτύσσονται λόγω των σύνθετων φαινομένων κυματικής διάδοσης πλησίον των εδαφικών πρανών,
- τη χρονική μεταβλητότητα της επιτάχυνσης, δηλαδή την μη ταυτόχρονη ανάπτυξη των μέγιστων τιμών της παραμέτρου εντός της εδαφικής μάζας, αλλά την στιγμιαία εφαρμογή την μέγιστης τιμής της επιτάχυνσης.

Για παράδειγμα, αναφέρεται ενδεικτικά ότι, οι προτάσεις του Seed (1979) για την εφαρμογή της ψευδοστατικής μεθόδου οδηγούν σε σεισμικό συντελεστή ίσο με 0.1 και 0.15 για σεισμικά γεγονότα μεγέθους 6.5 και 8.25 αντίστοιχα, θεωρώντας ότι οι αναπτυσσόμενες παραμορφώσεις που σχετίζονται με αυτές τις τιμές είναι ικανοποιητικές για τον ασφαλή σχεδιασμό πρανών γεωφραγμάτων. Όμως οι προτεινόμενοι συντελεστές αφενός συνδέονται με μετακινήσεις της τάξης του 1m ή και μεγαλύτερες, οι οποίες δεν μπορούν να θεωρηθούν ασφαλείς για έργα όπως οι Χ.Υ.Τ.Α. ή τα φράγματα, αφετέρου δεν λαμβάνουν υπόψη σημαντικές παραμέτρους που επηρεάζουν την ευστάθεια. Υπό αυτό το πρίσμα στις οδηγίες εκτίμησης σεισμικών κινδύνων της Καλιφόρνια (California Geological Survey, 2008), οι οποίες συμπεριλαμβάνουν και τις περιπτώσεις κατολισθήσεων, προτείνεται η μεθοδολογία των Stewart et al. (2003) η οποία συνεκτιμά στον προτεινόμενο σεισμικό συντελεστή τη μέγιστη επιτάχυνση στο βραχώδες υπόβαθρο, την απόσταση από τη σεισμική πηγή και την αποδεκτή μετακίνηση. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι ο σεισμικός συντελεστής ισούται περίπου με ποσοστό 45-50% της μέγιστης επιτάχυνσης στο βραχώδες υπόβαθρο όταν η αποδεκτή μετακίνηση είναι της τάξης των 5cm.

Η μέθοδος των μονίμων παραμορφώσεων καλύπτει την περίπτωση όπου είναι δυνατή η ανάπτυξη σεισμικών μετακινήσεων κατά μήκος της επιφάνειας αστοχίας καλύπτει. Σύμφωνα με την οποία αναπτύσσονται μόνιμες παραμορφώσεις όταν το μέγεθος των επιβαλλόμενων επιταχύνσεων προκαλεί την ανάπτυξη διατμητικών τάσεων οι οποίες υπερβαίνουν τη διατμητική αντοχή του εδάφους. Ο υπολογισμός των σεισμικών μετακινήσεων βασίζεται στο προσομοίωμα που προτάθηκε από τον Newmark

(1965) το οποίο όμως σχετίζεται με απλοποιητικές παραδοχές οι οποίες θα παρουσιαστούν στην συνέχεια.

Ακριβέστερη όλων θεωρείται η μέθοδος τάσεων-παραμορφώσεων. Η εφαρμογή της μεθόδου αυτής βασίζεται στην αριθμητική προσομοίωση (με πεπερασμένα στοιχεία ή πεπερασμένες διαφορές) της σεισμικής απόκρισης του εδαφικού/απορριμματικού πρανούς λαμβάνοντας ταυτόχρονα υπόψη και τη μη γραμμική συμπεριφορά του εδαφικού/απορριμματικού υλικού μέσω κατάλληλων καταστατικών προσομοιωμάτων. Το σημαντικό μειονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι ότι η πληθώρα των απαιτούμενων παραμέτρων για την εφαρμογή ενός ρεαλιστικού και αξιόπιστου καταστατικού προσομοιώματος την καθιστά δύσκολη. Ειδικά για την περίπτωση των Χ.Υ.Τ.Α., όπου το απορριμματικό υλικό χαρακτηρίζεται από πολλές αβεβαιότητες και οι παράμετροι της μηχανικής αντοχής του από μεγάλη διασπορά, η μέθοδος αυτή είναι πρακτικώς ανεφάρμοστη. Για τον λόγο αυτό θα δοθεί έμφαση στο παρόν κεφάλαιο στη μέθοδο των μονίμων παραμορφώσεων. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα βασικότερα αποτελέσματα της ερευνητικής δραστηριότητας που έχει αναπτυχθεί για την εν λόγω μέθοδο.

### 5.1.1 Μέθοδος μονίμων παραμορφώσεων

Η μέθοδος μονίμων παραμορφώσεων βασίζεται σε ένα απλό προσομοίωμα που προτάθηκε από τον Newmark (1965). Σύμφωνα με το προσομοίωμα αυτό, η ανάπτυξη των σεισμικών παραμορφώσεων κατά μήκος της επιφάνειας αστοχίας είναι ανάλογη προς αυτήν των μετακινήσεων που προκαλούνται καθώς ένα άκαμπτο σώμα ολισθαίνει επί ενός κεκλιμένου επιπέδου έπειτα από την επιβολή μίας σεισμικής κίνησης. Οι σεισμικές μετακινήσεις αναπτύσσονται όταν οι αδρανειακές δυνάμεις του άκαμπτου σώματος υπερβαίνουν τη διατμητική αντοχή της διεπιφάνειας και υπολογίζονται έπειτα από διπλή ολοκλήρωση της σχετικής επιτάχυνσης. Ως σχετική επιτάχυνση ορίζεται η διαφορά της επιβαλλόμενης επιτάχυνσης από την κρίσιμη επιτάχυνση ( $k_y$ ), δηλαδή την τιμή της επιτάχυνσης που αντιστοιχεί σε συντελεστή ασφαλείας ίσο με τη μονάδα.

Είναι φανερό ότι το προσομοίωμα αυτό έχει βασιστεί σε ένα σύνολο παραδοχών που περιορίζουν την ακρίβειά του. Οι αρχικές παραδοχές του προσομοιώματος είναι:

- η επιφάνεια αστοχίας (ολίσθησης) είναι επίπεδη,
- η εδαφική μάζα που ολισθαίνει είναι απολύτως άκαμπτη,
- η σεισμική κίνηση είναι μόνο οριζόντια, και
- η σχέση τάσεων-παραμορφώσεων είναι απολύτως πλαστική.

Η ερευνητική δραστηριότητα που αναπτύχθηκε με βάση τη μέθοδο Newmark είναι ακόμη και σήμερα αρκετά έντονη και δεν περιορίστηκε στον έλεγχο και τη διερεύνηση της εξάλειψης των δεσμευτικών παραδοχών αλλά επεκτάθηκε και σε σχέσεις πρόβλεψης που θα μπορούσαν να αποτελέσουν σημαντικά εργαλεία σχεδιασμού στο πεδίο της σεισμικής μηχανικής. Τα είδη των προτεινόμενων σχέσεων πρόβλεψης είναι:

- αναλυτικές σχέσεις που προέκυψαν από την επίλυση των διαφορικών εξισώσεων για τετραγωνικό παλμό (Newmark, 1965), για τετραγωνικό, τριγωνικό και ημιτονικό παλμό (Sarma, 1975),
- σχέσεις που προέκυψαν από έπειτα από πιθανολογική επεξεργασία αριθμητικών δεδομένων (Lin and Whitman, 1986, Yegian et al., 1991, Ambraseys and Menu, 1988, Sarma and Kourkoulis, 2004 και Saygili and Rathje, 2008), και
- σχέσεις εξασθένισης (Ambraseys and Srbulov, 1994).

Οι περισσότερες εκ των προτεινόμενων σχέσεων πρόβλεψης του μεγέθους των μόνιμων παραμορφώσεων χρησιμοποιούν ως παραμέτρους, εκτός από την κρίσιμη επιτάχυνση, είτε τη μέγιστη επιτάχυνση και ταχύτητα (Newmark, 1965 και Saygili and Rathje, 2008), είτε τη μέγιστη επιτάχυνση και τη δεσπόζουσα περίοδο της καταγραφής (Sarma, 1975, και Yegian et al., 1991). Πιο συγκεκριμένα, το αδιαστατοποιημένο μέγεθος που προτείνουν οι Yegian et al. (1991) προκύπτει από τη διαίρεση της μόνιμης παραμόρφωσης με το γινόμενο της μέγιστης επιτάχυνσης, και του τετραγώνου της δεσπόζουσας περιόδου.

Η διερεύνηση της επίδρασης των βασικών παραδοχών του προσομοιώματος επί των εκτιμώμενων σεισμικών μετακινήσεων έχει αποτελέσει πεδίο έντονου επιστημονικού ενδιαφέροντος. Για παράδειγμα, έχει εξεταστεί η επίδραση της μηχανικής συμπεριφοράς της ολισθαίνουσας διεπιφάνειας, καθώς οι Tika-Vassilikos et al., (1993) διερεύνησαν μέσω πειραματικής διαδικασίας την επίδραση της μετακίνησης αλλά και του ρυθμού των επιβαλλόμενων διατμητικών παραμορφώσεων στις αναπτυσσόμενες μετακινήσεις. Οι μόνιμες παραμορφώσεις προέκυψαν μικρότερες για την περίπτωση που λαμβάνεται υπόψη ο ταχύς ρυθμός επιβολής της φόρτισης.

Επίσης, μελετήθηκαν και εναλλακτικές περιπτώσεις γεωμετρίας του επιπέδου ολίσθησης (αστοχίας). Θεωρώντας περιστροφικό μηχανισμό αστοχίας προσδιορίστηκαν οι γωνιακές μόνιμες παραμορφώσεις σε εδαφικά πρηνή λόγω σεισμικής κίνησης (Sarma, 1981). Οι Ambraseys and Srbulov (1995) πρότειναν ένα προσομοίωμα αποτελούμενο

από δύο ολισθαίνοντα τεμάχια σε επαφή και διατύπωσαν αναλυτικές σχέσεις με τις οποίες υπολογίζονται οι μετασεισμικές μόνιμες παραμορφώσεις των δύο τεμαχίων λόγω απομείωσης της διατμητικής αντοχής της διεπιφάνειας.

Οι Yan et al. (1996) εξέτασαν την επίδραση της κατακόρυφης συνιστώσας της σεισμικής κίνησης, και κατέληξαν ότι μπορεί να συντελέσει είτε στην αύξηση είτε στην μείωση των αναπτυσσόμενων μόνιμων παραμορφώσεων. Η μη συμμετρική μορφή της κρίσιμης επιτάχυνσης για τις δύο πιθανές διευθύνσεις της ανάπτυξης της ολίσθησης (κατηφορική και ανηφορική) συνιστά ότι η διεύθυνση της σεισμικής κίνησης επιδρά στο υπολογιζόμενο μέγεθος των μόνιμων παραμορφώσεων. Η εν λόγω επίδραση βρέθηκε ότι είναι σημαντική (Kramer and Lindwall, 2004).

### **Τροποποιήσεις για την ευκαμψία της κατασκευής**

Από τις βασικές παραδοχές της μεθόδου υπολογισμού σεισμικών μετακινήσεων κατά Newmark (1965) είναι η θεώρηση της ολισθαίνουσας μάζας ως απολύτως άκαμπτης. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι η δυναμική απόκριση του πρανούς, του οποίου η σεισμική ευστάθεια εκτιμάται, δεν λαμβάνεται υπόψη στον υπολογισμό των σεισμικών μετακινήσεων. Όμως τα εδαφικά πρανή, είτε αφορούν επιχώματα είτε φράγματα, ουσιαστικά σχετίζονται με εύκαμπτα συστήματα τα οποία χαρακτηρίζονται από σχετικά μεγάλες ιδιοπεριόδους. Το γεγονός αυτό συνεπάγεται αφενός την περίπτωση ενίσχυσης της σεισμικής κίνησης αφετέρου την ασύγχρονη ταλάντωση της ολισθαίνουσας εδαφικής μάζας. Προκειμένου να ληφθούν τα φαινόμενα αυτά υπόψη στην εκτίμηση της σεισμικής ευστάθειας εδαφικών πρανών μέσω του υπολογισμού των σεισμικών μετακινήσεων, προτάθηκε από τους Makdisi and Seed (1978) μία ασύζευκτη μέθοδος.

Η μέθοδος αυτή ονομάζεται ασύζευκτη (decoupled) καθώς αποτελείται από δύο διαδοχικά βήματα, στο πρώτο εκ των οποίων εκτιμάται η δυναμική απόκριση της ολισθαίνουσας εδαφικής μάζας σε όρους μιας ισοδύναμης χρονοϊστορίας της επιτάχυνσης έπειτα από τον υπολογισμό της απόκρισης της συνολικής γεωκατασκευής (φυσικό πρανές, επίχωμα, φράγμα). Η χρονοϊστορία της ισοδύναμης οριζόντιας και κατακόρυφης επιτάχυνσης ορίζεται ως το ολοκλήρωμα των οριζόντιων και κατακόρυφων τάσεων, αντίστοιχα, κατά μήκος της επιφάνειας ολίσθησης διαιρεμένο με το βάρος της μάζας που ολισθαίνει. Στο επόμενο βήμα, με τη διπλή ολοκλήρωση της σχετικής επιτάχυνσης, η οποία ορίζεται ως η διαφορά της κρίσιμης επιτάχυνσης από την ισοδύναμη οριζόντια επιτάχυνση, προκύπτει η σεισμική μετακίνηση.

Για τη διατύπωση συζευγμένων μεθόδων (coupled), στις οποίες λαμβάνεται ταυτόχρονα υπόψη η δυναμική απόκριση της ολισθαίνουσας μάζας και η ανάπτυξη της σεισμικά συσσωρευόμενης ολίσθησης, το έναυσμα δόθηκε από την ανάλυση της σεισμικής απόκρισης συστημάτων σεισμικής μόνωσης με την ανάπτυξη δυνάμεων τριβής. Αρχικά οι Westermo and Udawadia (1983) και οι Mostaghel et al. (1983) εξέτασαν την δυναμική συμπεριφορά ενός συστήματος το οποίο αποτελούνταν από έναν μονοβάθμιο ταλαντωτή στη βάση του οποίου θεωρήθηκε ότι εφαρμόζεται μία άκαμπτη μάζα, ως θεμέλιο, και επιπλέον στην κατώτερη επιφάνεια του μπορεί να αναπτυχθεί ολίσθηση μέσω της πεπερασμένης διατμητικής αντοχής της. Στις εν λόγω εργασίες διατυπώθηκαν οι διαφορικές εξισώσεις ισορροπίας κατά την ολίσθηση, καθώς και οι αντίστοιχες για τη μη ολίσθηση, θεωρώντας την επιβολή αρμονικής φόρτισης ημιτονικής μορφής.

Πιο συγκεκριμένα, οι Westermo and Udawadia (1983) θεώρησαν την περίπτωση περιοδικής κίνησης η οποία αποτελείται από δύο διαδοχικές φάσεις ολίσθησης, ενώ για τον προσδιορισμό της συνθήκης ολίσθησης, δηλαδή της μέγιστης τιμής που μπορεί να λαμβάνει ο λόγος  $\tan\phi \cdot g / \alpha_{\max}$ , συνεκτίμησαν μόνο τη μόνιμη συνιστώσα της απόκρισης (steady state response). Επιπλέον, στην εργασία αυτή διαπιστώθηκε ότι η συνθήκη συντονισμού ( $T_{\text{str}}/T=1$ ) εξαρτάται από την τιμή του λόγου  $\tan\phi \cdot g / \alpha_{\max}$ , δηλαδή ο συντονισμός λαμβάνει χώρα για μεγαλύτερες τιμές του λόγου  $T_{\text{str}}/T$  όταν μειώνεται ο λόγος  $\tan\phi \cdot g / \alpha_{\max}$ . Ένα ακόμη βασικό συμπέρασμα της εργασίας αυτής είναι ότι λόγω της ευκαμψίας του συστήματος και των πολλών ιδιοσυχνοτήτων που παρουσιάζει είναι δυνατόν η απόκριση του ολισθαίνοντος μονοβάθμιου ταλαντωτή να είναι δυσμενέστερη της απόκρισης του μη ολισθαίνοντος συστήματος.

Από την άλλη πλευρά, οι Mostaghel et al. (1983) υπολόγισαν την απόκριση για διάφορες τιμές των κυριότερων εμπλεκόμενων παραμέτρων και από τα βασικότερα συμπεράσματά τους αποτελεί το γεγονός ότι η ολίσθηση (κανονικοποιημένη ως προς τη μέγιστη επιτάχυνση και το τετράγωνο της κυκλικής συχνότητας) αυξάνεται, είτε καθώς μειώνεται ο συντελεστής τριβής είτε για μεγάλες τιμές της μάζας που ταλαντώνεται προς τη μάζα της θεμελίωσης. Αντίθετη συμπεριφορά χαρακτηρίζει την απόκριση, δηλαδή τη μέγιστη επιτάχυνση, η οποία μειώνεται για μικρές τιμές του συντελεστή τριβής και για μεγάλες τιμές του λόγου μαζών. Πάντως πρέπει να σημειωθεί, ότι και οι δύο εργασίες συμφωνούν στο γεγονός ότι η μέγιστη απόκριση δεν περιορίζεται στην τιμή του συντελεστή τριβής όπως συμβαίνει για την ολίσθηση απολύτως άκαμπτου σώματος.



Εν συνεχεία, για το ίδιο απλό σύστημα σεισμικής μόνωσης οι Iura et al. (1992) προσδιόρισαν τις συνθήκες ανάπτυξης των τριών βασικών περιοδικών χαρακτηριστικών περιπτώσεων απόκρισης, θεωρώντας την επιβολή αρμονικών (ημιτονικών) κινήσεων. Οι τρεις περιοδικές περιπτώσεις απόκρισης διακρίνονται σε: (α) μη ολίσθηση, (β) συνεχής ολίσθηση και (γ) διαδοχικές εναλλαγές φάσεων μη ολίσθησης και ολίσθησης, ενώ οι συνθήκες ανάπτυξής τους υπολογίζονται από την κατανομή του λόγου  $\alpha_{\max}/\tan\phi \cdot g$  συναρτήσει του λόγου της κυκλικής συχνότητας της αρμονικής κίνησης προς την κυκλική ιδιοσυχνότητα του μονοβάθμιου ταλαντωτή. Από τα αποτελέσματα των αναλυτικών σχέσεων συνεπάγεται ότι, για την ανάπτυξη της δεύτερης περίπτωσης περιοδικής κίνησης απαιτούνται μεγάλες τιμές του λόγου  $\alpha_{\max}/\tan\phi \cdot g$ , δηλαδή πρακτικά μηδενικός συντελεστής τριβής και μεγάλες τιμές της μέγιστης επιτάχυνσης, ειδικά για μεγάλες τιμές του λόγου μαζών (μεγαλύτερο ποσοστό της μάζας που ταλαντώνεται).

Ένα αντίστοιχο απλό σύστημα, με τη διαφοροποίηση ότι δεν εφαρμόστηκε μάζα επί του επιπέδου ολίσθησης, χρησιμοποιήθηκε από τους Lin and Whitman (1983) για την ανάλυση της ευστάθειας βαθιών επιφανειών ολίσθησης εντός χωμάτινων φραγμάτων και την εκτίμηση της διαφοράς των εκτιμώμενων μετακινήσεων βάσει της ασύζευκτης και της συζευγμένης θεώρησης. Στα συμπεράσματα της διερεύνησης, τα οποία προέκυψαν κυρίως για ημιτονική φόρτιση και δευτερευόντως για τεχνητά σεισμικά επιταχυνσιογραφήματα, συμπεριλαμβάνεται ότι η ασύζευκτη μέθοδος σχετίζεται με συντηρητικά αποτελέσματα ειδικά για ιδιοσυχνότητες κοντά στο συντονισμό. Η υπερεκτίμηση των σεισμικών μετακινήσεων αποδείχτηκε ότι περιορίζεται καθώς αυξάνει η απόσβεση και η κρίσιμη επιτάχυνση, ενώ για επιφάνειες ολίσθησης μικρού βάθους (για τις οποίες διαμορφώθηκε διαφορετικό προσομοίωμα) οι δύο μέθοδοι δίνουν πρακτικά ταυτόσημα αποτελέσματα.

Πιο πρόσφατα, το προσομοίωμα που προτάθηκε από τους Westermo and Udawadia (1983) για την ανάλυση συστημάτων σεισμικής μόνωσης, τροποποιήθηκε από τους Kramer and Smith (1997) προκειμένου να λαμβάνεται υπόψη η κεκλιμένη επιφάνεια θεμελίωσης σε Χ.Υ.Τ.Α. Η νέα διατύπωση του προσομοιώματος επαληθεύθηκε έπειτα από τη σύγκριση των αριθμητικών αποτελεσμάτων και των αντιστοιχών που προέκυψαν από πειράματα μικρής κλίμακας. Σύμφωνα με τα αριθμητικά αποτελέσματα που υπολογίστηκαν για την επιβολή ημιτονικής φόρτισης, η ασύζευκτη μέθοδος σχετίζεται με πιο συντηρητικά αποτελέσματα εν συγκρίσει με τη συζευγμένη όταν ο

λόγος  $T_{str}/T$  είναι μικρότερος ή ίσος της μονάδας. Η συμπεριφορά αυτή ενισχύεται περαιτέρω για μεγαλύτερες τιμές του λόγου μάζας του προσομοιώματος και για μικρότερες τιμές της απόσβεσης.

Προκειμένου να ληφθεί υπόψη και η μη γραμμική συμπεριφορά του εδαφικού υλικού στην εκτίμηση των σεισμικών μετακινήσεων οι Rathje and Bray (2000), διατύπωσαν ένα νέο προσομοίωμα, ενσωματώνοντας τις διαφορικές εξισώσεις ισορροπίας κατά την ολίσθηση σε υφιστάμενο κώδικα υπολογισμού της μη γραμμικής μονοδιάστατης απόκρισης εδαφικού σχηματισμού. Η νέα μεθοδολογία διαπιστώθηκε ότι δίνει επαρκώς ακριβή αποτελέσματα, έπειτα από τη σύγκριση των υπολογισθέντων παραμενουσών μετακινήσεων με τις αντίστοιχες τιμές που προέκυψαν από πειράματα σε σεισμική τράπεζα μίας εύκαμπτης εδαφικής στρώσης επί κεκλιμένου επιπέδου. Στα ευρήματα της διερεύνησης συγκαταλέγονται τα ακόλουθα:

- το ολισθαίνον σύστημα αποκρίνεται στη διπλάσια ιδιοσυχνότητα από ότι το αντίστοιχο μη ολισθαίνον,
- η μέγιστη επιτάχυνση εντός της ολισθαίνουσας μάζας μπορεί να υπερβεί την τιμή της κρίσιμης επιτάχυνσης, ενώ ταυτόχρονα η ολίσθηση επιδρά και στο συχνοτικό περιεχόμενο της απόκρισης,
- για τιμές του λόγου  $T_{str}/T$  μικρότερες της μονάδας η μη γραμμικότητα που υπεισέρχεται λόγω της ολίσθησης είναι σημαντικότερη της μη γραμμικότητας του εδαφικού υλικού,
- η ασύζευκτη ανάλυση είναι σημαντικά πιο συντηρητική από την αντίστοιχη συζευγμένη για τιμές του λόγου  $T_{str}/T$  μικρότερες της μονάδας, όμως αυτή η συμπεριφορά δεν είναι τόσο έντονη για μικρότερες επιταχύνσεις,
- μη συντηρητικά αποτελέσματα μπορεί να προκύψουν από την ασύζευκτη ανάλυση για τιμές του λόγου  $T_{str}/T$  μεγαλύτερες της μονάδας και για μεγάλες τιμές του λόγου της κρίσιμης προς τη μέγιστη επιτάχυνση.

Τα τροποποιημένα προσομοιώματα που παρουσιάστηκαν μέχρι στιγμής αφορούσαν μονοβάθμια ή πολυβάθμια συστήματα τα οποία αποτελούνταν από συγκεντρωμένες μάζες, ελατήρια και αποσβεστήρες. Μία εναλλακτική προσέγγιση προτάθηκε από τους Chopra and Zhang (1991) με αφορμή τη σεισμική συμπεριφορά φραγμάτων βαρύτητας με δυνατότητα ανάπτυξης ολίσθησης επί του επιπέδου της θεμελίωσής τους. Στην εργασία αυτή προτείνεται μία λύση, η οποία βασίζεται στην φασματική απόκριση της κατασκευής λαμβάνοντας υπόψη μόνο την κύρια ιδιομορφή ταλάντωσης της

κατασκευής. Οι διαφορικές εξισώσεις ισορροπίας διατυπώθηκαν θεωρώντας κατανεμημένη μάζα και ακαμψία καθ' ύψος της διατομής του φράγματος. Τα αποτελέσματα αυτής της συζευγμένης μεθοδολογίας υπολογισμού σεισμικών μετακινήσεων, συγκρίθηκαν με τα αντίστοιχα της ασύζευκτης μεθόδου και διαπιστώθηκε ότι η ασύζευκτη μέθοδος μπορεί να καταλήξει σε μικρότερες σεισμικές μετακινήσεις για τιμές του λόγου της κρίσιμης προς τη μέγιστη επιτάχυνση μεγαλύτερες του 0.5. Οι Rathje and Bray (1999) τροποποίησαν το προσομοίωμα που προτάθηκε από τους Chopra and Zhang (1991) χρησιμοποιώντας την χαρακτηριστική ιδιομορφή της πρώτης ιδιοσυχνότητας μίας απειρομήκουσ εδαφικής στρώσης. Τα αποτελέσματα της μεθοδολογίας αυτής συμφωνούν με τις προαναφερθείσες παρατηρήσεις ότι η ασύζευκτη μέθοδος είναι συντηρητική για τιμές του λόγου  $T_{str}/T$  μικρότερες του δύο, ενώ ταυτόχρονα μπορεί να είναι μη συντηρητική για μεγάλες τιμές του λόγου της κρίσιμης προς τη μέγιστη επιτάχυνση.

## 5.2 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΚΥΚΛΙΚΩΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΩΝ ΟΛΙΣΘΗΣΗΣ

Εν γένει, η διαδικασία της εκτίμησης της ευστάθειας των απορριμματικών πρανών θα πρέπει να περιλαμβάνει την εξέταση της ευστάθειας των εξής τριών περιπτώσεων επιφανειών αστοχίας: (α) επιφάνειες αστοχίας μικρού βάθους οι οποίες εντοπίζονται είτε εξ ολοκλήρου εντός της απορριμματικής μάζας είτε κατά μήκος του συστήματος τελικής κάλυψης, (β) αστοχία κατά μήκος του σύνθετου συστήματος στεγάνωσης στον πυθμένα του Χ.Υ.Τ.Α., δηλαδή καθολικής μορφής, και (γ) σύνθετη επιφάνεια αστοχίας, ένα τμήμα της οποίας αναπτύσσεται εντός του απορριμματικού όγκου και ένα τμήμα της λαμβάνει χώρα εντός του σύνθετου συστήματος στεγάνωσης. Στην παρούσα διερεύνηση θα εξεταστούν επιφάνειες αστοχίας οι οποίες αναπτύσσονται πλήρως είτε εντός της απορριμματικής μάζας είτε εντός του σύνθετου συστήματος στεγάνωσης, θεωρώντας αυτές τις δύο ακραίες περιπτώσεις ως τις πιο αντιπροσωπευτικές. Παράλληλα, η εκτίμηση της ευστάθειας των εξεταζόμενων Χ.Υ.Τ.Α. θα γίνει με την εφαρμογή τόσο της ψευδοστατικής μεθόδου όσο και της μεθόδου των μονίμων παραμορφώσεων.

### 5.2.1 Περιγραφή και παραδοχές της μεθοδολογίας ανάλυσης

Αρχικά για την εκτίμηση της ευστάθειας θα πρέπει να προσδιοριστούν τα γεωμετρικά στοιχεία της κρίσιμης επιφάνειας αστοχίας, η οποία κείται πλήρως εντός της

απορριμματικής μάζας. Για τον σκοπό αυτό, αλλά και για τον υπολογισμό του ψευδοστατικού συντελεστή ασφαλείας, επιλέγεται η μέθοδος οριακής ισορροπίας και πιο συγκεκριμένα η μέθοδος λωρίδων κατά Bishop (1954). Η μέθοδος των λωρίδων αποτελεί την πλέον ευρέως διαδεδομένη μέθοδο ανάλυσης ευστάθειας πρανών και βασική προϋπόθεσή της είναι η εκ των προτέρων θεώρηση της γεωμετρίας της επιφάνειας αστοχίας, η οποία αποτελεί συνήθως τμήμα κυκλικού τόξου. Όμως η συγκεκριμένη μέθοδος στατικής επίλυσης του προβλήματος οδηγεί σε ένα αόριστο σύστημα επίλυσης γραμμικών εξισώσεων, με αποτέλεσμα να είναι αναγκαία η υιοθέτηση κάποιων ρεαλιστικών παραδοχών για την εύρεση του συντελεστή ασφαλείας, οι οποίες αφορούν κυρίως τις εσωτερικές δυνάμεις και τις χρησιμοποιούμενες εξισώσεις ισορροπίας.

Η μέθοδος λωρίδων όπως διατυπώθηκε αρχικά από τον Fellenius (1927) βασίζεται στην παραδοχή ότι οι εσωτερικές δυνάμεις είναι ίσες, παράλληλες και αντίθετες, ενώ η εξίσωση ισορροπίας των δυνάμεων υπολογίζεται για διεύθυνση κάθετη ως προς τη βάση της λωρίδας και ο συντελεστής ασφαλείας ισούται με τον λόγο της ροπής αντίστασης προς τη ροπή ανατροπής. Η απλοποιημένη μέθοδος Bishop (1954) χρησιμοποιεί την εξίσωση ισορροπίας των δυνάμεων στον κατακόρυφο άξονα και την ισορροπία ροπών ως προς το κέντρο του κύκλου που διαμορφώνει την επιφάνεια αστοχίας. Επιπλέον, έχουν διατυπωθεί κι άλλες τροποποιήσεις χρησιμοποιώντας όλες τις εξισώσεις ισορροπίας και θεωρώντας διαφορετικές παραδοχές για τις πλευρικές δυνάμεις (Fredlund et al., 1981). Σε μια συγκριτική παράθεση των υφιστάμενων μεθοδολογιών (Duncan, 1996) παρατηρείται ότι η απλοποιημένη μέθοδος Bishop (1954) δίνει επαρκώς ακριβή αποτελέσματα σε αντίθεση με την απλή μέθοδο των λωρίδων κατά Fellenius (1927).

Στην παρούσα εργασία η εφαρμογή της ψευδοστατικής μεθόδου πραγματοποιήθηκε μέσω της διαμόρφωσης της σχέσης του συντελεστή ασφαλείας σύμφωνα με την απλοποιημένη μέθοδο Bishop (1954), λαμβάνοντας υπόψη και τις δύο συνιστώσες της επιτάχυνσης (οριζόντια και κατακόρυφη). Η διαδικασία υπολογισμού του κρίσιμου συντελεστή ασφαλείας και της αντίστοιχης κυκλικής επιφάνειας αστοχίας υλοποιήθηκε στη γλώσσα προγραμματισμού FORTRAN.

Για τον υπολογισμό του συντελεστή ασφαλείας απαιτείται η εκτίμηση του σεισμικού συντελεστή. Οι δύο συνιστώσες του σεισμικού συντελεστή προκύπτουν έπειτα από

ολοκλήρωση κατά μήκος της επιφάνειας ολίσθησης της δυναμικής συνιστώσας της οριζόντιας και της κατακόρυφης δύναμης διαιρεμένης με το βάρος της επιφάνειας ολίσθησης. Στόχος αυτής της διαδικασίας είναι να ληφθούν υπόψη τα χαρακτηριστικά της απόκρισης, αλλά και να συνεκτιμηθεί η επίδραση των κυριότερων παραγόντων που όπως διαπιστώθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο δεσπόζουν στη δυναμική απόκριση των Χ.Υ.Τ.Α. Πιο συγκεκριμένα, οι σχέσεις που ορίζουν την οριζόντια και κατακόρυφη συνιστώσα της ισοδύναμης επιτάχυνσης (Horizontal Equivalent Acceleration, HEA, και Vertical Equivalent Acceleration, VEA), η μέγιστη τιμή της οποίας αποτελεί ουσιαστικά και τον εφαρμοζόμενο σεισμικό συντελεστή για την εύρεση του συντελεστή ασφαλείας, είναι οι εξής:

$$HEA = \frac{\sum \sigma_x d_y + \tau_{xy} d_x}{W} \quad (5.1)$$

$$VEA = \frac{\sum \sigma_y d_x + \tau_{xy} d_y}{W} \quad (5.2)$$

όπου  $W$  το συνολικό βάρος της επιφάνειας αστοχίας,  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  και  $\tau_{xy}$  η οριζόντια και κατακόρυφη συνιστώσα της δυναμικής τάσης και η δυναμική διατμητική τάση επί του κάθε στοιχείου κατά μήκος της επιφάνειας αστοχίας, αντίστοιχα. Τέλος με  $d_x$ ,  $d_y$  συμβολίζονται η οριζόντια και κατακόρυφη διάσταση του στοιχείου επί του οποίου υπολογίζονται οι δυναμικές τάσεις.

Για τις περιπτώσεις που ο συντελεστής ασφαλείας είναι μικρότερος της μονάδας υπολογίστηκαν και οι μόνιμες παραμορφώσεις με την εφαρμογή της ασύζευκτης μεθόδου. Όπως διαπιστώθηκε από τη σύντομη βιβλιογραφική ανασκόπηση που προηγήθηκε, η ασύζευκτη μέθοδος θεωρείται ότι είναι επαρκώς ακριβής για επιφάνειες αστοχίας που έχουν μικρό σχετικά βάθος. Επιπλέον, η δυναμική απόκριση πλησίον των πρανών των Χ.Υ.Τ.Α. θεωρείται ότι δεν δύναται να προσομοιωθεί ρεαλιστικά από τα απλά μονοβάθμια συστήματα που έχουν προταθεί στην βιβλιογραφία, βάσει των συμπερασμάτων που εξήχθησαν από τις αριθμητικές αναλύσεις του προηγούμενου κεφαλαίου. Για τον σκοπό αυτό υλοποιήθηκε κώδικας στη γλώσσα προγραμματισμού FORTRAN η διαδικασία ολοκλήρωσης της σχετικής επιτάχυνσης, η οποία ορίζεται ως η διαφορά της κρίσιμης επιτάχυνσης από την χρονοϊστορία της οριζόντιας ισοδύναμης επιτάχυνσης, υπολογίζοντας με αυτόν τον τρόπο την οριζόντια συνιστώσα της σεισμικής μετακίνησης.

Οι αναλύσεις ευστάθειας εκτελέστηκαν για τις εξεταζόμενες τυπικές διατομές του προηγούμενου Κεφαλαίου θεωρώντας δύο διαφορετικές περιπτώσεις κριτηρίων αστοχίας, δηλαδή: (α) συνοχή ίση με 15kPa και γωνία τριβής ίση με 34°, και (β) μηδενική συνοχή και γωνία τριβής ίση με 34°. Οι επιλεχθείσες περιβάλλουσες αστοχίας εμπίπτουν στο προτεινόμενο εύρος των αντίστοιχων περιβαλλουσών από δοκιμές άμεσης διάτμησης (βλ. Σχήμα 2.7). Καθώς και τα τρία προσομοιώματα χαρακτηρίζονται από το ίδιο ύψος και την ίδια κλίση πρανούς, η κρίσιμη κυκλική επιφάνεια αστοχίας ήταν κοινή. Για την κρίσιμη επιφάνεια αστοχίας υπολογίστηκαν οι χρονοϊστορίες της οριζόντιας και κατακόρυφης συνιστώσας της ισοδύναμης επιτάχυνσης, από τις αριθμητικές αναλύσεις της παραμετρικής διερεύνησης του 2<sup>ου</sup> Κεφαλαίου, συνεκτιμώντας με τον τρόπο αυτό τις εξής παραμέτρους:

- τα γεωμετρικά στοιχεία της τυπικής διατομής,
- την ταχύτητα διάδοσης του διατμητικού κύματος του απορριμματικού υλικού,
- τη μη γραμμική συμπεριφορά του απορριμματικού υλικού,
- τη μέγιστη επιτάχυνση της σεισμικής κίνησης,
- το συχνотικό περιεχόμενο της επιβαλλόμενης χρονοϊστορίας της επιτάχυνσης.

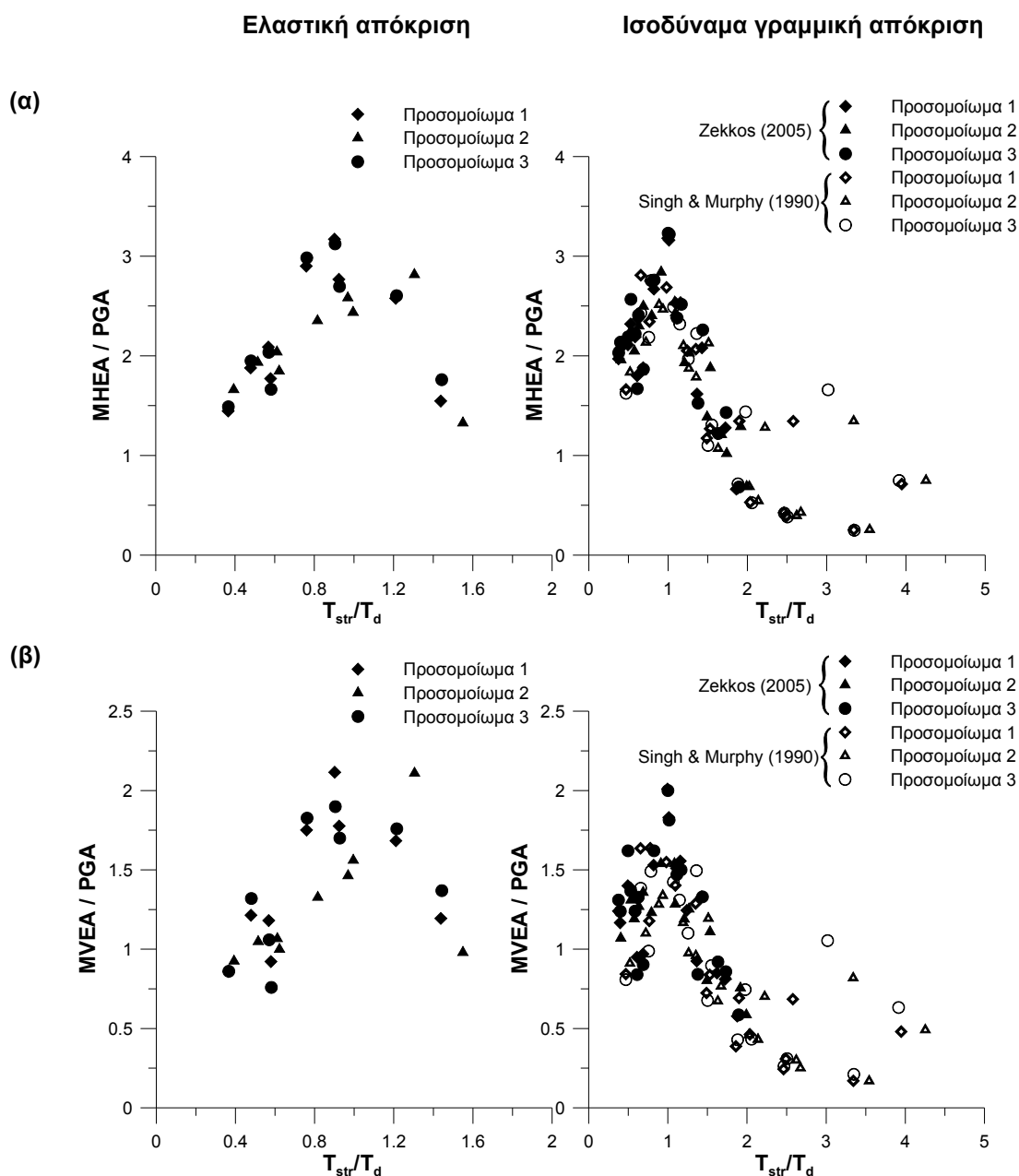
Για τις περιπτώσεις αυτές υπολογίστηκαν και οι συντελεστές ασφαλείας, η κρίσιμη τιμή της επιτάχυνσης, αλλά και οι παραμένουσες σεισμικές μετακινήσεις. Ακολούθως παρατίθενται τα αποτελέσματα της εκτίμησης της ευστάθειας των κρίσιμων κυκλικών επιφανειών αστοχίας.

## 5.2.2 Αποτελέσματα αναλύσεων σεισμικής ευστάθειας

### Ισοδύναμη Επιτάχυνση

Τα βασικά χαρακτηριστικά που διέπουν τη δυναμική απόκριση των Χ.Υ.Τ.Α. αναμένεται ότι θα δεσπόζουν και στη δυναμική ευστάθεια των απορριμματικών πρανών. Όσον αφορά στη δυναμική απόκριση, διαπιστώθηκε ο συσχετισμός της ενίσχυσης της σεισμικής κίνησης αφενός με τα χαρακτηριστικά της κατασκευής, δηλαδή την ιδιοπερίοδο της ( $T_{str}$ ), αφετέρου με τα χαρακτηριστικά της ίδιας της επιβαλλόμενης χρονοϊστορίας, δηλαδή τη δεσπόζουσα περίοδο ( $T_d$ ) και τη μέγιστη επιβαλλόμενη επιτάχυνση (PGA). Για τον λόγο αυτό διαμορφώνονται οι κατανομές του λόγου της μέγιστης οριζόντιας και κατακόρυφης συνιστώσας της ισοδύναμης επιτάχυνσης προς τη μέγιστη επιβαλλόμενη επιτάχυνση συναρτήσει του λόγου της ισοδύναμη γραμμικής

ιδιοπεριόδου προς τη δεσπόζουσα περίοδο της σεισμικής κίνησης ( $T_{str}/T_d$ ) (βλ. Σχήμα 5.1).



**Σχήμα 5.1.** Κατανομή του λόγου: (α) της μέγιστης οριζόντιας ισοδύναμης επιτάχυνσης προς την μέγιστη επιβαλλόμενη επιτάχυνση ( $MHEA/PGA$ ), και (β) της μέγιστης κατακόρυφης ισοδύναμης επιτάχυνσης προς τη μέγιστη επιβαλλόμενη επιτάχυνση ( $MVEA/PGA$ ), συναρτήσει του λόγου της ισοδύναμα γραμμικής ιδιοπεριόδου προς τη δεσπόζουσα περίοδο της σεισμικής κίνησης ( $T_{str}/T_d$ ). Τα αποτελέσματα παρατίθενται για ελαστική και ισοδύναμα γραμμική απόκριση με τις δύο εξεταζόμενες συσχετίσεις απομείωσης του μέτρου διάτμησης-αύξησης της απόσβεσης.

Η συσχέτιση αυτή παρουσιάζεται και για την περίπτωση της ελαστικής συμπεριφοράς του απορριμματικού υλικού, όπου διαπιστώνεται ότι για συνθήκες

συντονισμού η μέγιστη τιμή της οριζόντιας συνιστώσας της ισοδύναμης επιτάχυνσης μπορεί να λάβει τιμή έως τριπλάσια της μέγιστης επιβαλλόμενης επιτάχυνσης. Σε αντιπαράθεση με την ενίσχυση της οριζόντιας επιτάχυνσης που παρατηρήθηκε στην επιφάνεια των Χ.Υ.Τ.Α. (Σχήμα 4.25α), οι μέγιστες τιμές της ισοδύναμης επιτάχυνσης παρουσιάζονται μειωμένες έως περίπου 50%, ενώ η μέγιστη ισοδύναμη επιτάχυνση ταυτίζεται με τη μέγιστη οριζόντια επιτάχυνση στην επιφάνεια σε ελάχιστες περιπτώσεις. Για την περίπτωση της ισοδύναμη γραμμικής συμπεριφοράς του απορριμματικού υλικού εξετάστηκαν δύο ζεύγη καμπυλών απομείωσης του μέτρου διάτμησης-αύξησης της απόσβεσης, οι προτεινόμενες από τους Singh and Murphy (1990) και από τον Zekko (2005). Παρατηρείται ότι, η μέγιστη τιμή της οριζόντιας συνιστώσας της ισοδύναμης επιτάχυνσης μπορεί να λάβει τιμές ακόμη και τριπλάσιες της μέγιστης επιβαλλόμενης επιτάχυνσης, κατ' αντιστοιχία με την ελαστική συμπεριφορά, ειδικά όταν ο λόγος  $T_{str}/T_d$  κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 0.5 και 1.5. Αξιοσημείωτο είναι επίσης το γεγονός ότι, ενώ η μέγιστη ενίσχυση της οριζόντιας επιτάχυνσης φαίνεται να εξαρτάται από τη συσχέτιση της μη γραμμικής συμπεριφοράς του απορριμματικού υλικού (με τη δυσμενέστερη απόκριση να υπολογίζεται για την συσχέτιση που προτείνεται από τον Zekkos (2005)), η διαφορά αυτή εξαλείφεται στην περίπτωση της ισοδύναμης επιτάχυνσης (αντιπαράβολή Σχήματος 4.25α με 5.1α). Να σημειωθεί επίσης ότι, η μορφή της κατανομής προσεγγίζει τη μορφή ενός φάσματος με εξαίρεση κάποιες περιπτώσεις απόκρισης στην καταγραφή Shin-Kobe από τον σεισμό Hyogoken-Nanbu (Kobe, 1995). Η διαφοροποίηση αυτή αποδίδεται στο πλούσιο συχνотικό περιεχόμενο της συγκεκριμένης ιστορίας της επιτάχυνσης. Καθώς αυξάνεται ο λόγος  $T_{str}/T_d$  η μέγιστη τιμή της οριζόντιας συνιστώσας της ισοδύναμης επιτάχυνσης μειώνεται σημαντικά, ενώ λαμβάνει κατ' ελάχιστο τιμές που κυμαίνονται μεταξύ 50% και 25% της μέγιστης οριζόντια επιβαλλόμενης επιτάχυνσης.

Η κατακόρυφη συνιστώσα της ισοδύναμης επιτάχυνσης παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.1β αδιαστατοποιημένη ως προς τη μέγιστη επιβαλλόμενη επιτάχυνση συναρτήσει του λόγου  $T_{str}/T_d$ . Από τα αποτελέσματα των παραμετρικών αριθμητικών αναλύσεων παρατηρείται ότι για τιμές του λόγου  $T_{str}/T_d$  μεγαλύτερες του 1.5 η κανονικοποιημένη κατακόρυφη συνιστώσα της ισοδύναμης επιτάχυνσης λαμβάνει τιμές μικρότερες του 0.75. Αντιθέτως, στην περιοχή του συντονισμού η κατακόρυφη ισοδύναμη επιτάχυνση αυξάνει σημαντικά τόσο για την ελαστική όσο και για την ισοδύναμη γραμμική απόκριση, προσεγγίζοντας τιμές σχεδόν διπλάσιες της μέγιστης οριζόντιας



επιβαλλόμενης επιτάχυνσης. Η παρατήρηση αυτή δεν είναι συμβατή με τα υπολογισθέντα μεγέθη της παρασιτικής κατακόρυφης επιτάχυνσης στην επιφάνεια του εκάστοτε προσομοιώματος, η οποία κατ' εξαίρεση μόνο για το τρίτο προσομοίωμα (πλευρικός Χ.Υ.Τ.Α.) λαμβάνει τιμές μεγαλύτερες του 50% της μέγιστης οριζόντια επιβαλλόμενης επιτάχυνσης. Το φαινόμενο αυτό μπορεί να ερμηνευθεί μέσω των ακόλουθων παρατηρήσεων:

- μεγαλύτερες τιμές της παρασιτικής κατακόρυφης επιτάχυνσης αναπτύσσονται κατά μήκος του πρηνούς παρά στο κατάστρωμα του Χ.Υ.Τ.Α., ή/και
- λόγω της κυκλικής μορφής της επιφάνειας αστοχίας η εφαρμογή της σχέσης (5.2) συνεπάγεται την απόδοση στην κατακόρυφη ισοδύναμη επιτάχυνση ενός μέρους των αναπτυσσόμενων διατμητικών τάσεων.

Επίσης, δεν παρατηρείται ιδιαίτερα ισχυρή κατακόρυφη συνιστώσα της ισοδύναμης επιτάχυνσης του τρίτου προσομοιώματος εν συγκρίσει με τα άλλα δύο προσομοιώματα, όπως ίσχυε για την κατακόρυφη παρασιτική συνιστώσα της επιτάχυνσης (αντιπαραβολή Σχήματος 4.25β με 5.1β). Το γεγονός αυτό μπορεί να οφείλεται στο ότι οι μέγιστες τιμές της κατακόρυφης επιτάχυνσης στην επιφάνεια του πλευρικού Χ.Υ.Τ.Α. εντοπίζονται γενικά σε αρκετή απόσταση από τη θέση του κύκλου αστοχίας. Εν γένει, η μορφή της κατανομής της κατακόρυφης συνιστώσας είναι αντίστοιχη με αυτήν της κανονικοποιημένης οριζόντιας συνιστώσας της ισοδύναμης επιτάχυνσης, και μπορεί να συσχετιστεί με την μορφή ενός φάσματος. Πάντως η ισχυρή κατακόρυφη συνιστώσα της ισοδύναμης επιτάχυνσης αποτελεί ισχυρή ένδειξη ότι πιθανώς η συνεκτίμησή της επηρεάζει την εκτιμώμενη ευστάθεια ανεξαρτήτως της εφαρμοζόμενης μεθόδου ανάλυσης.

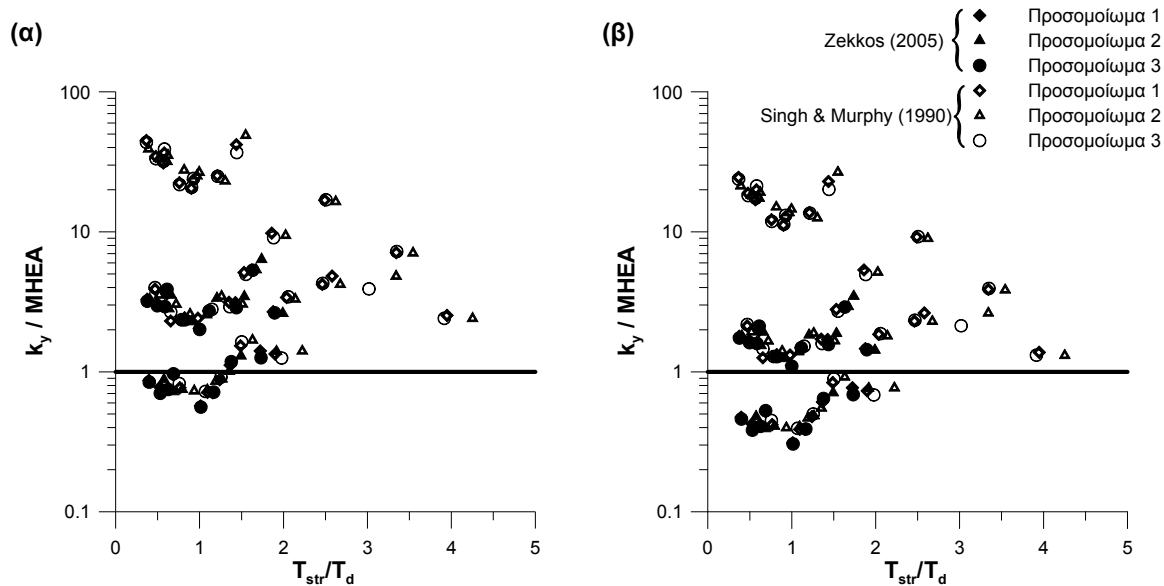
### **Συντελεστής ασφαλείας**

Η εξέταση της κατανομής της μέγιστης ισοδύναμης επιτάχυνσης σαφώς και δίνει την ευκαιρία της μελέτης της επίδρασης των επιμέρους παραγόντων που επηρεάζουν το μέγεθος της αναπτυσσόμενης αδρανειακής δύναμης στην εξεταζόμενη επιφάνεια αστοχίας, αλλά η ευστάθεια αποτελεί συνάρτηση και της διατμητικής αντοχής της διεπιφάνειας. Για τον λόγο αυτό ακολούθως εξετάζεται η ευστάθεια της κρίσιμης κυκλικής επιφάνειας αστοχίας σε όρους:

- λόγου της κρίσιμης προς τη μέγιστη οριζόντια ισοδύναμη επιτάχυνση ( $k_y/MHEA$ ), και

– συντελεστή ασφαλείας.

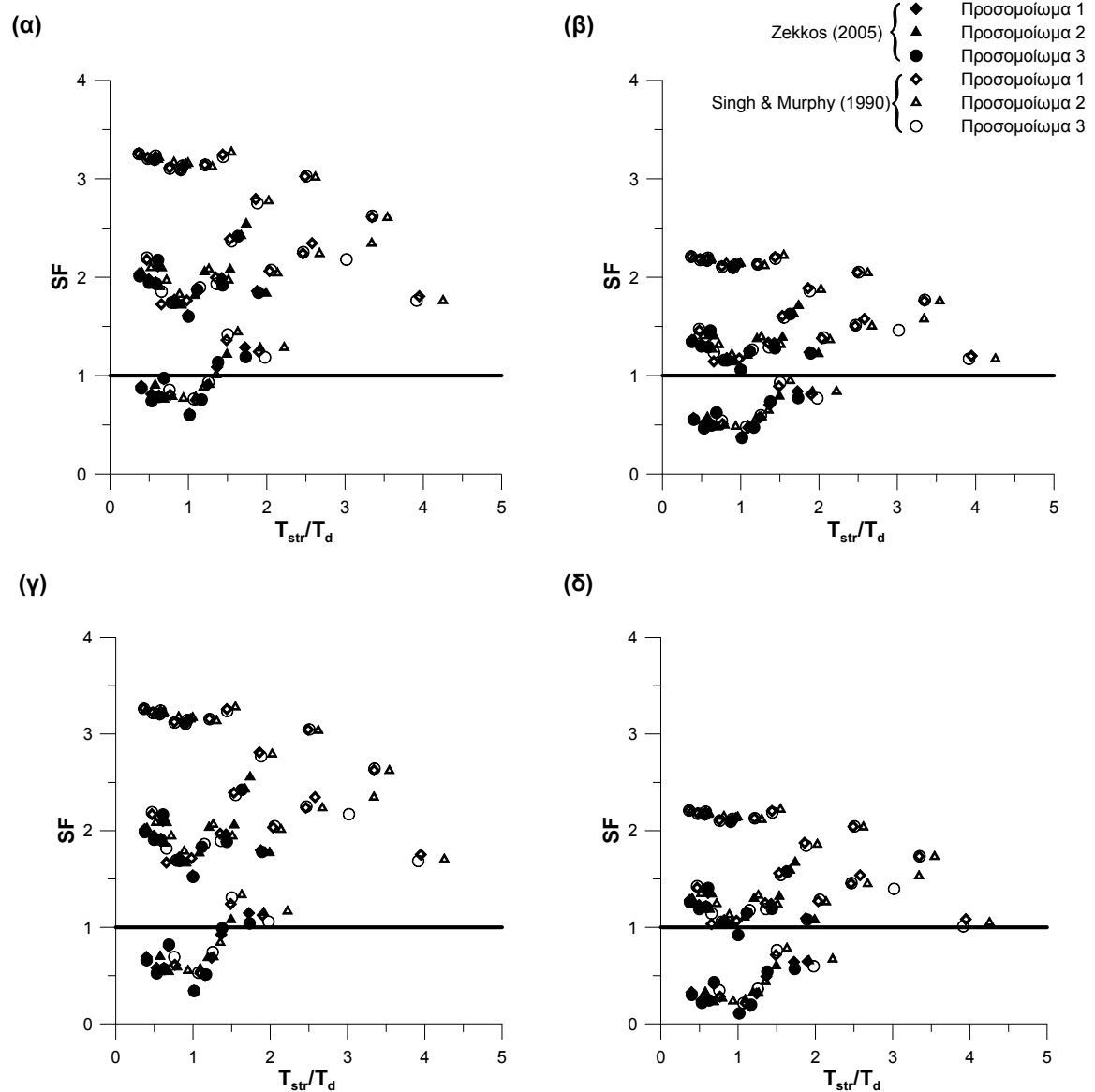
Η κρίσιμη επιτάχυνση προέκυψε ίση με 0.65g για την πρώτη εξεταζόμενη περιβάλλουσα (συνοχή ίση με 15kPa και γωνία τριβής ίση με 34°) και ίση με 0.35g για τη δεύτερη (μηδενική συνοχή και γωνία τριβής ίση με 34°). Στα Σχήματα 5.2α και 5.2β όπου παρατίθενται τα αποτελέσματα της πρώτης και δεύτερης περιβάλλουσας αντίστοιχα, οι πολύ μεγάλες τιμές του λόγου  $k_y/MHEA$  για τιμές του λόγου  $T_{str}/T_m$  μικρότερες του 2 αντιστοιχούν στην ελαστική απόκριση.



**Σχήμα 5.2.** Κατανομή του λόγου της κρίσιμης επιτάχυνσης προς τη μέγιστη οριζόντια ισοδύναμη επιτάχυνση ( $k_y/MHEA$ ) για τις δύο περιβάλλουσες αστοχίας: (α) συνοχή ίση με 15kPa και γωνία τριβής ίση με 34°, και (β) μηδενική συνοχή και γωνία τριβής ίση με 34°. Τα αποτελέσματα παρατίθενται για όλες τις αριθμητικές αναλύσεις της παραμετρικής διερεύνησης.

Ακολουθώς, καθώς αυξάνεται η μέγιστη επιβαλλόμενη επιτάχυνση σε 0.1g και 0.36g, η κατανομή μετατίθεται σε χαμηλότερες τιμές, λαμβάνοντας ακόμη και τιμές μικρότερες της μονάδας (εκδήλωση αστάθειας). Πιο συγκεκριμένα, η αύξηση του λόγου  $T_{str}/T_d$  σχετίζεται με την αύξηση του λόγου  $k_y/MHEA$  και συνεπώς με πιο ευσταθείς συνθήκες. Η μείωση της διατμητικής αντοχής του απορριμματικού υλικού (Σχήμα 5.2β) συντελεί στη γενικότερη μείωση του λόγου της κρίσιμης επιτάχυνσης προς την μέγιστη τιμή της οριζόντιας ισοδύναμης επιτάχυνσης. Επιπλέον παρατηρείται ότι, ενώ για την πρώτη περιβάλλουσα οι περιπτώσεις αστοχίας εντοπίζονται για μέγιστη επιβαλλόμενη επιτάχυνση ίση με 0.36g και τιμές του λόγου  $T_{str}/T_d$  μικρότερες του 1.5, για τη δεύτερη οι περιπτώσεις αστοχίας επεκτείνονται και σε μεγαλύτερες τιμές του λόγου  $T_{str}/T_d$  που φθάνουν να είναι περίπου ίσες με 2.5.

Τα αντίστοιχα συμπεράσματα μπορούν να εξαχθούν και από την κατανομή του συντελεστή ασφαλείας (Σχήματα 5.3α και 5.3β). Οι συντελεστές ασφαλείας της κρίσιμης επιφάνειας αστοχίας υπολογίστηκαν συνεκτιμώντας ταυτόχρονα και τη συμβολή της κατακόρυφης συνιστώσας της ισοδύναμης επιτάχυνσης.



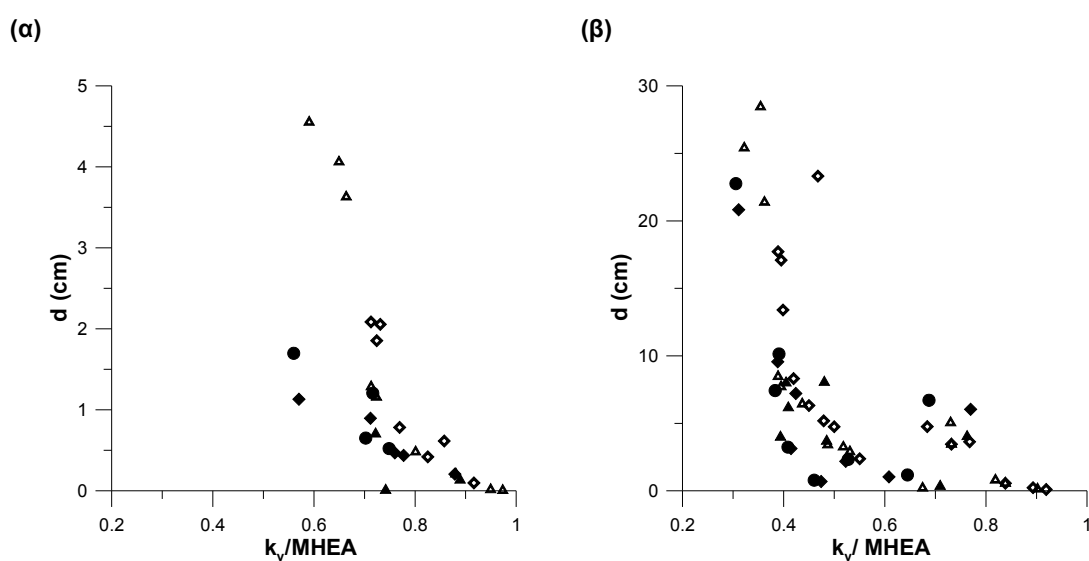
**Σχήμα 5.3.** Κατανομή του ψευδοστατικού συντελεστή ασφαλείας (SF) υπολογισμένου με χρήση της μέγιστης τιμής της οριζόντιας ισοδύναμης επιτάχυνσης ως σεισμικό συντελεστή για τις δύο περιβάλλουσες αστοχίας: (α) συνοχή ίση με 15kPa και γωνία τριβής ίση με 34°, και (β) μηδενική συνοχή και γωνία τριβής ίση με 34°. Εκτιμάται και η επίδραση της κατακόρυφης συνιστώσας της ισοδύναμης επιτάχυνσης αντιστοίχως για τις δύο περιβάλλουσες (γ και δ). Τα αποτελέσματα παρατίθενται για όλες τις αριθμητικές αναλύσεις της παραμετρικής διερεύνησης.

Συγκρίνοντας τα Σχήματα 5.3α με 5.3γ και 5.3β με 5.3δ, γίνεται αντιληπτό ότι οι συντελεστές ασφαλείας μειώνονται λόγω της κατακόρυφης συνιστώσας της ισοδύναμης

επιτάχυνσης. Η επίδραση αυτή μπορεί να μην είναι δραματική, αλλά σίγουρα μπορεί να συντελέσει στην πρόβλεψη αστοχίας σε περιπτώσεις, όπου αυτό δεν ήταν αναμενόμενο.

### Μετακινήσεις

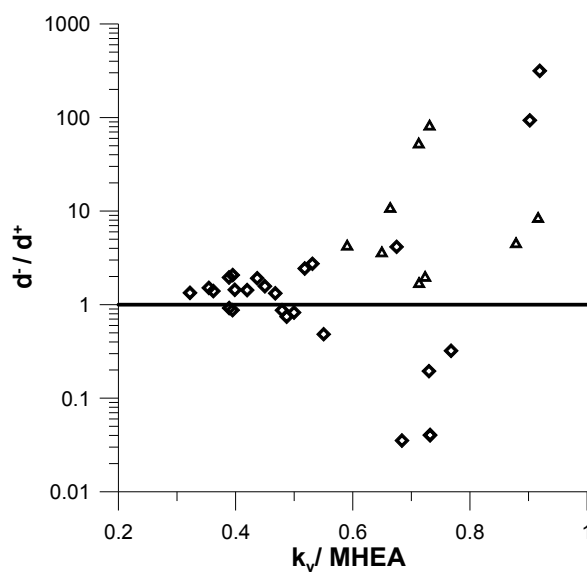
Η εκτίμηση των σεισμικών μετακινήσεων ακολούθησε για τις περιπτώσεις όπου ο συντελεστής ασφαλείας προέκυψε μικρότερος της μονάδας. Στο Σχήμα 5.4 παρατίθενται οι κατανομές των μόνιμων παραμορφώσεων συναρτήσει του λόγου της κρίσιμης προς τη μέγιστη ισοδύναμη επιτάχυνση για τις δύο επιλεχθείσες περιβάλλουσες αστοχίας του απορριμματικού υλικού. Προκειμένου μάλιστα να ληφθεί υπόψη η δυσμενέστερη περίπτωση ευστάθειας εκ των δύο πρυνών των υπέργειων Χ.Υ.Τ.Α. (προσομοιώματα 1 και 2), οι μόνιμες παραμορφώσεις υπολογίστηκαν και για τις δύο πιθανές διευθύνσεις της σεισμικής κίνησης. Για τον λόγο αυτό αντιστράφηκε η φορά της χρονοϊστορίας της ισοδύναμης επιτάχυνσης και ολοκληρώθηκε δύο φορές η διαφορά της από την κρίσιμη επιτάχυνση. Στο Σχήμα 5.4 φαίνεται η δυσμενέστερη εκ των υπολογισθέντων τιμών της οριζόντιας σεισμικής μετακίνησης. Παρατηρείται ότι το μέγεθος των μόνιμων παραμορφώσεων αυξάνεται καθώς μειώνεται η τιμή του λόγου  $k_y/MHEA$ , όπως άλλωστε ήταν και το αναμενόμενο. Συγκρίνοντας τα Σχήματα 5.4α και 5.4β γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι το μέγεθος των σεισμικών μετακινήσεων αυξάνεται σημαντικά ως συνέπεια του μηδενισμού της συνοχής του απορριμματικού υλικού, καθώς το γεγονός αυτό σχετίζεται με τη σημαντική μείωση του λόγου  $k_y/MHEA$ .



**Σχήμα 5.4.** Κατανομή των παραμενουσών σεισμικών μετακινήσεων ( $d$ ) συναρτήσει του λόγου της κρίσιμης επιτάχυνσης προς τη μέγιστη τιμή της οριζόντιας ισοδύναμης

επιτάχυνσης για τις δύο περιβάλλουσες αστοχίας: (α) συνοχή ίση με 15kPa και γωνία τριβής ίση με 34°, και (β) μηδενική συνοχή και γωνία τριβής ίση με 34°.

Εν γένει, όταν ο λόγος  $k_y/MHEA$  λαμβάνει τιμές μεγαλύτερες του 0.5, οι σεισμικές μετακινήσεις είναι μικρότερες των 5cm για τις εξεταζόμενες περιπτώσεις, ενώ και η μέγιστη τιμή των μόνιμων παραμορφώσεων δεν υπερβαίνει τα 30cm μετακίνηση που λαμβάνει χώρα για τιμή του λόγου  $k_y/MHEA$  περίπου ίση με 0.3. Διαπιστώθηκε ότι η φορά της διέγερσης, ή ο προσανατολισμός του πρανούς σχετικά με την φορά της επιβαλλόμενης διέγερσης, επιδρά στις υπολογισθείσες σεισμικές μετακινήσεις. Η δυσμενής επίδραση της φοράς της ισοδύναμης επιτάχυνσης δύνανται να προβλέπει αύξηση των σεισμικών μετακινήσεων κατά ποσοστό που κυμαίνεται από 10% έως 100%. Στο Σχήμα 5.5 παρουσιάζεται η κατανομή του λόγου των σεισμικών μετακινήσεων για τις δύο δυνατές φορές της χρονοϊστορίας της ισοδύναμης επιτάχυνσης συναρτήσει του λόγου της κρίσιμης προς τη μέγιστη ισοδύναμη οριζόντια επιτάχυνση. Πρέπει να σημειωθεί ότι, η μεγάλη διαφοροποίηση μεταξύ των δύο τιμών της μετακίνησης, η οποία αποτυπώνεται στο Σχήμα 5.5 ως μεγάλη απόκλιση από τη μονάδα, διαπιστώνεται για μεγάλες τιμές του λόγου  $k_y/MHEA$ . Αυτό σημαίνει ότι η σημαντική ποσοστιαία αύξηση/μείωση λόγω αλλαγής της φοράς σχετίζεται με πολύ μικρές απόλυτες τιμές της μετακίνησης. Για μετακινήσεις μεγαλύτερες των 5cm ( $k_y/MHEA < 0.5$ ) η ποσοστιαία αύξηση/μείωση λόγω αλλαγής της φοράς κυμαίνεται μεταξύ 25% και 50%.



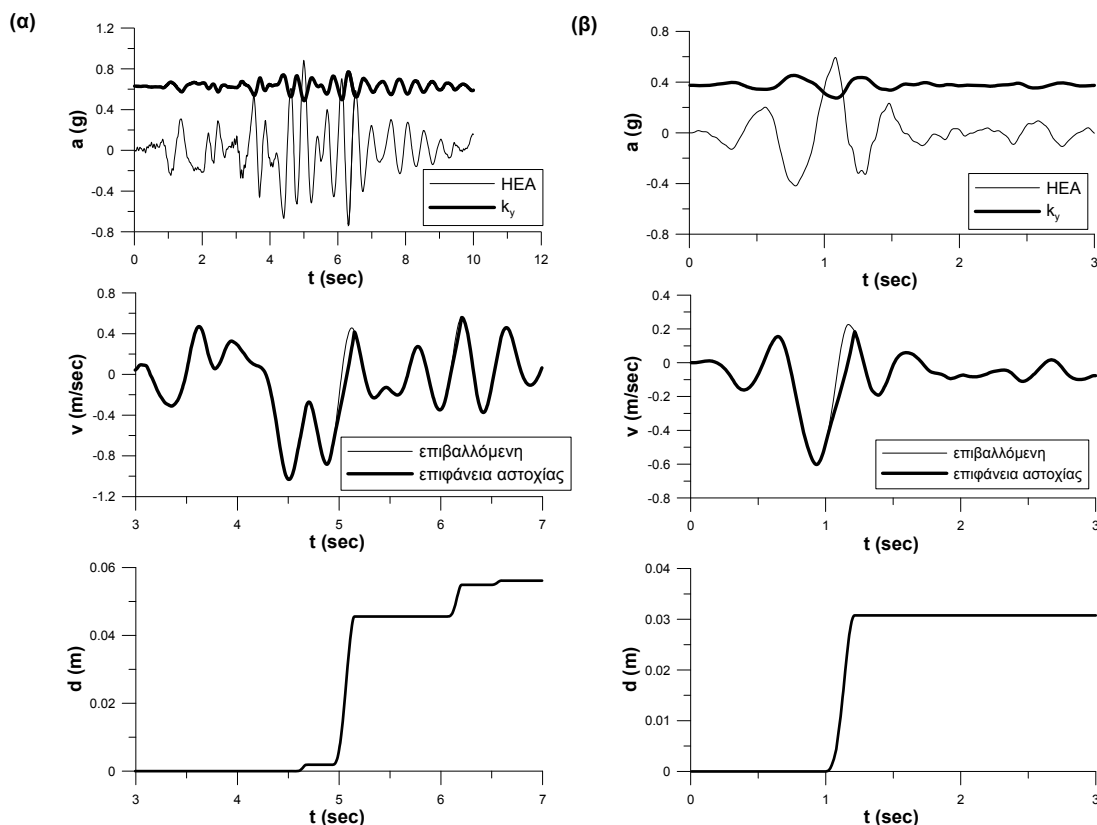
**Σχήμα 5.5.** Κατανομή του λόγου των παραμενουσών σεισμικών μετακινήσεων υπολογισμένων με τις δύο πιθανές φορές της ισοδύναμης επιτάχυνσης ( $d^-/d^+$ ) συναρτήσει του λόγου της κρίσιμης επιτάχυνσης προς τη μέγιστη τιμή της οριζόντιας ισοδύναμης επιτάχυνσης.

Εξετάζοντας την αναπτυσσόμενη ισοδύναμη επιτάχυνση στην κρίσιμη επιφάνεια αστοχίας, προέκυψε ότι η κατακόρυφη συνιστώσα της μπορεί να χαρακτηρίζεται από σημαντικό μέγεθος, ενώ και η συμβολή της στη μείωση του συντελεστή ασφαλείας αποδείχτηκε σημαντική. Παρακάτω θα διερευνηθεί η επίδραση της κατακόρυφης συνιστώσας της ισοδύναμης επιτάχυνσης στον υπολογισμό των σεισμικών μετακινήσεων. Για τον σκοπό αυτό αρχικά τροποποιήθηκε καταλλήλως ο κώδικας υπολογισμού του συντελεστή ασφαλείας σύμφωνα με την απλοποιημένη μέθοδο Bishop (1954), ο οποίος αναπτύχθηκε σε γλώσσα προγραμματισμού FORTRAN, ώστε να υπολογίζει την κρίσιμη επιτάχυνση μίας συγκεκριμένης επιφάνειας αστοχίας. Εν συνεχεία, υπολογίστηκε η χρονοϊστορία της κρίσιμης επιτάχυνσης λαμβάνοντας υπόψη την χρονοϊστορία της κατακόρυφης ισοδύναμης επιτάχυνσης. Τελευταίο βήμα της μεθοδολογίας αυτής αποτέλεσε ο υπολογισμός της μόνιμης παραμόρφωσης έπειτα από τη διπλή ολοκλήρωση της διαφοράς των χρονοϊστοριών της κρίσιμης από την ισοδύναμη επιτάχυνση. Στο Σχήμα 5.6 παρατίθενται δύο ενδεικτικά παραδείγματα μέσω της παρουσίασης των χρονοϊστοριών: (α) της κρίσιμης και ισοδύναμης επιτάχυνσης ( $k_y$  και HEA αντίστοιχα), (β) της ταχύτητας της επιβαλλόμενης διέγερσης αλλά και της επιφάνειας αστοχίας, και (γ) της αθροιστικής ολίσθησης.

Το πρώτο παράδειγμα αναφέρεται σε συνθήκες συντονισμού, και λόγω της κρίσιμης (υπολογισμένης χωρίς τη συμβολή της κατακόρυφης ισοδύναμης επιτάχυνσης) προς τη μέγιστη ισοδύναμη επιτάχυνση ίσο με 0.71. Παρατηρείται ότι, ο συνυπολογισμός της κατακόρυφης συνιστώσας της ισοδύναμης επιτάχυνσης συντελεί στη διακόμανση της κρίσιμης επιτάχυνσης σχετικά με την τιμή που αντιστοιχεί σε μηδενική κατακόρυφη συνιστώσα της ισοδύναμης επιτάχυνσης. Το γεγονός αυτό συνεπάγεται την ανάπτυξη ολίσθησης περισσότερες από μία φορές. Επιπλέον, στο κύριο γεγονός ολίσθησης που λαμβάνει χώρα περίπου στα 5sec η κρίσιμη επιτάχυνση μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια της ολίσθησης, λαμβάνοντας πάντα τιμές μικρότερες της αντίστοιχης χωρίς την κατακόρυφη ισοδύναμη επιτάχυνση. Αποτέλεσμα των προαναφερθέντων είναι η ανάπτυξη παραμένουσας σεισμικής μετακίνησης ίσης με 5.6cm, τιμή μεγαλύτερη από τη διπλάσια της αντίστοιχης χωρίς τη συμβολή της κατακόρυφης ισοδύναμης επιτάχυνσης.

Αντίστοιχη είναι η συμπεριφορά και για το δεύτερο παράδειγμα, το οποίο αναφέρεται σε λόγο ιδιοπεριόδου του Χ.Υ.Τ.Α. προς τη δεσπόζουσα περίοδο της διέγερσης ίσο με 0.6 και τιμή του λόγου της κρίσιμης (υπολογισμένης χωρίς τη συμβολή της κατακόρυφης ισοδύναμης επιτάχυνσης) προς τη μέγιστη ισοδύναμη επιτάχυνση ίσο

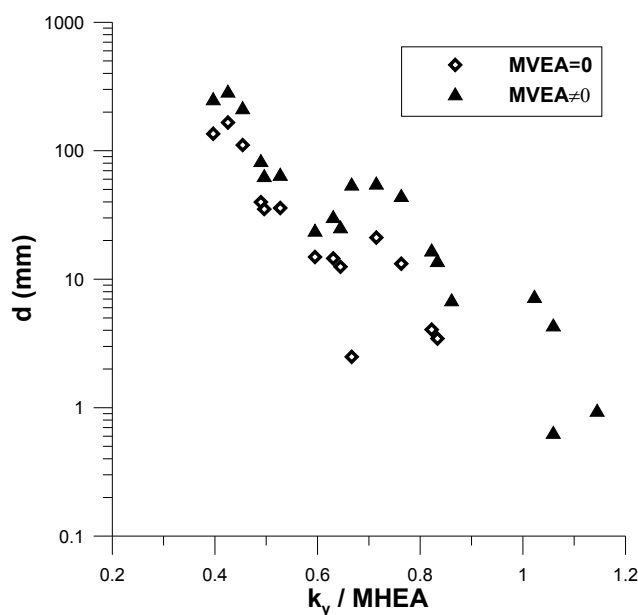
με 0.63. Λόγω των λιγότερων σημαντικών κύκλων της διέγερσης που χαρακτηρίζει την καταγραφή του σεισμού του Αιγίου μόνο ένα γεγονός ολίσθησης λαμβάνει χώρα. Παρόλα αυτά, εξαιτίας της χρονικής μεταβολής της κρίσιμης επιτάχυνσης κατά τη διάρκεια της ολίσθησης, η σεισμική μετακίνηση διπλασιάζεται σε σύγκριση με την αντίστοιχη όπου δεν συνεκτιμάται ο ρόλος της κατακόρυφης ισοδύναμης επιτάχυνσης.



**Σχήμα 5.6.** Χρονοϊστορίες της ισοδύναμης και κρίσιμης επιτάχυνσης, της επιβαλλόμενης ταχύτητας και της ταχύτητας της επιφάνειας αστοχίας και της αθροιστικής ολίσθησης. Τα αποτελέσματα αντιστοιχούν σε: (α) λόγο  $k_y/MHEA$  ίσο με 0.71 και επιβολή της καταγραφής του σεισμού του Kobe (1995), όπου για λόγους ευκρίνειας η ανάπτυξη της ολίσθησης παρουσιάζεται για  $3\text{sec} < t < 7\text{sec}$ , και (β) λόγο  $k_y/MHEA$  ίσο με 0.63 και επιβολή της καταγραφής του σεισμού του Αιγίου (1995).

Στο Σχήμα 5.7 παρατίθενται τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα της διερεύνησης της επίδρασης της κατακόρυφης συνιστώσας της ισοδύναμης επιτάχυνσης στις αναπτυσσόμενες σεισμικές μετακινήσεις. Εν γένει, το μέγεθος των σεισμικών μετακινήσεων αυξάνεται, προκαλώντας αστάθεια ακόμη και για περιπτώσεις όπου ο λόγος  $k_y/MHEA$  είναι μεγαλύτερος της μονάδας. Η αύξηση των μόνιμων παραμορφώσεων μπορεί να μην είναι δραματική, γεγονός το οποίο θα σχετιζόταν με αλλαγή της τάξης μεγέθους, αλλά δεν παύει να είναι σημαντική. Ειδικά για μικρές τιμές του λόγου  $k_y/MHEA$ , όπου οι σεισμικές μετακινήσεις είναι της τάξης των δεκάδων

εκατοστών ο διπλασιασμός του μεγέθους τους λόγω της συμβολής της κατακόρυφης ισοδύναμης επιτάχυνσης μπορεί να είναι σημαντικός για τον αντισεισμικό σχεδιασμό.



**Σχήμα 5.7.** Κατανομή των μόνιμων παραμορφώσεων συναρτήσει του λόγου της κρίσιμης επιτάχυνσης για μηδενική κατακόρυφη ισοδύναμη επιτάχυνση προς τη μέγιστη τιμή της οριζόντιας ισοδύναμης επιτάχυνσης. Τα αποτελέσματα υπολογίστηκαν με και χωρίς την συνεκτίμηση της κατακόρυφης ισοδύναμης επιτάχυνσης (MVEA).

### 5.3 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΣΤΕΓΑΝΩΣΗΣ

Εκτός από τις επιφάνειες αστοχίας οι οποίες μπορούν να αναπτυχθούν εξ ολοκλήρου εντός της απορριμματικής μάζας, εξετάζεται και η περίπτωση της σεισμικής ευστάθειας επιφάνειας αστοχίας εντός του σύνθετου συστήματος στεγάνωσης. Η βιβλιογραφική ανασκόπηση του 2<sup>ου</sup> Κεφαλαίου ανέδειξε αφενός μεν την ύπαρξη πολλαπλών διεπιφανειών εντός του συστήματος στεγάνωσης ως αποτέλεσμα των κανονιστικών διατάξεων, αφετέρου δε τη μεγάλη διασπορά των παραμέτρων διατμητικής αντοχής τους. Σημειώνεται επίσης ότι, εν γένει η διατμητική αντοχή των διεπιφανειών του συστήματος στεγάνωσης είναι μικρότερη της αντίστοιχης του απορριμματικού υλικού. Συνέπεια της ιδιότητας αυτής αποτελεί η εκδήλωση αστάθειας με την μορφή ανάπτυξης μετακινήσεων κατά μήκος των διεπιφανειών αυτών, γεγονός που έχει παρατηρηθεί σε αρκετές περιπτώσεις αστοχιών Χ.Υ.Τ.Α. υπό στατικές συνθήκες (Koerner and Soong, 2000, Seed et al., 1990 και Filz et al., 2001).

Είναι λοιπόν αναγκαία η διερεύνηση της σεισμικής ευστάθειας κατά μήκος των διαμορφούμενων διεπιφανειών εντός του συστήματος στεγάνωσης. Για τον σκοπό αυτό



εφαρμόστηκαν η ψευδοστατική μέθοδος αλλά και η μέθοδος των μονίμων παραμορφώσεων. Αρχικά, ακολουθώντας την ασύζευκτη μεθοδολογία που περιγράφηκε στην προηγούμενη ενότητα για την περίπτωση της κυκλικής επιφάνειας αστοχίας, προσδιορίστηκαν οι χρονοϊστορίες της ισοδύναμης επιτάχυνσης, οι συντελεστές ασφαλείας και οι σεισμικές μετακινήσεις για την επιφάνεια αστοχίας που ορίζει το σύστημα στεγάνωσης (καθολική αστοχία). Πιο συγκεκριμένα, αρχικά υπολογίστηκαν βάσει της σχέσης (5.1) οι χρονοϊστορίες της οριζόντιας συνιστώσας της ισοδύναμης επιτάχυνσης για το σύνολο των αριθμητικών αναλύσεων της παραμετρικής διερεύνησης του 4<sup>ου</sup> Κεφαλαίου. Ακολούθως, προσδιορίστηκε ο συντελεστής ασφαλείας θεωρώντας δύο αντιπροσωπευτικές τιμές για την περιβάλλουσα αστοχίας της κρίσιμης διεπιφάνειας, δηλαδή γωνία τριβής ίση με  $16.5^\circ$  και  $11^\circ$ . Οι τιμές αυτές επιλέχθηκαν σκοπίμως να προσεγγίζουν τα κάτω όρια των τιμών της διατμητικής αντοχής που παρατίθενται στον Πίνακα 2.8 για τις διεπιφάνειες του συστήματος στεγάνωσης, ώστε να εκτιμάται συντηρητικά η ευστάθεια. Ο συντελεστής ασφαλείας υπολογίστηκε για τον πλευρικό Χ.Υ.Τ.Α. βάσει της σχέσης που προτείνεται από τον Shewbridge (1996), ενώ οι σεισμικές μετακινήσεις προσδιορίστηκαν για όλες τις περιπτώσεις έπειτα από διπλή ολοκλήρωση της διαφοράς της κρίσιμης επιτάχυνσης από την οριζόντια ισοδύναμη επιτάχυνση.

Η υιοθέτηση της ίδιας μεθοδολογίας ανάλυσης για τον υπολογισμό της σεισμικής ευστάθειας των κυκλικών επιφανειών αστοχίας και της ευστάθειας κατά μήκος των διεπιφανειών του συστήματος στεγάνωσης, επιτρέπει την άμεση σύγκριση των αποτελεσμάτων και την εκτίμηση της κρισιμότερης μορφής αστοχίας υπό σεισμική φόρτιση. Η εφαρμογή των ακριβέστερων συζευγμένων μεθόδων για την εύρεση της πιο κρίσιμης επιφάνειας δεν θεωρείται επαρκής, αφενός γιατί οι μέθοδοι αυτές δεν δύνανται να προσομοιώσουν τα σύνθετα φαινόμενα κυματικής διάδοσης που χαρακτηρίζουν τις περιοχές πλησίον των πρανών του Χ.Υ.Τ.Α., αφετέρου δε γιατί δεν λαμβάνουν υπόψη τη σύνθετη γεωμορφολογία του υπεδάφους η οποία παρατηρείται στην περίπτωση των Χ.Υ.Τ.Α. πλευρικής απόθεσης.

Παρόλα αυτά, εξετάστηκε η ευστάθεια κατά μήκος του συστήματος στεγάνωσης και με την εφαρμογή συζευγμένων μεθόδων. Σκοπός της διερεύνησης στην περίπτωση αυτή είναι να προκύψουν αναλυτικές λύσεις για τον καθορισμό των συνθηκών εκδήλωσης της αστάθειας της εξεταζόμενης επιφάνειας αστοχίας υπό δυναμικές συνθήκες, να καθοριστεί η επίδραση των σημαντικότερων παραμέτρων, αλλά και να ερμηνευτεί ο ρόλος των παραδοχών της αριθμητικής προσομοίωσης. Η σύγκριση της ασύζευκτης και

της συζευγμένης μεθοδολογίας όπως φάνηκε κι από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση έχει εξεταστεί εκτενέστατα, και η συντηρητικότητα της κάθε μεθόδου έχει προκύψει ότι είναι συνάρτηση τόσο του λόγου της ιδιοπεριόδου της κατασκευής προς της περίοδο της διέγερσης, όσο και του λόγου της κρίσιμης προς τη μέγιστη επιτάχυνση. Για τον λόγο αυτό η σύγκριση των δύο μεθοδολογιών δεν θα αποτελέσει αντικείμενο της παρούσας διερεύνησης.

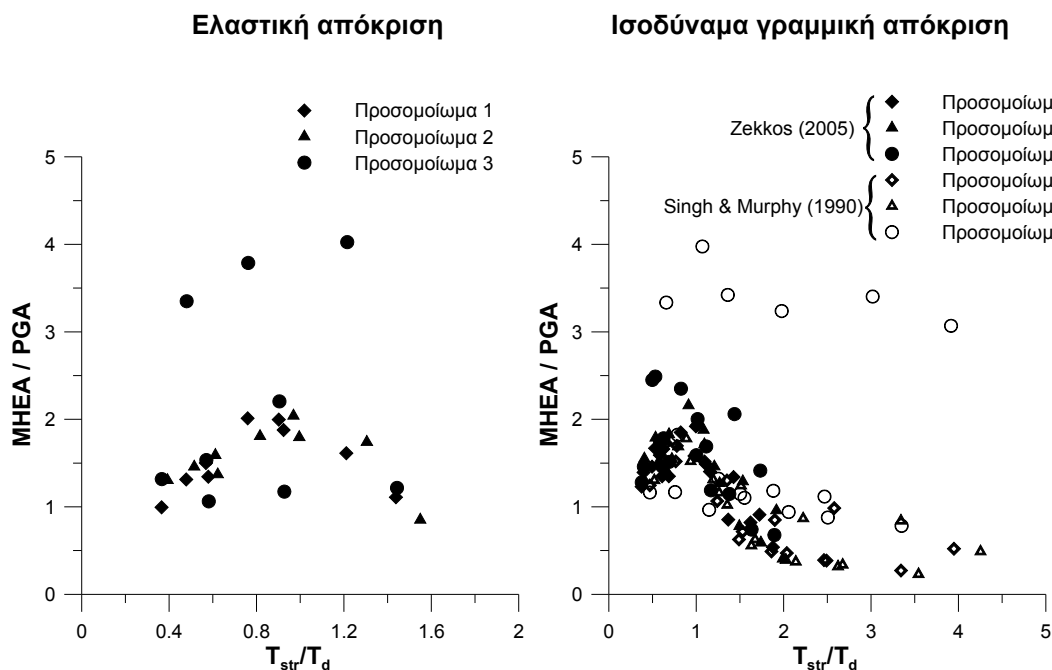
### 5.3.1 Ασύζευκτη μέθοδος

#### Ισοδύναμη Επιτάχυνση

Τα κύρια στοιχεία της δυναμικής απόκρισης των τριών εξεταζόμενων προσομοιωμάτων αναμένεται να επηρεάζουν τις υπολογιζόμενες χρονοϊστορίες της ισοδύναμης επιτάχυνσης και για την αστοχία στη βάση του Χ.Υ.Τ.Α., σε αντιστοιχία με την περίπτωση κυκλικής επιφάνειας αστοχίας. Για τον λόγο αυτό διαμορφώνεται και για αυτήν την περίπτωση, η κατανομή του λόγου της μέγιστης οριζόντιας ισοδύναμης επιτάχυνσης προς την μέγιστη επιβαλλόμενη επιτάχυνση συναρτήσει του λόγου της ισοδύναμα γραμμικής ιδιοπεριόδου προς τη δεσπόζουσα περίοδο της σεισμικής κίνησης ( $T_{str}/T_d$ ) (βλ. Σχήμα 5.8). Στο σημείο αυτό πρέπει να επισημανθεί ότι για αυτόν τον μηχανισμό αστοχίας, λόγω της γεωμετρίας της επιφάνειας θεμελίωσης, μόνο ο Χ.Υ.Τ.Α. πλευρικής απόθεσης διαθέτει κατακόρυφη συνιστώσα της ισοδύναμης επιτάχυνσης.

Όσον αφορά στην ελαστική απόκριση των εξεταζόμενων περιπτώσεων παρατηρείται ότι η μέγιστη τιμή της οριζόντιας ισοδύναμης επιτάχυνσης λαμβάνει τιμές οι οποίες κυμαίνονται μεταξύ της μέγιστης επιβαλλόμενης επιτάχυνσης και της διπλάσιας τιμής της. Κατ' εξαίρεση μεγαλύτερες τιμές της παραμέτρου υπολογίζονται για την περίπτωση της απόκρισης του πλευρικού Χ.Υ.Τ.Α. (τρίτο προσομοίωμα) στη διέγερση της καταγραφής του σεισμού του Kobe (1995), ενώ αντίστοιχη συμπεριφορά χαρακτηρίζει και τα αποτελέσματα των ισοδύναμα γραμμικών αναλύσεων. Για την περίπτωση της ισοδύναμα γραμμικής απόκρισης, η μέγιστη τιμή της ισοδύναμης επιτάχυνσης στην περιοχή του συντονισμού διατηρείται στα επίπεδα που παρατηρήθηκαν και για την περίπτωση της ελαστικής απόκρισης, για τα δύο προσομοιώματα των υπεργείων Χ.Υ.Τ.Α. Καθώς αυξάνεται όμως ο λόγος της ισοδύναμα γραμμικής περιόδου της κατασκευής προς τη δεσπόζουσα περίοδο της επιβαλλόμενης διέγερσης ( $T_{str}/T_d$ ) η μέγιστη ισοδύναμη επιτάχυνση μειώνεται εκθετικά, καταλήγοντας ακόμη και σε τιμές της τάξης του 25% της μέγιστης επιβαλλόμενης επιτάχυνσης.

Σε σύγκριση με τις αντίστοιχες τιμές της ενίσχυσης της επιτάχυνσης στην επιφάνεια των τριών προσομοιωμάτων (Σχήμα 4.25α), η ισοδύναμη επιτάχυνση της εξεταζόμενης επιφάνειας αστοχίας παρατηρείται ότι είναι σημαντικά μειωμένη. Πιο συγκεκριμένα, στην περιοχή του συντονισμού η μέγιστη τιμή της ισοδύναμης επιτάχυνσης λαμβάνει τιμές που αντιστοιχούν σε ποσοστό 70% έως 40% της μέγιστης επιτάχυνσης στην επιφάνεια.

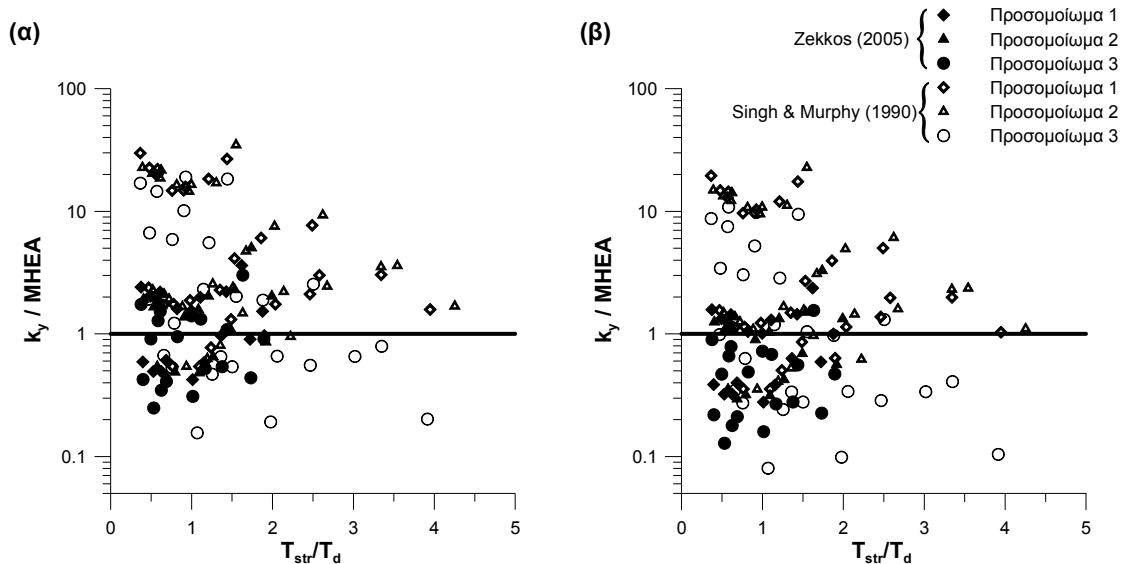


**Σχήμα 5.8.** Κατανομή του λόγου της μέγιστης οριζόντιας ισοδύναμης επιτάχυνσης προς τη μέγιστη επιβαλλόμενη επιτάχυνση ( $MHEA/PGA$ ), συναρτήσει του λόγου της ισοδύναμα γραμμικής ιδιοπεριόδου προς τη δεσπόζουσα περίοδο της σεισμικής κίνησης ( $T_{str}/T_d$ ). Τα αποτελέσματα παρατίθενται για ελαστική και ισοδύναμα γραμμική απόκριση και τις δύο εξεταζόμενες συσχετίσεις απομείωσης του μέτρου διάτμησης-αύξησης της απόσβεσης.

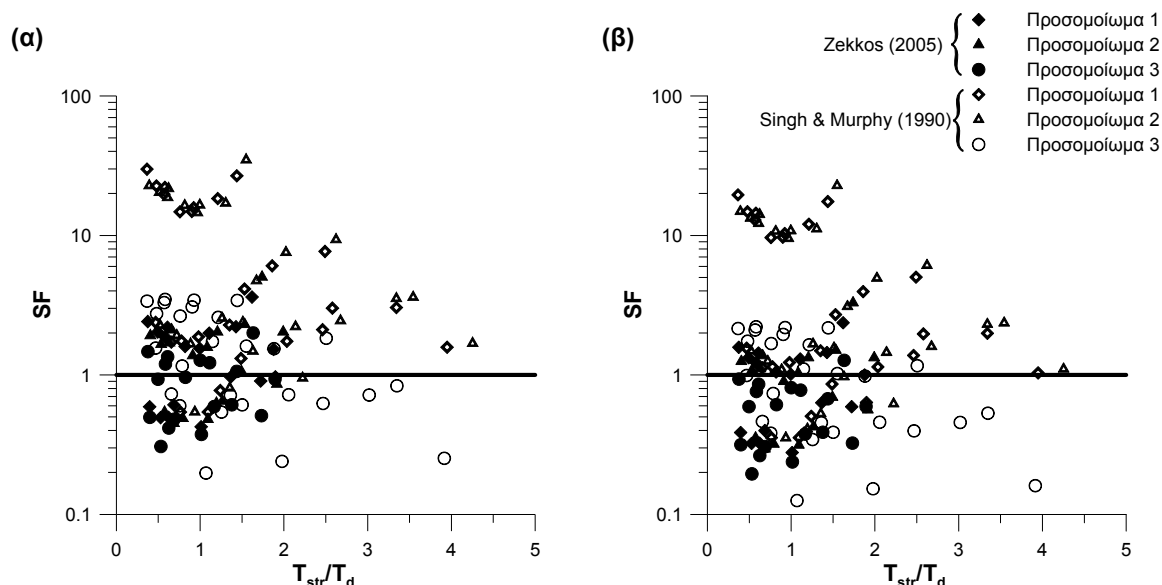
Η διαφορά αυτή οφείλεται κυρίως στη μεταβολή των απολύτως μέγιστων τιμών της επιτάχυνσης καθ' ύψος του Χ.Υ.Τ.Α., ενώ για μεγαλύτερες τιμές του λόγου  $T_{str}/T_d$  η διαφορά αυξάνει με τη μέγιστη ισοδύναμη επιτάχυνση να αποτελεί μόλις το 30%-20% της μέγιστης επιτάχυνσης. Η τελευταία παρατήρηση αποδίδεται στην επιπρόσθετη επίδραση και της ασύγχρονης ταλάντωσης του Χ.Υ.Τ.Α., η οποία εντείνεται καθώς η ιδιοπερίοδος της κατασκευής γίνεται πολύ μεγαλύτερη της δεσπόζουσας περιόδου της διέγερσης. Γενικά παρατηρείται ότι η κατανομή της μέγιστης ισοδύναμης επιτάχυνσης διατηρεί τα στοιχεία ενός φάσματος απόκρισης, αλλά η διασπορά των υπολογισθέντων τιμών είναι αρκετά έντονη. Το γεγονός αυτό αποδίδεται στο ότι οι παράμετροι που επιλέχθηκαν για την απόδοση των ιδιοτήτων της δυναμικής απόκρισης ( $T_{str}, T_d$  και  $PGA$ ) πιθανώς δεν καλύπτουν επαρκώς τη σύνθετη συμπεριφορά των τριών προσομοιωμάτων.

### Συντελεστής ασφαλείας

Αρχικά υπολογίστηκε η κρίσιμη επιτάχυνση για τα τρία προσομοιώματα, λαμβάνοντας υπόψη τις δύο γωνίες τριβής για τη διεπιφάνεια του συστήματος στεγάνωσης, που ορίζει την επιφάνεια αστοχίας. Όπως ήταν αναμενόμενο, το τρίτο προσομοίωμα (πλευρικός Χ.Υ.Τ.Α.) χαρακτηρίζεται από τη μικρότερη τιμή της κρίσιμης επιτάχυνσης, ενώ για τους δύο υπέργειους Χ.Υ.Τ.Α. η κρίσιμη επιτάχυνση ισούται με την εφαπτομένη της γωνίας τριβής και για τον λόγο αυτό είναι ανεξάρτητη των λοιπών γεωμετρικών στοιχείων του προσομοιώματος. Στο Σχήμα 5.9 παρουσιάζεται η κατανομή του λόγου της κρίσιμης επιτάχυνσης προς τη μέγιστη ισοδύναμη επιτάχυνση ( $k_y/MHEA$ ) συναρτήσεως του λόγου της ισοδύναμα γραμμικής περιόδου προς τη δεσπόζουσα περίοδο της διέγερσης. Καθώς αυξάνεται η εξεταζόμενη παράμετρος ( $k_y/MHEA$ ) βελτιώνεται και η ευστάθεια, με τις μεγαλύτερες τιμές της να αντιστοιχούν σε ελαστική απόκριση των τριών προσομοιωμάτων. Αντίστοιχη συμπεριφορά παρατηρείται και στο Σχήμα 5.10, όπου φαίνονται οι συντελεστές ασφαλείας για τις εξεταζόμενες περιπτώσεις. Εν συνεχεία, οι συντελεστές ασφαλείας μειώνονται καθώς αυξάνει η μέγιστη επιβαλλόμενη επιτάχυνση σε 0.1g χωρίς όμως να προκαλείται εκδήλωση αστοχίας, δηλαδή να λαμβάνει ο συντελεστής ασφαλείας τιμές μικρότερες της μονάδας.



**Σχήμα 5.9.** Κατανομή του λόγου της κρίσιμης επιτάχυνσης προς τη μέγιστη οριζόντια ισοδύναμη επιτάχυνση ( $k_y/MHEA$ ) συναρτήσεως του λόγου της ισοδύναμα γραμμικής ιδιοπεριόδου προς τη δεσπόζουσα περίοδο της σεισμικής κίνησης ( $T_{str}/T_d$ ) για τις δύο περιβάλλουσες αστοχίας: (α) γωνία τριβής ίση με 16.5°, και (β) γωνία τριβής ίση με 11°. Τα αποτελέσματα παρατίθενται για όλες τις αριθμητικές αναλύσεις της παραμετρικής διερεύνησης.

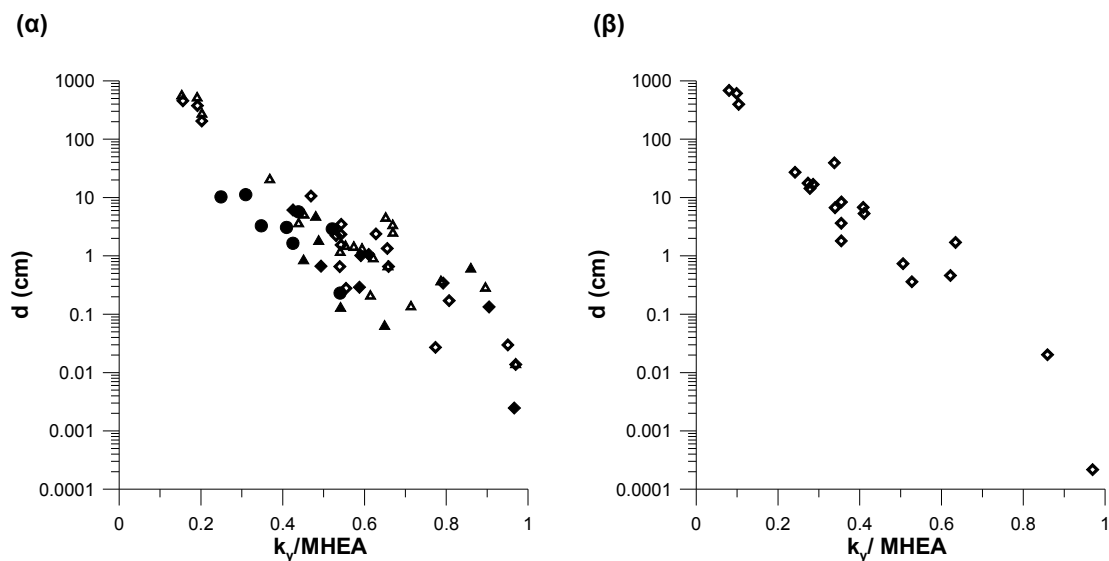


**Σχήμα 5.10.** Κατανομή του ψευδοστατικού συντελεστή ασφαλείας (SF) συναρτήσει του λόγου της ισοδύναμη γραμμικής ιδιοπεριόδου προς τη δεσπόμενη περίοδο της σεισμικής κίνησης ( $T_{str}/T_d$ ) υπολογισμένου με χρήση της μέγιστης τιμής της οριζόντιας ισοδύναμης επιτάχυνσης ως σεισμικό συντελεστή για τις δύο περιβάλλουσες αστοχίας: (α) γωνία τριβής ίση με  $16.5^\circ$ , και (β) γωνία τριβής ίση με  $11^\circ$ .

Εκδήλωση αστοχίας προβλέπεται για την περίπτωση που η μέγιστη επιβαλλόμενη επιτάχυνση γίνει ίση με  $0.36g$ , χωρίς να είναι ξεκάθαρη κάποια συνάφεια με την τιμή του λόγου της ισοδύναμη γραμμικής περιόδου προς τη δεσπόμενη περίοδο της διέγερσης. Αυτό αποδίδεται στην ισχυρή μέγιστη ισοδύναμη επιτάχυνση που υπολογίστηκε για μερικές περιπτώσεις του τρίτου προσομοιώματος, για το οποίο επιπροσθέτως η κρίσιμη επιτάχυνση είναι μικρότερη, συντελώντας έτσι σε σημαντικά μικρότερους συντελεστές ασφαλείας συγκριτικά με τα άλλα δύο προσομοιώματα για αντίστοιχες τιμές του λόγου ( $T_{str}/T_d$ ). Επίσης, συγκρίνοντας τα Σχήματα 5.9α με 5.9β και 5.10α με 5.10β παρατηρείται ότι η μείωση της γωνίας τριβής συντελεί στην αύξηση των περιπτώσεων όπου προβλέπεται η εκδήλωση αστοχίας.

### Μετακινήσεις

Τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων υπολογισμού των σεισμικών μετακινήσεων παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.11 συναρτήσει του λόγου της κρίσιμης προς τη μέγιστη ισοδύναμη επιτάχυνση για τις δύο επιλεχθείσες τιμές της γωνίας τριβής της διεπιφάνειας. Σημειώνεται επίσης ότι, για τα προσομοιώματα των δύο υπεργείων Χ.Υ.Τ.Α. η ολίσθηση είναι συμμετρική, δηλαδή η κρίσιμη επιτάχυνση λαμβάνει την ίδια τιμή για οποιαδήποτε εκ των δύο πιθανών διευθύνσεων της κίνησης.



**Σχήμα 5.11.** Κατανομή των παραμενουσών σεισμικών μετακινήσεων ( $d$ ) συναρτήσει του λόγου της κρίσιμης επιτάχυνσης προς τη μέγιστη τιμή της οριζόντιας ισοδύναμης επιτάχυνσης για τις δύο περιβάλλουσες αστοχίας: (α) γωνία τριβής ίση με  $16.5^\circ$ , και (β) γωνία τριβής ίση με  $11^\circ$ .

Αντιθέτως, για τον Χ.Υ.Τ.Α. πλευρικής απόθεσης (τρίτο προσομοίωμα) η ολίσθηση είναι ασύμμετρη, καθώς η ανάπτυξη σεισμικής μετακίνησης προς το πρανές απόθεσης των απορριμμάτων δεν είναι δυνατή. Η ιδιότητα αυτή σε συνδυασμό με την ισχυρή οριζόντια ισοδύναμη επιτάχυνση συντελεί στον υπολογισμό εξαιρετικά μεγάλων τιμών της μόνιμης παραμόρφωσης, οι οποίες μπορεί να ξεπερνούν και το 1m.

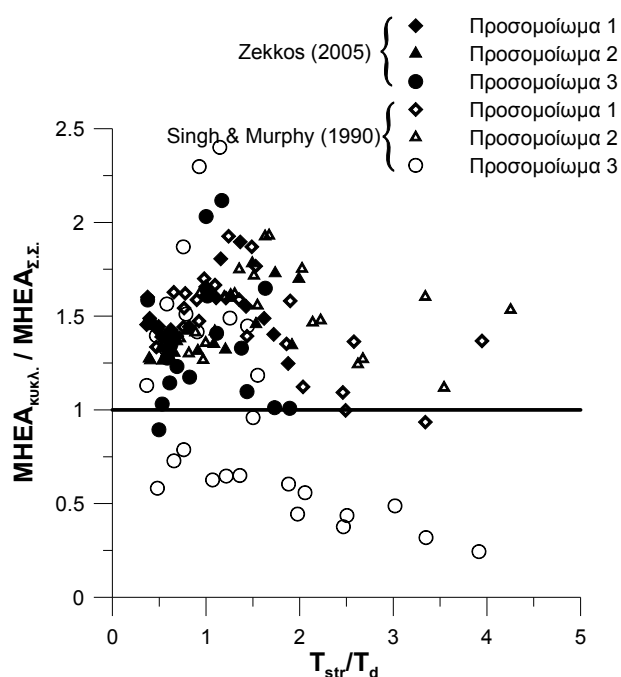
Έπειτα από την αντιπαραβολή των Σχημάτων 5.11α και 5.11β παρατηρείται ότι, οι τιμές της μετακίνησης αυξάνονται ως συνέπεια της μείωσης της γωνίας τριβής. Ταυτόχρονα είναι φανερό ότι, οι παραμένουσες σεισμικές μετακινήσεις δεν ξεπερνούν τα 5cm για τιμές του λόγου  $k_y/MHEA$  μεγαλύτερες του 0.5 ανεξαρτήτως γωνίας τριβής. Τέλος, πρέπει να σημειωθεί ότι η ανάγκη της ασφαλούς λειτουργίας του συστήματος στεγάνωσης απαιτεί την κατά το δυνατόν ελαχιστοποίηση της έντασης των επιμέρους στοιχείων του. Συνεπώς, οι αναπτυσσόμενες σεισμικές μετακινήσεις θα πρέπει να διατηρούνται σε χαμηλά επίπεδα.

### 5.3.2 Σύγκριση των δύο μορφών αστοχίας

Η εκτίμηση της σεισμικής ευστάθειας των Χ.Υ.Τ.Α. εξετάστηκε τόσο για την περίπτωση ανάπτυξης κυκλικών επιφανειών αστοχίας εντός της απορριμματικής μάζας, όσο και για την περίπτωση επιφανειών αστοχίας κατά μήκος διεπιφάνειας που εντοπίζεται στο σύνθετο σύστημα στεγάνωσης της βάσης του. Όμως, ένα καίριο θέμα του αντισεισμικού

σχεδιασμού των Χ.Υ.Τ.Α. αποτελεί η αναγνώριση της κρίσιμης μορφής αστοχίας, με σκοπό την αποφυγή εκδήλωσής της. Για τον σκοπό αυτό, συσχετίζονται παρακάτω τα αποτελέσματα της εκτίμησης της ευστάθειας και των δύο εξεταζόμενων μορφών αστοχίας με την ασύζευκτη μέθοδο.

Αρχικά, εξετάζεται ο λόγος της μέγιστης ισοδύναμης οριζόντιας επιτάχυνσης, όπως υπολογίστηκε έπειτα από την αριθμητική παραμετρική διερεύνηση, συναρτήσει του λόγου της ισοδύναμα γραμμικής ιδιοπεριόδου της κατασκευής προς τη δεσπόμενη περίοδο της διέγερσης. Παρατηρώντας το Σχήμα 5.12 είναι εμφανές ότι η μέγιστη τιμή της ισοδύναμης επιτάχυνσης είναι μεγαλύτερη για την κυκλική επιφάνεια αστοχίας από την αντίστοιχη της αστοχίας κατά μήκος διεπιφάνειας του συστήματος στεγάνωσης. Εξαιρεση σε αυτή τη παρατήρηση αποτελούν μόνο ελάχιστες περιπτώσεις απόκρισης του Χ.Υ.Τ.Α. πλευρικής απόθεσης.



**Σχήμα 5.12.** Κατανομή του λόγου της μέγιστης οριζόντιας ισοδύναμης επιτάχυνσης για την κυκλική επιφάνεια αστοχίας προς την αντίστοιχη για αστοχία κατά μήκος του συστήματος στεγάνωσης ( $MHEA_{\text{κυκλ.}} / MHEA_{\Sigma.\Sigma.}$ ), συναρτήσει του λόγου της ισοδύναμα γραμμικής ιδιοπεριόδου προς τη δεσπόμενη περίοδο της σεισμικής κίνησης ( $T_{\text{str}}/T_d$ ).

Γενικά, η μεγαλύτερη τιμή της ισοδύναμης επιτάχυνσης για τις κυκλικές επιφάνειες αστοχίας μπορεί να αποδοθεί στα σύνθετα φαινόμενα κυματικής διάδοσης που λαμβάνουν χώρα πλησίον του πρανούς και έχουν ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη σημαντικών οριζοντίων επιταχύνσεων. Καθώς αυξάνεται η μάζα της επιφάνειας αστοχίας ελαττώνεται η δυσμενής επίδραση της σημαντικής ενίσχυσης της σεισμικής

κίνησης, ενώ ταυτόχρονα είναι πιο έντονη και η συνεισφορά της ασύγχρονης ταλάντωσης μειώνοντας περαιτέρω την υπολογιζόμενη ισοδύναμη επιτάχυνση.

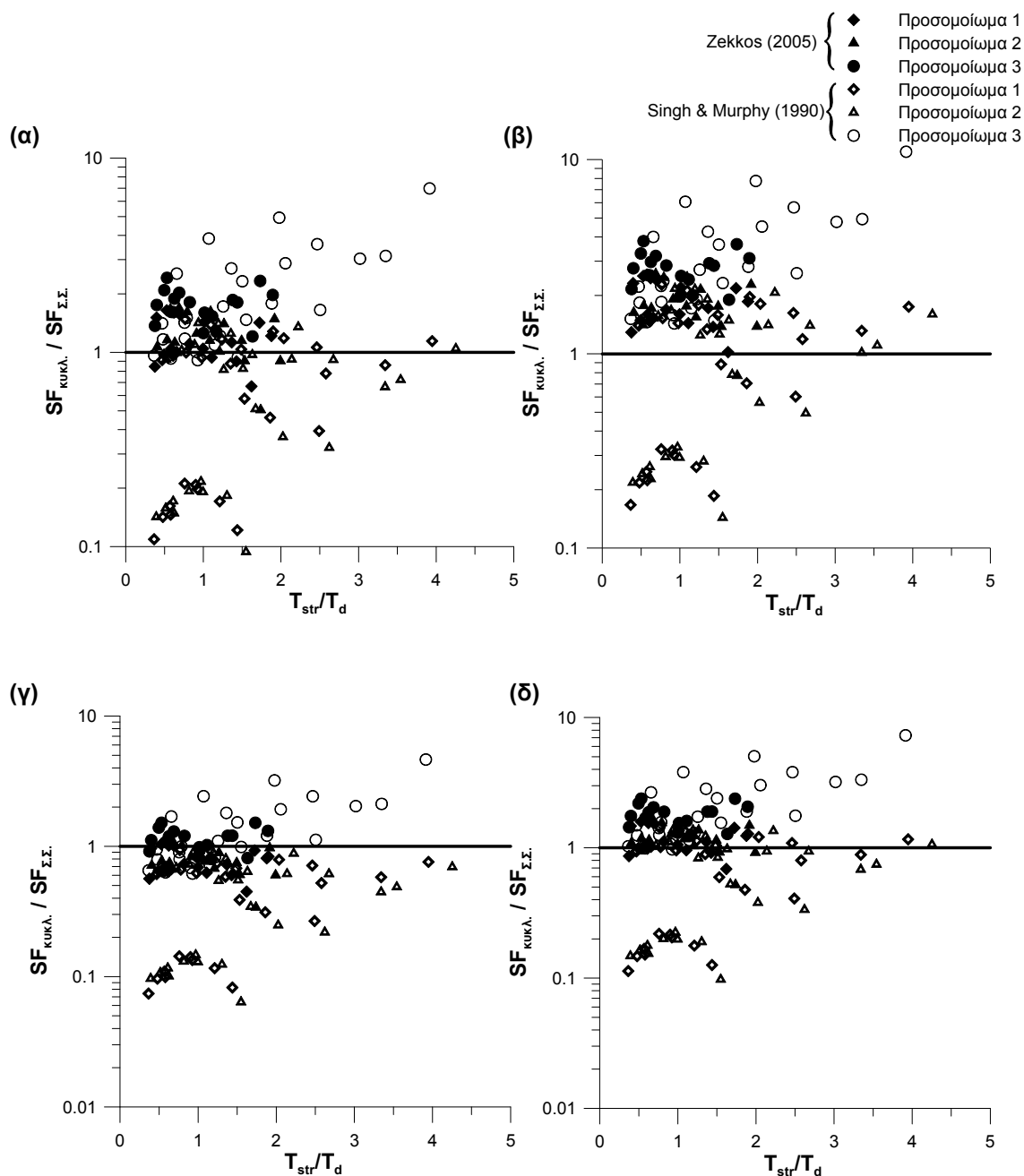
Στο Σχήμα 5.13 παρουσιάζονται οι κατανομές του λόγου του συντελεστή ασφαλείας της κάθε εξεταζόμενης περίπτωσης για τις δύο μορφές αστοχίας. Σημειώνεται ότι όταν η τιμή αυτή είναι μικρότερη της μονάδας η κρίσιμη μορφή αστοχίας είναι η κυκλική επιφάνεια. Παρατηρείται ότι αν και οι κυκλικές επιφάνειες αστοχίας χαρακτηρίζονται από μεγαλύτερες τιμές του σεισμικού συντελεστή δεν είναι πάντα και οι πιο κρίσιμες. Πιο συγκεκριμένα, όταν οι μηχανικές παράμετροι του απορριμματικού υλικού λαμβάνονται ως συνοχή ίση με 15kPa και γωνία τριβής ίση με 34° (Σχήματα 5.13α, και 5.13β) η αστοχία κατά μήκος διεπιφάνειας του συστήματος στεγάνωσης προκύπτει, εν γένει, ως η πιο κρίσιμη.

Λίγο πιο έντονη γίνεται αυτή η συμπεριφορά καθώς η διατμητική αντοχή της διεπιφάνειας μειώνεται από 16.5° (Σχήμα 5.13α) σε 11° (Σχήμα 5.13β). Αυτό σημαίνει ότι, όσο αυξάνεται η διαφορά μεταξύ της διατμητικής αντοχής του απορριμματικού υλικού και της διεπιφάνειας του συστήματος στεγάνωσης τόσο γίνεται πιο κρίσιμη η ολίσθηση κατά μήκος του συστήματος στεγάνωσης. Το συμπέρασμα αυτό εξάγεται συγκρίνοντας και τα Σχήματα 5.13γ με 5.13δ, όπου τα αποτελέσματα αντιστοιχούν σε περιβάλλουσα αστοχίας του απορριμματικού υλικού που χαρακτηρίζεται από μηδενική συνοχή και γωνία τριβής ίση με 34°. Στον αντίποδα, πιο κρίσιμη είναι η ευστάθεια των κυκλικών επιφανειών αστοχίας όταν η διαφορά μεταξύ της διατμητικής αντοχής του απορριμματικού υλικού και της διεπιφάνειας του συστήματος στεγάνωσης είναι μικρή. Αυτό διαπιστώνεται από το Σχήμα 5.13γ, όπου εκτός από την περίπτωση του Χ.Υ.Τ.Α. πλευρικής απόθεσης, οι συντελεστές ασφαλείας των κυκλικών επιφανειών αστοχίας είναι μικρότεροι των αντιστοίχων για αστοχία κατά μήκος του συστήματος στεγάνωσης.

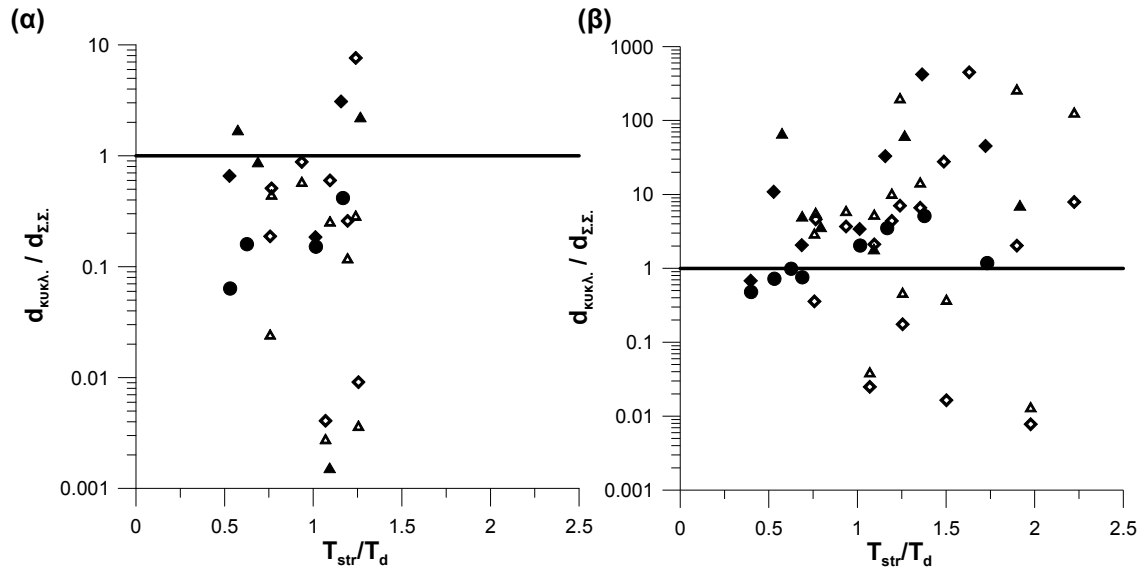
Στην παρούσα διερεύνηση, εξετάζεται και ο λόγος των σεισμικών μετακινήσεων που έχουν υπολογιστεί για την κυκλική επιφάνεια αστοχίας και την καθολική αστοχία. Όσο η τιμή του λόγου αυτού είναι μικρότερη της μονάδας πιο κρίσιμη είναι η αστοχία κατά μήκος του συστήματος στεγάνωσης, ενώ για τιμές του λόγου μεγαλύτερες της μονάδας πιο κρίσιμη είναι η κυκλική επιφάνεια αστοχίας. Σε αντιστοιχία με τα συμπεράσματα που εξήχθησαν βάσει των συντελεστών ασφαλείας, όταν η διατμητική αντοχή του απορριμματικού υλικού είναι αρκετά σημαντική (Σχήμα 5.14α), πιο κρίσιμη είναι η αστοχία κατά μήκος του συστήματος στεγάνωσης. Αντιθέτως, πιο μεγάλες σεισμικές



μετακινήσεις αναπτύσσονται για την κυκλική επιφάνεια αστοχίας όταν η διατμητική αντοχή του απορριμματικού υλικού είναι μικρότερη (Σχήμα 5.14β).



**Σχήμα 5.13.** Κατανομή του λόγου του συντελεστή ασφαλείας για την κυκλική επιφάνεια αστοχίας προς τον αντίστοιχο για αστοχία κατά μήκος του συστήματος στεγάνωσης ( $SF_{kukl.} / SF_{\Sigma.\Sigma.}$ ), συναρτήσει του λόγου της ισοδύναμη γραμμικής ιδιοπεριόδου προς τη δεσπόζουσα περίοδο της σεισμικής κίνησης ( $T_{str} / T_d$ ). Τα αποτελέσματα παρατίθενται για τις δύο περιβάλλουσες του απορριμματικού υλικού, δηλαδή συνοχή ίση με 15kPa και γωνία τριβής ίση με 34° (α και β), και μηδενική συνοχή και γωνία τριβής ίση με 34° (γ και δ) και για τις δύο τιμές της γωνίας τριβής της διεπιφάνειας του συστήματος στεγάνωσης, δηλαδή γωνία τριβής ίση με 16.5° (α και γ) και ίση με 11° (β και δ).



**Σχήμα 5.14.** Κατανομή του λόγου των σεισμικών μετακινήσεων για την κυκλική επιφάνεια αστοχίας προς τις αντίστοιχες για αστοχία κατά μήκος του συστήματος στεγάνωσης ( $d_{\text{κυκλ.}}/d_{\Sigma.\Sigma.}$ ), συνάρτησε του λόγου της ισοδύναμα γραμμικής ιδιοπεριόδου προς τη δεσπόζουσα περίοδο της σεισμικής κίνησης ( $T_{\text{str}}/T_d$ ). Τα αποτελέσματα παρατίθενται για τις δύο περιβάλλουσες του απορριμματικού υλικού, δηλαδή συνοχή ίση με 15kPa και γωνία τριβής ίση με  $34^\circ$  (α) και μηδενική συνοχή και γωνία τριβής ίση με  $34^\circ$  (β).

Στο σημείο αυτό πρέπει να τονιστεί ότι κατά τον αντισεισμικό σχεδιασμό των Χ.Υ.Τ.Α. έχει προταθεί στη βιβλιογραφία η χρήση διαφορετικών αποδεκτών ορίων των σεισμικών παραμορφώσεων για την εκάστοτε επιφάνεια αστοχίας. Υπενθυμίζεται ότι, οι Kavazanjian and Matasovic (2001) αναφέρουν ότι εντός της απορριμματικής μάζας η μέγιστη τιμή της σεισμικής μετακίνησης δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 0.3m, ενώ κατά μήκος του συστήματος στεγάνωσης η αντίστοιχη τιμή είναι 0.15m. Με βάση αυτά τα όρια και τα αποτελέσματα της παρούσας διερεύνησης οι αναπτυσσόμενες μετακινήσεις στην περίπτωση των κυκλικών επιφανειών αστοχίας είναι αποδεκτές. Αν και τα προαναφερθέντα όρια θεωρούνται μη συντηρητικά, είναι γεγονός ότι η οριακή τιμή της μόνιμης παραμόρφωσης κατά μήκος του συστήματος στεγάνωσης θα πρέπει να λαμβάνει μικρές τιμές.

Λαμβάνοντας και αυτή τη παρατήρηση υπόψη, συμπεραίνεται ότι η εύρεση της κρίσιμης μορφής αστοχίας δεν μπορεί να εκτιμηθεί εκ των προτέρων καθώς αποτελεί συνάρτηση ενός πλήθους παραμέτρων. Στις παραμέτρους αυτές συμπεριλαμβάνονται οι ιδιότητες του Χ.Υ.Τ.Α., τα χαρακτηριστικά της επιβαλλόμενης διέγερσης (δεσπόζουσα περίοδος και μέγιστη επιβαλλόμενη επιτάχυνση), η διατμητική αντοχή του απορριμματικού υλικού και των διεπιφανειών του σύνθετου συστήματος στεγάνωσης,

αλλά και τα αποδεκτά όρια των αναπτυσσόμενων σεισμικών μετακινήσεων της εκάστοτε μορφής αστοχίας.

### 5.3.3 Συζευγμένες μέθοδοι

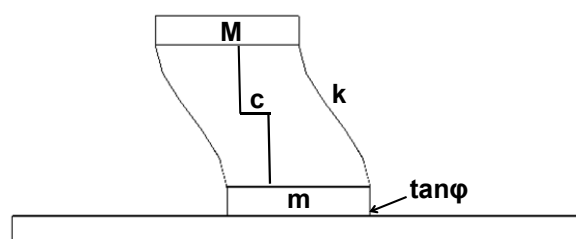
Η εκτενής περιγραφή των υφιστάμενων συζευγμένων μεθόδων εκτίμησης των μόνιμων παραμορφώσεων που προηγήθηκε στην εισαγωγική βιβλιογραφική ανασκόπηση, κατέστησε σαφές ότι αυτή η κατηγορία μεθόδων είναι ακριβέστερη των ασύζευκτων. Η ακρίβεια των συζευγμένων μεθόδων έγκειται στο γεγονός ότι κατά την εφαρμογή τους επιλύονται ταυτόχρονα οι διαφορικές εξισώσεις της δυναμικής απόκρισης των προτεινόμενων μονοβάθμιων ή/και πολυβάθμιων συστημάτων λαμβάνοντας υπόψη και την ανάπτυξη της ολίσθησης. Συνέπεια του πλεονεκτήματος αυτού είναι αφενός μεν η δυνατότητα εκτίμησης μερικών εκ των χαρακτηριστικών της δυναμικής συμπεριφοράς των εν λόγω συστημάτων μέσω αναλυτικών σχέσεων, αφετέρου δε η αλληλεπίδραση της δυναμικής απόκρισης με την ανάπτυξη της ολίσθησης μέσω μίας πιο σύνθετης διαδικασίας.

#### Κρίσιμη επιτάχυνση

Μία ιδιαίτερα σημαντική παράμετρος που σχετίζεται τόσο με την ευστάθεια όσο και με το μέγεθος της συσσωρευόμενης ολίσθησης είναι η κρίσιμη επιτάχυνση. Σε αυτό το σημείο πρέπει να σημειωθεί ότι οι ασύζευκτες μέθοδοι θεωρούν μία μοναδική τιμή της κρίσιμης επιτάχυνσης, για τον υπολογισμό της οποίας δεν συνεκτιμάται η επίδραση των αναπτυσσόμενων αδρανειακών δυνάμεων. Συνέπεια αυτής της παραδοχής είναι η κρίσιμη επιτάχυνση να υπολογίζεται για την περίπτωση της ολίσθησης κατά μήκος διεπιφάνειας του συστήματος στεγάνωσης ως ίση με  $\tan\varphi \cdot g$  (όπου  $\varphi$  η γωνία τριβής της διεπιφάνειας), σε αντιστοιχία με την κλασσική θεώρηση κατά Newmark (1965). Μια επιπλέον απόρροια της ασύζευκτης θεώρησης είναι η τιμή της κρίσιμης επιτάχυνσης να παραμένει σταθερή κατά τη διάρκεια της ολίσθησης. Προκειμένου να υπολογιστεί η συνθήκη έναρξης της ολίσθησης ή αλλιώς η κρίσιμη επιτάχυνση για την περίπτωση της συζευγμένης απόκρισης χρησιμοποιήθηκε το προσομοίωμα που προτάθηκε από τους Westermo and Udawadia (1983) (βλ. Σχήμα 5.15).

Οι Westermo and Udawadia (1983) θεώρησαν την περίπτωση αρμονικής κίνησης, δηλαδή ότι η επιβαλλόμενη επιτάχυνση χαρακτηρίζεται από ημιτονική κατανομή και προσδιόρισαν τη συνθήκη ολίσθησης έπειτα από την αναλυτική επίλυση των

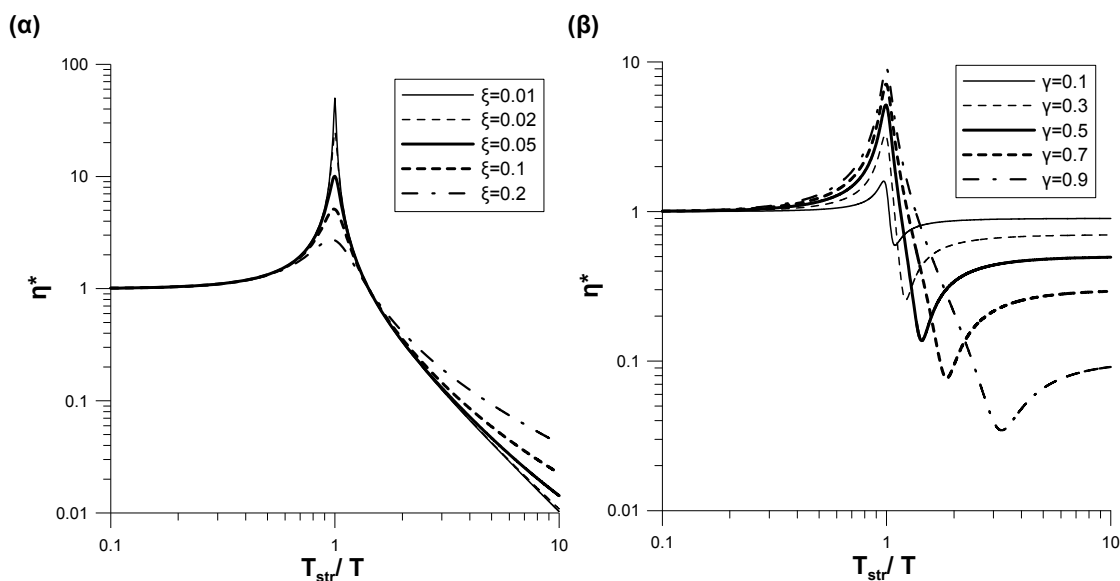
διαφορικών εξισώσεων ισορροπίας. Ως συνθήκη ολίσθησης ορίστηκε η μέγιστη τιμή, την οποία μπορεί να λαμβάνει ο λόγος του γινομένου της εφαπτομένης της γωνίας τριβής της διεπιφάνειας με την επιτάχυνση της βαρύτητας προς τη μέγιστη επιβαλλόμενη επιτάχυνση ( $\tan\phi^*g/\alpha_{\max}$ ), ώστε να είναι εφικτή η ανάπτυξη σχετικών μετακινήσεων. Η μέγιστη τιμή του προαναφερθέντος λόγου συμβολίζεται με  $\eta^*$  και για κάθε τιμή του λόγου  $\tan\phi^*g/\alpha_{\max}$  μικρότερη από αυτή αναπτύσσεται ολίσθηση κατά μήκος της διεπιφάνειας. Στην αναλυτική λύση υπολογισμού του  $\eta^*$  συνεκτιμήθηκε στην εργασία των Westermo and Udvardia (1983) μόνο η μόνιμη συνιστώσα της απόκρισης (steady state response).



**Σχήμα 5.15.** Σχηματική απεικόνιση του απλοποιητικού μονοβάθμιου προσομοιώματος που προτάθηκε από τους Westermo and Udvardia (1983) για την εκτίμηση της συζευγμένης απόκρισης-ολίσθησης σε συστήματα σεισμικής μόνωσης.

Στο Σχήμα 5.16α παρατίθενται τα αποτελέσματα της υφιστάμενης αναλυτικής λύσης για διάφορες τιμές της απόσβεσης θεωρώντας ότι ο λόγος των μαζών  $\gamma$ , ο οποίος ισούται με τον λόγο της μάζας που ταλαντώνεται προς τη συνολική μάζα του συστήματος ( $M/(m+M)$ ), ισούται με τη μονάδα. Αυτό σημαίνει ότι στη βάση του μονοβάθμιου ταλαντωτή εφαρμόζεται πρακτικά μηδενική μάζα. Αρχικά παρατηρείται ότι, το άνω όριο του λόγου  $\tan\phi^*g/\alpha_{\max}$  ώστε να είναι εφικτή η ανάπτυξη ολίσθησης, μπορεί να λαμβάνει τιμές μεγαλύτερες της μονάδας σε αντίθεση με την κλασσική θεώρηση κατά Newmark (1965). Πιο συγκεκριμένα, στην περιοχή του συντονισμού η ολίσθηση μπορεί να λάβει χώρα ακόμη και για τιμές του λόγου  $\tan\phi^*g/\alpha_{\max}$  ίσες με 50, φαινόμενο που οφείλεται στην ένταση των αδρανειακών δυνάμεων κατά τον συντονισμό. Η αύξηση της απόσβεσης περιορίζει την αύξηση των τιμών της παραμέτρου  $\eta^*$  μέχρι την συνθήκη του συντονισμού. Για τιμές του λόγου της ιδιοπεριόδου της κατασκευής προς την περίοδο της ημιτονικής φόρτισης μεγαλύτερες της μονάδας οι τιμές της παραμέτρου  $\eta^*$  μειώνονται, καθώς η αδρανειακή δύναμη του μονοβάθμιου ταλαντωτή είναι εκτός φάσης με την επιβαλλόμενη φόρτιση. Η αύξηση της απόσβεσης σε αυτήν την περίπτωση

επιδρά ανασταλτικά στη μείωση του  $\eta^*$ , δηλαδή αυξάνει το άνω όριο του λόγου  $\tan\phi^*g/\alpha_{\max}$  ώστε να είναι εφικτή η ανάπτυξη ολίσθησης.



**Σχήμα 5.16.** Κατανομή της μέγιστης τιμής του λόγου  $\tan\phi^*g/\alpha_{\max}$  ώστε να είναι εφικτή η ανάπτυξη της ολίσθησης ( $\eta^*$ ) συναρτήσει του λόγου της ιδιοπεριόδου της κατασκευής προς την περίοδο της επιβαλλόμενης επιτάχυνσης. Τα αποτελέσματα παρατίθενται για: (α) τιμή του λόγου μαζών ( $\gamma$ ) ίση με τη μονάδα και διάφορες τιμές της απόσβεσης ( $\xi$ ), και (β) τιμή της απόσβεσης ίση με 5% και διάφορες τιμές του λόγου μαζών.

Παράλληλα εξετάστηκε και η επίδραση του λόγου των μαζών  $\gamma$ , διαμορφώνοντας τις κατανομές της παραμέτρου  $\eta^*$  συναρτήσει του λόγου της ιδιοπεριόδου της κατασκευής προς την περίοδο της αρμονικής φόρτισης (βλ. Σχήμα 5.16β). Παρατηρείται ότι η μείωση της μάζας που ταλαντώνεται (μείωση του λόγου  $\gamma$ ) συντελεί στην μείωση της αναπτυσσόμενης αδρανειακής δύναμης και συνεπώς και της παραμέτρου  $\eta^*$ , για τιμές του λόγου  $T_{\text{str}}/T$  μικρότερες της μονάδας. Καθώς όμως απομακρυνόμαστε από την περιοχή του συντονισμού, οι μικρές τιμές του  $\gamma$  σχετίζονται με μεγαλύτερες τιμές του  $\eta^*$ . Ταυτόχρονα για μεγάλες τιμές του λόγου  $T_{\text{str}}/T$ , η παράμετρος  $\eta^*$  τείνει προς τιμή ίση με  $1-\gamma$ .

Η παράμετρος  $\eta^*$  παρόλο που μας δίνει μία εποπτική εικόνα του φαινομένου, αφενός αποτελεί το άνω όριο για την ανάπτυξη της ολίσθησης, αφετέρου έχει υπολογιστεί θεωρώντας μόνο τη μόνιμη συνιστώσα της απόκρισης. Η διαφορική εξίσωση της ισορροπίας του συστήματος κατά την έναρξη της ολίσθησης επιλύθηκε θεωρώντας την προσωρινή και τη μόνιμη συνιστώσα της απόκρισης, υπολογίζοντας με αυτόν τον τρόπο την κρίσιμη επιτάχυνση για την έναρξη της ολίσθησης. Πιο

συγκεκριμένα, θεωρήθηκε ότι το σύνολο της μάζας του συστήματος ταλαντώνεται ( $\gamma=1$ ) και η διαφορική εξίσωση που προέκυψε είναι:

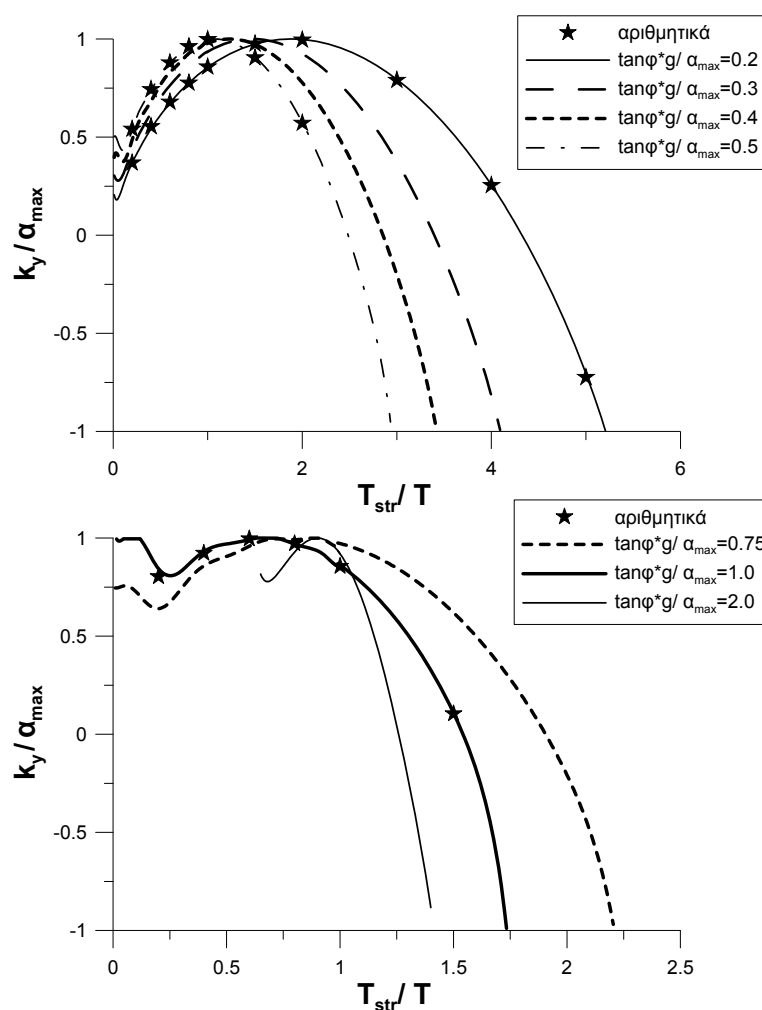
$$|\ddot{x} + \alpha_{\max} \sin \omega_1 t| = \tan \phi * g \quad (5.3)$$

όπου  $\ddot{x}$  η σχετική επιτάχυνση του μονοβάθμιου ταλαντωτή,  $\alpha_{\max}$  η μέγιστη επιτάχυνση της επιβαλλόμενης κίνησης,  $\omega_1$  η κυκλική συχνότητα της επιβαλλόμενης κίνησης και  $\phi$  η γωνία τριβής της διεπιφάνειας.

Αντικαθιστώντας στην (5.3) τη σχετική επιτάχυνση του μονοβάθμιου ταλαντωτή όπως προκύπτει από τη διπλή διαφορίση της σχετικής μετακίνησης λόγω επιβαλλόμενης αρμονικής φόρτισης, η εξίσωση μπορεί να επιλυθεί και να υπολογιστεί η χρονική στιγμή έναρξης της ολίσθησης. Έπειτα από την χρονική στιγμή έναρξης της ολίσθησης υπολογίζεται η αντίστοιχη τιμή της επιβαλλόμενης επιτάχυνσης, ή αλλιώς η κρίσιμη επιτάχυνση. Στο Σχήμα 5.17 παρουσιάζεται ο λόγος της κρίσιμης επιτάχυνσης προς τη μέγιστη επιβαλλόμενη επιτάχυνση ( $k_y/\alpha_{\max}$ ) συναρτήσει του λόγου της ιδιοπεριόδου της κατασκευής προς την περίοδο της αρμονικής φόρτισης ( $T_{str}/T$ ), για διάφορες τιμές του λόγου  $\tan\phi * g/\alpha_{\max}$ . Σημειώνεται επίσης, ότι τα αποτελέσματα της αναλυτικής λύσης επαληθεύθηκαν έπειτα από αριθμητικές αναλύσεις των αντίστοιχων μονοβάθμιων συστημάτων με τον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS (2004). Τα αριθμητικά αποτελέσματα φαίνονται με τη μορφή συμβόλων, σε αντιπαράθεση με τα αντίστοιχα της αναλυτικής λύσης (συνεχείς γραμμές) στο Σχήμα 5.17.

Αρχικά παρατηρείται ότι, για πολύ μικρές τιμές του λόγου  $T_{str}/T$  η κρίσιμη επιτάχυνση είναι ίση με την αντίστοιχη που προκύπτει από την κλασσική θεώρηση του Newmark (1965), δηλαδή ίση με  $\tan\phi * g$ . Επιπλέον, είναι εμφανές ότι η διακόμανση της κρίσιμης επιτάχυνσης αποτελείται από δύο χαρακτηριστικά τμήματα, ένα τμήμα της αυξάνεται συναρτήσει του λόγου  $T_{str}/T$ , ενώ το αντίθετο ισχύει για το δεύτερο. Η παρατήρηση αυτή σχετίζεται με το γεγονός ότι οι αδρανειακές δυνάμεις λόγω της ταλάντωσης αυξάνονται, μειώνοντας τη συνολική δύναμη στο επίπεδο ολίσθησης για μικρές τιμές του λόγου  $T_{str}/T$ . Επιπλέον, διαπιστώνεται ότι η μέγιστη τιμή είναι πάντα ίση με τη μονάδα και εντοπίζεται σε διαφορετική τιμή του λόγου  $T_{str}/T$  αναλόγως με την τιμή του λόγου  $\tan\phi * g/\alpha_{\max}$ . Πιο συγκεκριμένα, καθώς μειώνεται ο λόγος  $\tan\phi * g/\alpha_{\max}$  αυξάνεται η τιμή του λόγου  $T_{str}/T$  στην οποία αντιστοιχεί η μέγιστη τιμή της κρίσιμης επιτάχυνσης.

Στο δεύτερο τμήμα της κατανομής η κρίσιμη επιτάχυνση μειώνεται συναρτήσει του λόγου  $T_{str}/T$  λαμβάνοντας ακόμη και αρνητικές τιμές. Αυτή η συμπεριφορά αποδίδεται στο γεγονός ότι, για υψηλές τιμές του λόγου  $T_{str}/T$  η απόκριση του μονοβάθμιου ταλαντωτή είναι εκτός φάσης με την επιβαλλόμενη κίνηση, ώστε να απαιτείται αναστροφή της κίνησης προκειμένου να προκληθεί ολίσθηση. Επιπλέον, διαπιστώνεται ότι η ολίσθηση είναι δυνατό να λάβει χώρα ακόμη και για τιμές του  $\tan\phi^*g/\alpha_{max}$  μεγαλύτερες της μονάδας, ειδικά όταν ο λόγος  $T_{str}/T$  κυμαίνεται μεταξύ 0.5 και 1.5.



**Σχήμα 5.17.** Κατανομή του λόγου της κρίσιμης επιτάχυνσης προς την αντίστοιχη τιμή της μέγιστης επιβαλλόμενης επιτάχυνσης ( $k_y/\alpha_{max}$ ) συναρτήσει του λόγου της ιδιοπεριόδου του μονοβάθμιου ταλαντωτή προς την περίοδο της αρμονικής φόρτισης. Τα αποτελέσματα υπολογίστηκαν για τιμή του λόγου μαζών ίση με τη μονάδα και απόσβεση ίση με 5%. Με σύμβολα αναπαρίστανται τα αντίστοιχα αποτελέσματα από αριθμητικές αναλύσεις.

Επιπροσθέτως, παρατηρείται ότι για κάθε τιμή του λόγου  $\tan\phi^*g/\alpha_{max}$  υφίσταται μια οριακή τιμή του λόγου της ιδιοπεριόδου της κατασκευής προς την περίοδο του ημιτονικού παλμού πέραν της οποίας δεν είναι εφικτή η ανάπτυξη της ολίσθησης.

Εναλλακτικά θα μπορούσε να ειπωθεί ότι, για κάθε τιμή του λόγου  $T_{str}/T$  υπάρχει μία μέγιστη τιμή του λόγου  $\tan\phi^*g/a_{max}$  για να είναι εφικτή η ολίσθηση. Υπενθυμίζεται ότι η τελευταία αυτή πρόταση αποτελεί τον ορισμό του  $\eta^*$ . Για τον λόγο αυτό παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.1 τα αντίστοιχα αποτελέσματα από τις δύο αναλυτικές λύσεις.

**Πίνακας 5.1.** Οριακές τιμές του λόγου  $\tan\phi^*g/a_{max}$  για κάθε τιμή του λόγου  $T_{str}/T$ , υπολογιζόμενες από την προτεινόμενη αναλυτική λύση σε αντιπαράθεση με τις αντίστοιχες τιμές του  $\eta^*$ .

| $T_{str}/T$ | $\tan\phi^*g/a_{max}$ | $\eta^*$ |
|-------------|-----------------------|----------|
| 5.1         | 0.20                  | 0.05     |
| 3.9         | 0.30                  | 0.08     |
| 3.3         | 0.40                  | 0.11     |
| 2.9         | 0.50                  | 0.14     |
| 2.1         | 0.75                  | 0.30     |
| 1.6         | 1.00                  | 0.65     |
| 1.4         | 2.00                  | 1.04     |

Διαπιστώνεται ότι, λαμβάνοντας υπόψη τόσο την προσωρινή όσο και τη μόνιμη συνιστώσα της απόκρισης, εκτιμώνται μεγαλύτερα άνω όρια του λόγου  $\tan\phi^*g/a_{max}$ , τουλάχιστον για τιμές του λόγου της ιδιοπεριόδου της κατασκευής προς τη περίοδο του ημιτονικού παλμού μεγαλύτερες της μονάδας. Το γεγονός αυτό υποδεικνύει ότι προβλέπεται αστάθεια, δηλαδή δυνατότητα ανάπτυξης ολίσθησης για περισσότερες περιπτώσεις.

Η επίδραση των επιμέρους παραμέτρων του εξεταζόμενου συστήματος στην υπολογιζόμενη κρίσιμη επιτάχυνση, δηλαδή της απόσβεσης και του λόγου μαζών, είναι αντίστοιχη με την επίδραση στην παράμετρο  $\eta^*$ . Πιο συγκεκριμένα, η διαφορική εξίσωση της οριακής ισορροπίας διαμορφώνεται σε:

$$|\gamma\ddot{x} + \alpha_{max} \sin \omega_1 t| = \tan \phi^* g \quad (5.4)$$

όπου  $\gamma$  ο λόγος της μάζας που ταλαντώνεται προς τη συνολική μάζα του συστήματος,  $\ddot{x}$  η σχετική επιτάχυνση του μονοβάθμιου ταλαντωτή,  $\alpha_{max}$  η μέγιστη επιτάχυνση της επιβαλλόμενης κίνησης,  $\omega_1$  η κυκλική συχνότητα της επιβαλλόμενης κίνησης και  $\phi$  η γωνία τριβής της διεπιφάνειας. Η επίλυση της σχέσης (5.4) μπορεί να προσδιοριστεί κατ'



αντιστοιχία με την (5.3) και να προκύψουν παρόμοια γραφήματα με αυτά του Σχήματος 5.17.

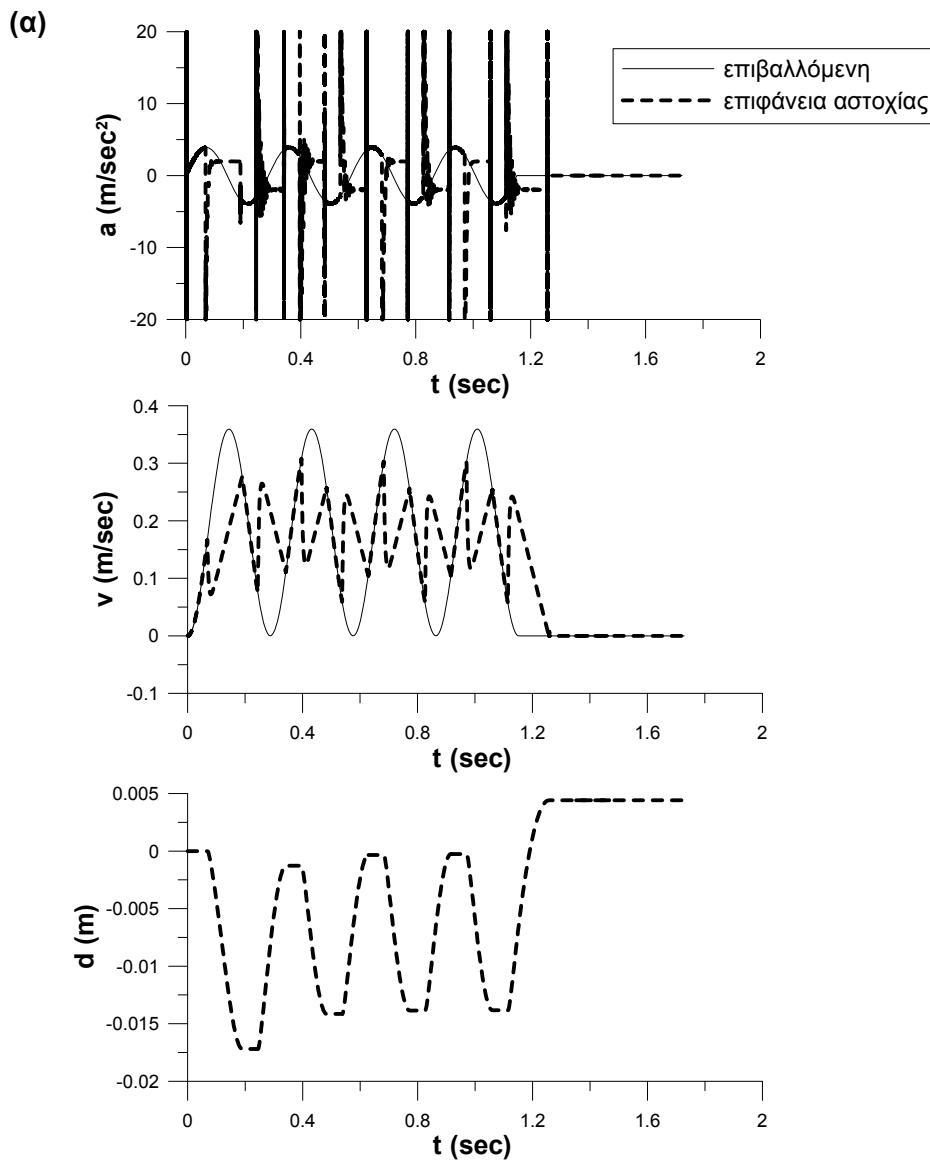
### **Μετακινήσεις – Δυναμική απόκριση**

Η εκτίμηση της σεισμικής ευστάθειας προσεγγίζεται εκτός από τον προσδιορισμό της κρίσιμης επιτάχυνσης και με τον υπολογισμό των σεισμικών μετακινήσεων. Στην παρούσα διερεύνηση καταστρώθηκαν απλά αριθμητικά προσομοιώματα προκειμένου να υπολογιστεί η αναπτυσσόμενη ολίσθηση, να εξεταστεί η επίδραση των παραδοχών της συζευγμένης προσομοίωσης στα εξαγόμενα αποτελέσματα και να προσδιοριστεί ο ρόλος των σημαντικότερων παραμέτρων του προβλήματος.

Για τον σκοπό αυτό προσομοιώθηκε στον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS (2004), ένας μονοβάθμιος ταλαντωτής με δυνατότητα ανάπτυξης ολίσθησης στη βάση του, ώστε να αποδοθεί η συμπεριφορά του συστήματος που απεικονίζεται στο Σχήμα 5.15. Το προσομοίωμα αυτό αποτελείται από τα εξής τέσσερα διακριτά μέρη: (α) στοιχείο συγκεντρωμένης μάζας (m), (β) αποσβεστήρας (c), (γ) στοιχεία δοκού (k), και (δ) στοιχείο επαφής. Η μηχανική συμπεριφορά της επιφάνειας επαφής χαρακτηρίζεται ως απολύτως δύσκαμπτη στην κατακόρυφη διεύθυνση και ως απολύτως πλαστική (χωρίς δυνατότητα ανάπτυξης ελαστικής παραμόρφωσης) στην οριζόντια διεύθυνση, με διατμητική αντοχή που χαρακτηρίζεται από τριβή τύπου Coulomb. Επιπροσθέτως, η δυναμική απόκριση του συστήματος προσδιορίστηκε για αρμονική φόρτιση, δηλαδή επιβαλλόμενη επιτάχυνση ημιτονοειδούς μορφής, η οποία αποτελούνταν από τέσσερις κύκλους φόρτισης.

Τα αποτελέσματα της αριθμητικής επίλυσης του εν λόγω προσομοιώματος, για διάφορες τιμές των βασικών παραμέτρων, σε όρους κρίσιμης επιτάχυνσης επιβεβαιώνουν τα αποτελέσματα της αναλυτικής επίλυσης, όπως παρουσιάστηκε και στο Σχήμα 5.17. Μια εποπτική απεικόνιση της διαδικασίας συσσώρευσης της ολίσθησης στη βάση του μονοβάθμιου ταλαντωτή φαίνεται στο Σχήμα 5.18. Πιο συγκεκριμένα, διακρίνονται οι χρονοϊστορίες της επιτάχυνσης και της ταχύτητας της επιβαλλόμενης κίνησης και της επιφάνειας αστοχίας, καθώς και η χρονοϊστορία της σχετικής μετακίνησης (ολίσθησης), για την περίπτωση του συντονισμού και για τιμή του λόγου  $\tan\phi \cdot g / \alpha_{\max}$  ίση με 0.5. Σημειώνεται ότι, σε αυτήν την περίπτωση η κρίσιμη επιτάχυνση για την έναρξη της ολίσθησης λαμβάνει τη μέγιστη τιμή της, δηλαδή ισούται με τη μέγιστη επιβαλλόμενη επιτάχυνση.

Γενικά παρατηρείται ότι η απόκριση αποτελείται από διαδοχικές φάσεις ολίσθησης-μη ολίσθησης. Σημειώνεται ότι ως κύκλος ολίσθησης ορίζεται ως το χρονικό διάστημα που περιλαμβάνει δύο διαδοχικές φάσεις μη ολίσθησης-ολίσθησης. Η έναρξη της ολίσθησης ουσιαστικά μεταβάλλει το σύστημα των διαφορικών εξισώσεων που ορίζουν την δυναμική απόκριση.



**Σχήμα 5.18.** Χρονοϊστορίες της επιβαλλόμενης επιτάχυνσης/ταχύτητας, της επιτάχυνσης/ταχύτητας της επιφάνειας αστοχίας, και της συσσωρευόμενης ολίσθησης. Τα αποτελέσματα αντιστοιχούν σε προσομοίωμα χωρίς την προσθήκη μάζας στο επίπεδο ολίσθησης, σε συνθήκες συντονισμού και τιμή του λόγου  $\tan\phi \cdot g/\alpha_{\max}$  ίση με 0.5.

Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μηδενίζεται η σχετική επιτάχυνση  $\ddot{x}$  κατά τη διάρκεια της ολίσθησης, για τη συγκεκριμένη περίπτωση που ο λόγος μαζών είναι ίσος με τη μονάδα. Για τον λόγο αυτό η κρίσιμη επιτάχυνση κατά τη διάρκεια της ολίσθησης

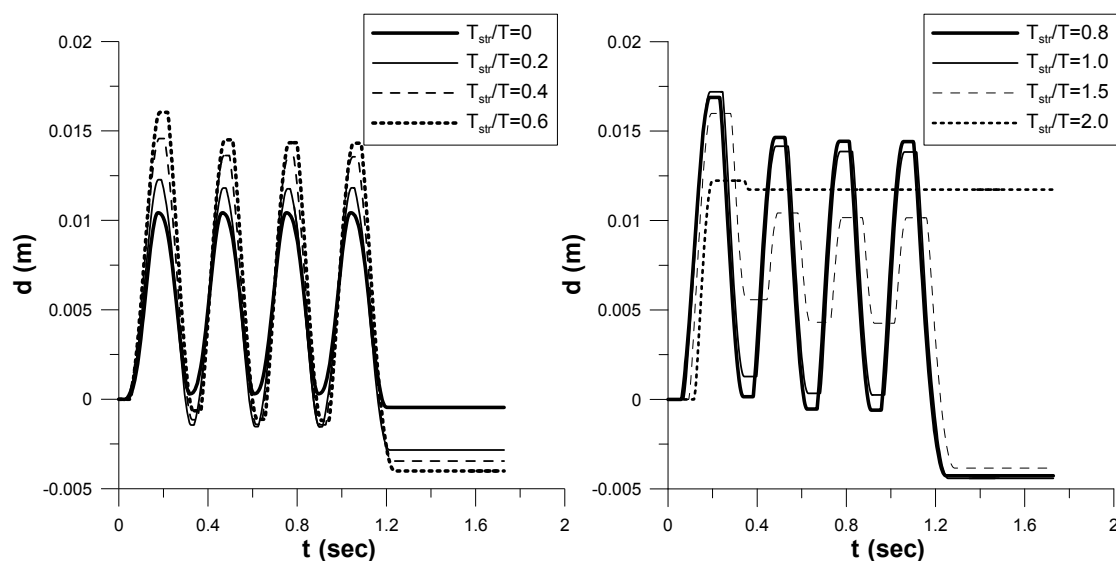
γίνεται ίση με την αντίστοιχη της κλασσικής θεώρησης κατά Newmark (1965), δηλαδή  $\tan\phi^*g$ . Επιπλέον, η μέγιστη απόκριση του μονοβάθμιου ταλαντωτή περιορίζεται από την κρίσιμη επιτάχυνση, σε πλήρη αντιστοιχία με τη συμπεριφορά ενός απολύτως άκαμπτου συστήματος.

Για κάθε επόμενη φάση ολίσθησης-μη ολίσθησης, η οποία χαρακτηρίζεται από τις αντίστοιχες διαφορικές εξισώσεις, η εύρεση της χρονικής στιγμής της έναρξης της ολίσθησης απαιτεί την εφαρμογή διαφορετικών αρχικών συνθηκών. Για τον λόγο αυτό η κρίσιμη επιτάχυνση για την έναρξη της ολίσθησης διαφέρει σε κάθε φάση ολίσθησης. Εν κατακλείδι, αυτή η σύνθετη διαδικασία αλληλεπίδρασης της ολίσθησης και της δυναμικής απόκρισης σχετίζεται με τη μη μηδενική τιμή της παραμένουσας ολίσθησης μετά το πέρας του πρώτου κύκλου ολίσθησης, σε αντίθεση με την περίπτωση ολίσθησης απολύτως άκαμπτου τεμάχους, όπου η παραμένουσα ολίσθηση μετά τον κάθε κύκλο ολίσθησης είναι μηδενική. Επιπροσθέτως, η συμπεριφορά αυτή μεγενθύνεται μετά το πέρας των τεσσάρων κύκλων ολίσθησης, όπου η παραμένουσα ολίσθηση λαμβάνει τη μέγιστη τιμή της.

Η ανάλυση της δυναμικής συμπεριφοράς του εξεταζόμενου συστήματος αποδεικνύει ότι η επίδραση της ευκαμψίας της κατασκευής στην αναπτυσσόμενη ολίσθηση θα είναι αναμφισβήτητα σημαντική. Για τον λόγο αυτό προσδιορίστηκε η δυναμική απόκριση αντίστοιχων προσομοιωμάτων διαφορετικής ευκαμψίας, έτσι προέκυψαν διάφορες τιμές του λόγου της ιδιοπεριόδου της κατασκευής προς την περίοδο της ημιτονικής επιβαλλόμενης επιτάχυνσης ( $T_{str}/T$ ). Στο Σχήμα 5.19 φαίνονται οι χρονοϊστορίες της αθροιστικής ολίσθησης για την περίπτωση που ο λόγος  $\tan\phi^*g/\alpha_{max}$ , είναι ίσος με 0.5 και για τιμές του λόγου  $T_{str}/T$  που κυμαίνονται μεταξύ 0.2 και 2.0. Για ευθεία αντιπαραβολή με το κλασσικό προσομοίωμα Newmark (1965) παρατίθενται και τα αντίστοιχα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εφαρμογή του, δηλαδή για μηδενική τιμή του λόγου  $T_{str}/T$ .

Αρχικά διαπιστώνεται ότι υφίσταται η αντίστοιχη διαφοροποίηση που ισχύει και για την κρίσιμη επιτάχυνση, ότι δηλαδή η συμπεριφορά του συστήματος μπορεί να διαχωριστεί βάσει του λόγου της ιδιοπεριόδου του συστήματος προς την περίοδο της αρμονικής φόρτισης σε δύο μέρη: (α) για τιμές του λόγου  $T_{str}/T$  μικρότερες της μονάδας, και (β) για τιμές του λόγου  $T_{str}/T$  μεγαλύτερες της μονάδας. Για την πρώτη περίπτωση και τον πρώτο κύκλο ολίσθησης παρατηρείται ότι καθώς μεγαλώνει ο λόγος  $T_{str}/T$ ,

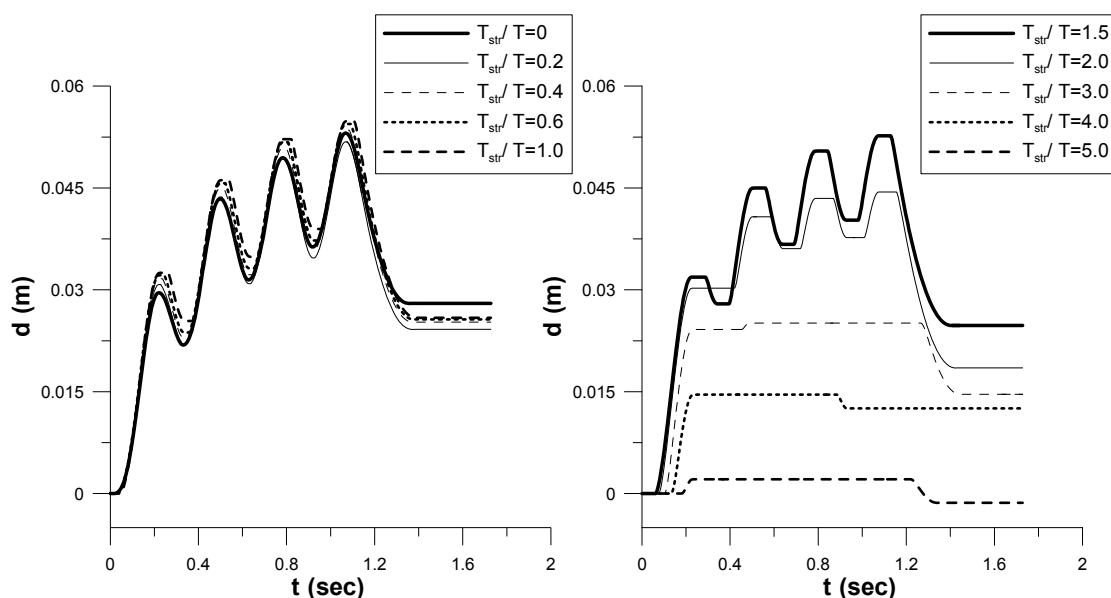
αυξάνεται μεν η κρίσιμη επιτάχυνση για την πρώτη φάση ολίσθησης μειώνοντας τη χρονική διάρκεια της ολίσθησης, αλλά τελικά αυξάνεται και η σχετική ολίσθηση. Το πέρας του πρώτου κύκλου ολίσθησης (τέλος της δεύτερης φάσης ολίσθησης) σχετίζεται με παραμένουσα ολίσθηση η οποία επίσης αυξάνεται καθώς προσεγγίζεται η συνθήκη συντονισμού. Για τη δεύτερη περίπτωση ( $T_{str}/T > 1$ ) διαπιστώνεται ότι κατά το τέλος του πρώτου κύκλου ολίσθησης το μέγεθος της παραμένουσας ολίσθησης είναι σαφώς μεγαλύτερο, χωρίς όμως αυτό να συνεπάγεται απαραίτητως αντίστοιχη συμπεριφορά και για το σύνολο της επιβαλλόμενης διέγερσης.



**Σχήμα 5.19.** Χρονοϊστορίες της αθροιστικής ολίσθησης κατά μήκος της βάσης του απλού μονοβάθμιου συστήματος, για διάφορες τιμές του λόγου της ιδιοπεριόδου του προσομοιώματος προς την περίοδο της αρμονικής επιβαλλόμενης επιτάχυνσης. Τα αποτελέσματα αντιστοιχούν σε τιμή του λόγου  $\tan\phi \cdot g / \alpha_{max}$  ίση με 0.5.

Ιδιαίτερα αυξημένη, σε σύγκριση με όλες τις λοιπές εξεταζόμενες περιπτώσεις, είναι η παραμένουσα ολίσθηση όταν η ιδιοπερίοδος του εξεταζόμενου συστήματος είναι περίπου διπλάσια της περιόδου της ημιτονικής φόρτισης. Η συμπεριφορά αυτή αποδίδεται στο γεγονός ότι οι αδρανειακές δυνάμεις λόγω της ταλάντωσης του μονοβάθμιου συστήματος είναι εκτός φάσης με την επιβαλλόμενη κίνηση οπότε μόνο ένας κύκλος ολίσθησης λαμβάνει χώρα (δύο διαδοχικές φάσεις μη ολίσθησης-ολίσθησης). Η συσσώρευση της ολίσθησης στον πρώτο κύκλο ολίσθησης οφείλεται αφενός μεν στο ότι καθυστερεί η ανάπτυξη της πρώτης φάσης ολίσθησης, αφετέρου δε στο ότι η χρονική διάρκεια της δεύτερης φάσης ολίσθησης είναι τόσο μειωμένη ώστε δεν αντιστρέφεται η συνολική μετακίνηση.

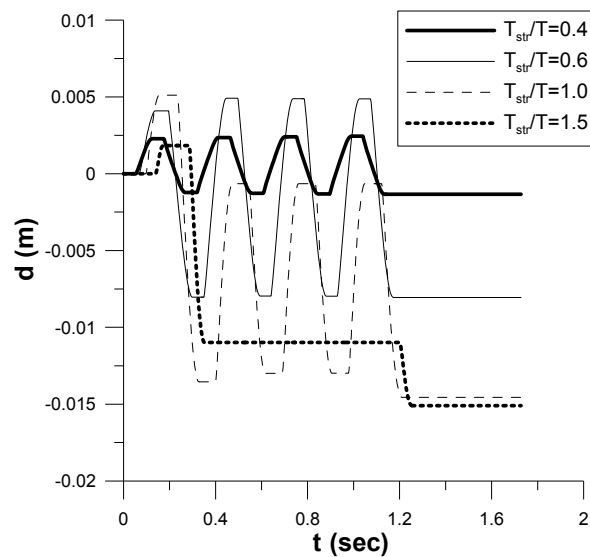
Από τη βιβλιογραφική επισκόπηση των συζευγμένων μεθόδων διαπιστώθηκε ότι, εκτός από τον λόγο της ιδιοπεριόδου της κατασκευής προς την περίοδο της ημιτονικής φόρτισης, σημαντικό ρόλο στη διαδικασία της δυναμικής απόκρισης αλλά και στην αναπτυσσόμενη ολίσθηση παίζει ο λόγος  $\tan\phi^*g/\alpha_{\max}$ . Συνεπώς, μελετήθηκε η αντίστοιχη συμπεριφορά εξετάζοντας παράλληλα και την μεταβολή του λόγου  $\tan\phi^*g/\alpha_{\max}$ . Η επίδραση της μείωσης του λόγου  $\tan\phi^*g/\alpha_{\max}$ , με τον τελευταίο να λαμβάνει τιμή ίση με 0.2, φαίνεται στο Σχήμα 5.20, ενώ η επίδραση της αύξησής του (λαμβάνοντας τιμή ίση με 1.0) παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.21. Η δυναμική συμπεριφορά του συστήματος για τιμή του λόγου  $\tan\phi^*g/\alpha_{\max}$  ίση με 0.2, μπορεί να ερμηνευτεί διαχωρίζοντας την σε δύο μέρη βάσει του λόγου της ιδιοπεριόδου του συστήματος προς την περίοδο της αρμονικής φόρτισης, παρομοίως με την περίπτωση όπου ο λόγος  $\tan\phi^*g/\alpha_{\max}$  ισούται με 0.5.



**Σχήμα 5.20.** Χρονοϊστορίες της αθροιστικής ολίσθησης κατά μήκος της βάσης του απλού μονοβάθμιου συστήματος, για διάφορες τιμές του λόγου της ιδιοπεριόδου του προσομοιώματος προς την περίοδο της αρμονικής επιβαλλόμενης επιτάχυνσης. Τα αποτελέσματα αντιστοιχούν σε τιμή του λόγου  $\tan\phi^*g/\alpha_{\max}$  ίση με 0.2.

Πιο συγκεκριμένα, στην πρώτη περίπτωση η αύξηση του λόγου  $T_{\text{str}}/T$  (αύξηση της ευκαμψίας) συντελεί στην αύξηση της παραμένουσας ολίσθησης μετά το πέρας του πρώτου κύκλου ολίσθησης συγκριτικά με την περίπτωση του άκαμπτου τεμάχους. Όμως η ολοκλήρωση των τεσσάρων κύκλων ολίσθησης καταλήγει σε παραμένουσα ολίσθηση μικρότερου μεγέθους για τα πιο εύκαμπτα προσομοιώματα. Αυτό σχετίζεται και με το γεγονός ότι για το απολύτως δύσκαμπτο σύστημα οι τέσσερις κύκλοι ολίσθησης δεν περιλαμβάνουν φάσεις μη ολίσθησης, αλλά δύο διαδοχικές φάσεις ολίσθησης με

διαφορετική φορά ανάπτυξης της σχετικής μετακίνησης. Για τη δεύτερη περίπτωση, ( $T_{str}/T > 1$ ) διαπιστώνεται ότι γενικά η δεύτερη φάση ολίσθησης σχετίζεται με ανάπτυξη ολίσθησης μικρότερου μεγέθους συγκριτικά με την πρώτη φάση ολίσθησης, αλλά μετά το πέρας των τεσσάρων κύκλων η παραμένουσα ολίσθηση μειώνεται σημαντικά αυξανόμενης της ευκαμψίας. Τελικά σχεδόν μηδενική ολίσθηση υπολογίζεται κατά τη δυναμική απόκριση προσομοιώματος με ιδιοπερίοδο πενταπλάσια της περιόδου της αρμονικής φόρτισης, γεγονός που συσχετίζεται και με την οριακή τιμή για ανάπτυξη ολίσθησης της συγκεκριμένης περίπτωσης (βλ. Πίνακα 5.1).



**Σχήμα 5.21.** Χρονοϊστορίες της αθροιστικής ολίσθησης κατά μήκος της βάσης του απλού μονοβάθμιου συστήματος, για διάφορες τιμές του λόγου της ιδιοπεριόδου του προσομοιώματος προς την περίοδο της αρμονικής επιβαλλόμενης επιτάχυνσης. Τα αποτελέσματα αντιστοιχούν σε τιμή του λόγου  $\tan\phi \cdot g / \alpha_{max}$  ίση με 1.0.

Η αύξηση της τιμής του λόγου  $\tan\phi \cdot g / \alpha_{max}$ , έτσι ώστε να ισούται με μονάδα, ουσιαστικά σημαίνει ότι δεν είναι εφικτή η ανάπτυξη ολίσθησης για την περίπτωση απολύτως δύσκαμπτου συστήματος. Όμως η ευκαμψία του συστήματος συντελεί στην ανάπτυξη σεισμικών μετακινήσεων στη βάση του εξεταζόμενου προσομοιώματος. Πιο συγκεκριμένα, κατά τον πρώτο κύκλο ολίσθησης παρατηρείται ότι η υπολογιζόμενη ολίσθηση της δεύτερης φάσης είναι μεγαλύτερη της αντίστοιχης κατά την πρώτη φάση ολίσθησης, με αποτέλεσμα να προκύψει παραμένουσα ολίσθηση. Οι επόμενοι κύκλοι ολίσθησης φαίνεται ότι έχουν ελάχιστη επίδραση στην παραμένουσα ολίσθηση συντελώντας στη διατήρησή της έως το πέρας της επιβαλλόμενης φόρτισης. Επιπλέον, η τιμή της τελικά συσσωρευόμενης ολίσθησης αυξάνεται καθώς το εξεταζόμενο σύστημα γίνεται πιο εύκαμπο. Στην ακραία περίπτωση, όπου η ιδιοπερίοδος του

προσομοιώματος είναι κατά 50% μεγαλύτερη της περιόδου της φόρτισης, η ολίσθηση λαμβάνει μεγαλύτερη τιμή συγκριτικά με αυτήν που θα αναμενόταν. Το γεγονός αυτό αποδίδεται στην ασύμμετρη ολίσθηση που λαμβάνει χώρα κατά τη διάρκεια ενός ολοκληρωμένου κύκλου ολίσθησης.

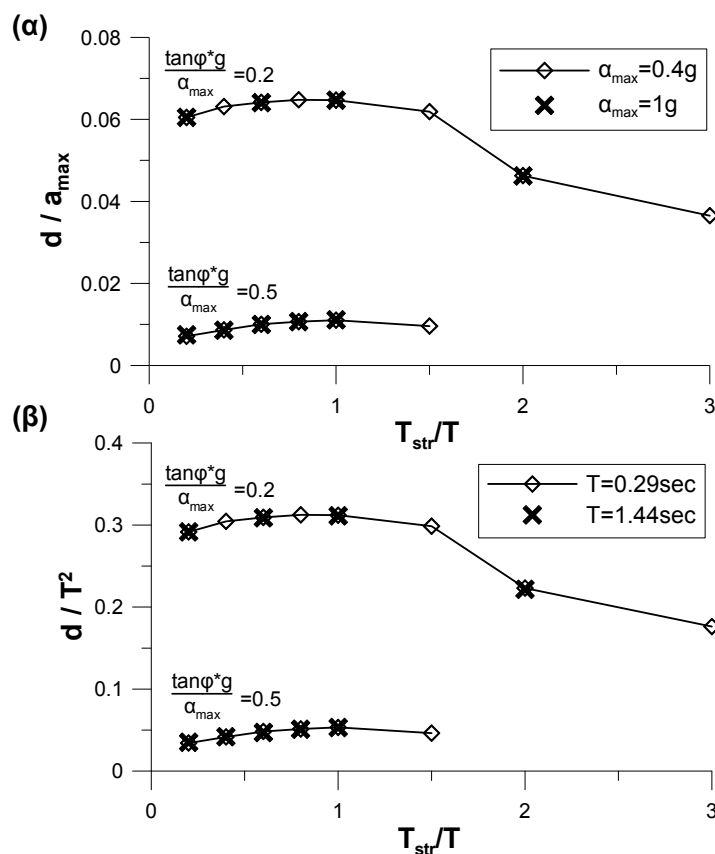
Τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων του απλού προσομοιώματος που παρουσιάστηκαν μέχρι στιγμής αφορούν στην επιβολή χρονοϊστορίας επιτάχυνσης με περίοδο ίση με 0.29sec και μέγιστη επιτάχυνση ίση με 0.4g. Είναι όμως ιδιαίτερα χρήσιμη η διερεύνηση της κανονικοποίησης των προηγθέντων σεισμικών μετακινήσεων σχετικά με τις παραμέτρους της επιβαλλόμενης κίνησης. Όπως αναφέρεται και από τους Cai and Bathurst (1996) υπάρχει μία κατηγορία πιθανοτικών μεθόδων προσδιορισμού της σεισμικής ολίσθησης που βασίστηκαν στο κλασσικό προσομοίωμα Newmark (1965), η οποία προτίνει την κανονικοποίηση της μετακίνησης με την μέγιστη επιτάχυνση και το τετράγωνο της περιόδου της διέγερσης. Στη συνέχεια παρουσιάζεται η εφαρμογή αυτής της κανονικοποίησης για την περίπτωση του εξεταζόμενου μονοβάθμιου συστήματος.

Για τον σκοπό αυτό πραγματοποιήθηκαν αριθμητικές αναλύσεις του συζευγμένου προσομοιώματος που έχει ήδη περιγραφεί για δύο διαφορετικές τιμές του λόγου  $\tan\phi \cdot g / a_{\max}$  (0.2 και 0.5) και διάφορες τιμές του λόγου της ιδιοπεριόδου του συστήματος προς την περίοδο της αρμονικής φόρτισης. Η κανονικοποίηση με τη μέγιστη τιμή της επιτάχυνσης ελέγχθηκε συγκρίνοντας αποτελέσματα που αναφέρονται στην ίδια τιμή του λόγου  $\tan\phi \cdot g / a_{\max}$ . Οι τιμές των επιμέρους παραμέτρων της προσομοίωσης φαίνονται στον Πίνακα 5.2.

**Πίνακας 5.2.** Τιμές των παραμέτρων προσομοίωσης για τη διερεύνηση της κανονικοποίησης της ολίσθησης με τη μέγιστη επιτάχυνση.

| $\tan\phi \cdot g / a_{\max}$ | $\tan\phi$ | $a_{\max}$ (g) |
|-------------------------------|------------|----------------|
| 0.2                           | 0.08       | 0.4            |
| 0.2                           | 0.20       | 1.0            |
| 0.5                           | 0.20       | 0.4            |
| 0.5                           | 0.50       | 1.0            |

Στο Σχήμα 5.22α παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων, και για τις δύο εξεταζόμενες τιμές του λόγου  $\tan\phi^*g/\alpha_{\max}$ . Είναι εμφανές ότι οι κανονικοποιημένες τιμές της παραμένουσας ολίσθησης ταυτίζονται, όταν αναφέρονται στην ίδια τιμή του λόγου  $\tan\phi^*g/\alpha_{\max}$  και στην ίδια τιμή του λόγου της ιδιοπεριόδου της κατασκευής προς την περίοδο της ημιτονικής φόρτισης. Επιπροσθέτως, εξετάστηκε η κανονικοποίηση ως προς την περίοδο της αρμονικής χρονοϊστορίας της επιβαλλόμενης επιτάχυνσης, θεωρώντας δύο διαφορετικές τιμές της παραμέτρου. Προκειμένου τα αποτελέσματα να αναφέρονται στην ίδια τιμή του λόγου της ιδιοπεριόδου του συστήματος προς την περίοδο της φόρτισης, τροποποιήθηκε η ιδιοπερίοδος του ταλαντωτή. Στο Σχήμα 5.22β φαίνεται ότι η κανονικοποιημένη ως προς το τετράγωνο της περιόδου ολίσθηση δεν εξαρτάται από την περίοδο της ημιτονικής φόρτισης.



**Σχήμα 5.22.** Κανονικοποίηση της παραμένουσας ολίσθησης του απλού μονοβάθμιου συστήματος σε σχέση με: (α) τη μέγιστη επιτάχυνση, και (β) το τετράγωνο της περιόδου της επιβαλλόμενης φόρτισης.

Πιο συγκεκριμένα, οι υπολογισθείσες τιμές της κανονικοποιημένης ολίσθησης ταυτίζονται για την επιβολή αρμονική φόρτισης με περίοδο ίση με 0.29sec και 1.44sec, εφόσον αναφέρονται στις ίδιες τιμές του λόγου της ιδιοπεριόδου της κατασκευής προς

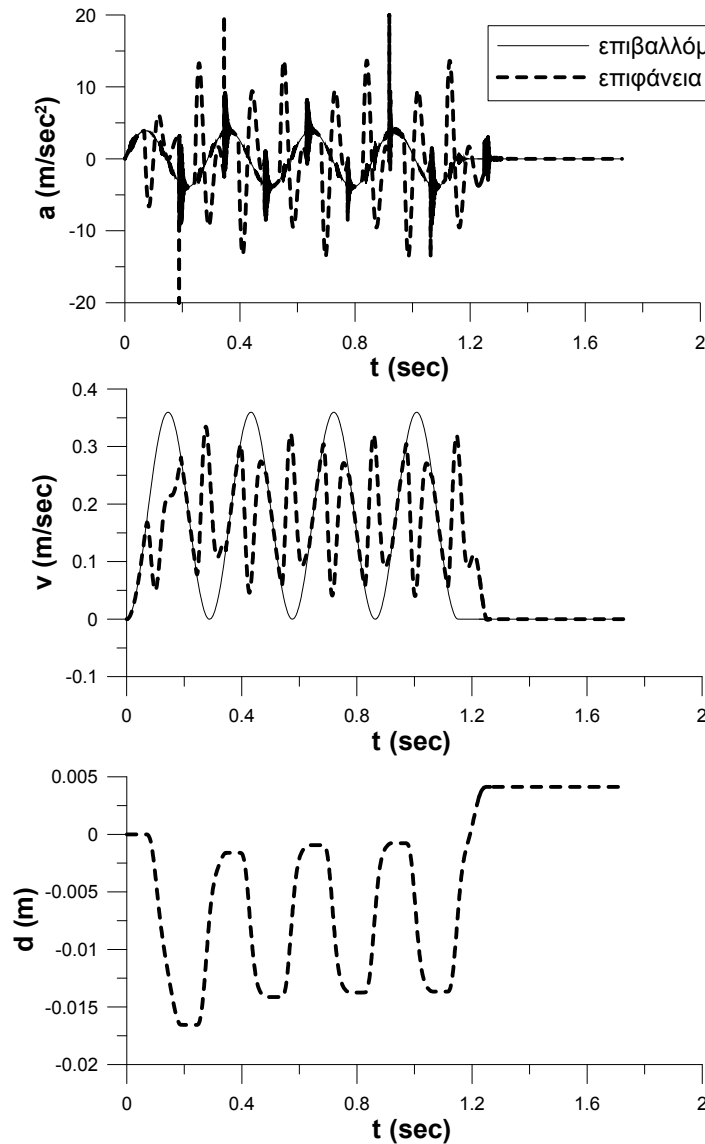


την περίοδο της φόρτισης και του λόγου  $\tan\phi^*g/\alpha_{\max}$ . Καταλήγοντας, συμπεραίνεται ότι η κανονικοποίηση των σεισμικών σχετικών μετακινήσεων του απλού μονοβάθμιου ταλαντωτή με ολίσθηση στη βάση του είναι εφικτή. Η επαλήθευση της κανονικοποίησης της δυναμικά συσσωρευόμενης ολίσθησης ως προς τη μέγιστη επιτάχυνση και το τετράγωνο της περιόδου της ημιτονικής διέγερσης, αποτελεί την επέκταση της εφαρμογής των Σχημάτων 5.19–5.21, εφόσον κανονικοποιηθούν ως προς τις προαναφερθείσες παραμέτρους.

Η ανάλυση που προηγήθηκε αφορά όπως έχει ήδη αναφερθεί ένα μονοβάθμιο ταλαντωτή με δυνατότητα ανάπτυξης ολίσθησης στη βάση του, δηλαδή το σύστημα που απεικονίζεται στο Σχήμα 5.15. Μία επιπλέον παραδοχή που έχει εφαρμοστεί σε αυτό το προσομοίωμα είναι η μηδενική μάζα στο επίπεδο ολίσθησης. Όμως συχνά στη βιβλιογραφία το εν λόγω προσομοίωμα αναλύεται θεωρώντας ότι μόνο ένα μέρος της μάζας ταλαντώνεται, μία παραδοχή που μπορεί να αντιστοιχιστεί με την ενεργή μάζα στην κύρια ιδιομορφή ταλάντωσης ενός συνεχούς συστήματος. Επιπλέον, συχνά η υστερητική απόσβεση σε αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων για τη διάδοση σεισμικών κυμάτων προσομοιώνεται με απόσβεση τύπου Rayleigh. Η απόσβεση τύπου Rayleigh χαρακτηρίζεται από το μειονέκτημα ότι δεν είναι ανεξάρτητη της συχνότητας απόκρισης του συστήματος. Αποτέλεσμα της εφαρμογής της απόσβεσης τύπου Rayleigh σε δυναμικές αριθμητικές αναλύσεις είναι να περιορίζεται η ακρίβεια των αριθμητικών αναλύσεων από το εύρος των συχνοτήτων στο οποίο εκτιμάται με ικανοποιητική ακρίβεια η απόσβεση. Παρακάτω εξετάζεται η επίδραση των δύο ανωτέρω βασικών παραδοχών της αριθμητικής προσομοίωσης στις υπολογισθείσες τιμές της μετακίνησης του εξεταζόμενου συστήματος.

Η επίδραση του λόγου της μάζας που ταλαντώνεται προς τη συνολική μάζα του συστήματος ( $\gamma$ ) στις υπολογιζόμενες μετακινήσεις μπορεί να εκτιμηθεί συγκρίνοντας τα αποτελέσματα της δυναμικής απόκρισης του αρχικού προσομοιώματος ( $\gamma=1$ ) με ένα νέο προσομοίωμα όπου ο λόγος μαζών είναι ίσος με 95%. Στο Σχήμα 5.23 φαίνονται οι χρονοϊστορίες της επιτάχυνσης και της ταχύτητας της επιβαλλόμενης κίνησης και της επιφάνειας αστοχίας (δηλαδή της κατώτερης μάζας), καθώς και η χρονοϊστορία της αναπτυσσόμενης ολίσθησης. Η προσθήκη μάζας στη βάση του μονοβάθμιου ταλαντωτή έχει ως συνέπεια τη μεταβολή των εξισώσεων δυναμικής ισορροπίας τόσο κατά τη φάση που δεν εμφανίζεται ολίσθηση όσο και κατά τη φάση της ολίσθησης. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η κρίσιμη επιτάχυνση για την έναρξη της ολίσθησης υπολογίζεται σύμφωνα

με τη σχέση (5.4), κατά συνέπεια η τιμή της κρίσιμης επιτάχυνσης μειώνεται καθώς η μάζα που εφαρμόζεται στο επίπεδο ολίσθησης αυξάνεται. Για μεγάλες τιμές του λόγου της ιδιοπεριόδου του μονοβάθμιου ταλαντωτή προς την περίοδο της επιβαλλόμενης αρμονικής η κρίσιμη επιτάχυνση προσεγγίζει την τιμή  $\tan\phi \cdot g / (1-\gamma)$ .



**Σχήμα 5.23.** Χρονοϊστορίες της επιβαλλόμενης επιτάχυνσης/ταχύτητας, της επιτάχυνσης/ταχύτητας της επιφάνειας αστοχίας και της αθροιστικής ολίσθησης. Τα αποτελέσματα αντιστοιχούν σε προσομοίωμα με τιμή του λόγου μαζών ίση με 0.95, σε συνθήκες συντονισμού και τιμή του λόγου  $\tan\phi \cdot g / \alpha_{\max}$  ίση με 0.5.

Εκτός από την τροποποίηση της κρίσιμης επιτάχυνσης για την έναρξη της ολίσθησης, η μείωση του λόγου μαζών σε τιμές μικρότερες της μονάδας συνιστά και τη μεταβολή των δυναμικών χαρακτηριστικών της απόκρισης κατά τη διάρκεια της ολίσθησης. Πιο συγκεκριμένα, η απόκριση του μονοβάθμιου ταλαντωτή είναι μη μηδενική κατά τη

διάρκεια της ολίσθησης ως απόρροια της αδρανειακής δύναμης που αναπτύσσεται στην κατώτερη μάζα. Συνεπώς, η απόκριση του μονοβάθμιου ταλαντωτή δεν περιορίζεται από την κρίσιμη επιτάχυνση του απολύτως δύσκαμπτου τεμάχους, όπως στην περίπτωση του  $\gamma=1$ . Επιπροσθέτως, η κρίσιμη επιτάχυνση κατά τη διάρκεια της ολίσθησης δεν είναι σταθερή αλλά μεταβάλλεται ως απόρροια της αναπτυσσόμενης σχετικής επιτάχυνσης του ταλαντωτή. Τα στοιχεία αυτά είναι εμφανή στο Σχήμα 5.23 και ιδιαίτερα από τη μη γραμμική κατανομή της ταχύτητας της επιφάνειας αστοχίας κατά τη διάρκεια της ολίσθησης. Η δυναμική αυτή αλληλεπίδραση της αδρανειακής απόκρισης του μονοβάθμιου ταλαντωτή και της αναπτυσσόμενης ολίσθησης έχει ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη μικρότερης σχετικής μετακίνησης κατά την πρώτη και δεύτερη φάση ολίσθησης. Η παραμένουσα ολίσθηση μετά το πέρας του πρώτου κύκλου είναι μεγαλύτερη συγκριτικά με την αντίστοιχη όπου δεν εφαρμόζεται μάζα στο επίπεδο ολίσθησης, αλλά η τελική παραμένουσα ολίσθηση έπειτα από τους τέσσερις επιβαλλόμενους κύκλους φόρτισης είναι ελάχιστα μικρότερη.

Αντίστοιχη είναι η επίδραση της μείωσης του λόγου μαζών του συστήματος και σύμφωνα με τα αποτελέσματα των αναλύσεων του προτεινόμενου προσομοιώματος από τους Kramer and Smith (1997). Δηλαδή, η μείωση του λόγου μαζών για τιμές του λόγου της ιδιοπεριόδου του συστήματος προς την περίοδο της διέγερσης μικρότερες της μονάδας, επιδρά στη μείωση της ολίσθησης, η οποία συγκλίνει προς τις τιμές της κλασσικής θεώρησης κατά Newmark (1965). Για μεγαλύτερες τιμές του λόγου της ιδιοπεριόδου του συστήματος προς την περίοδο της διέγερσης ισχύει το αντίθετο, γεγονός που αποδίδεται στη μείωση της κρίσιμης επιτάχυνσης. Πάντως, θα πρέπει να αναφερθεί ότι τα αποτελέσματα της εργασίας αυτής αναφέρονται σε πολύ μικρή τιμή του λόγου  $\tan\phi^*g/\alpha_{\max}$  (περίπου ίση με 0.15) γεγονός που υποδεικνύει ότι η αντίστοιχη συμπεριφορά θα πρέπει να επαληθευθεί και για μεγαλύτερες (πιο ρεαλιστικές) τιμές του λόγου αυτού.

Στη συνέχεια εξετάστηκε και η ορθότητα της εφαρμογής της απόσβεσης κατά Rayleigh. Ως γνωστόν, η απόσβεση Rayleigh εφαρμόζεται σε δύο τιμές της συχνότητας μέσω των σχέσεων εύρεσης των συντελεστών επί του μητρώου μάζας και επί του μητρώου ακαμψίας. Ένα από τα προβλήματα εφαρμογής της είναι η επιλογή των τιμών αυτών των δύο συχνότητων. Προκειμένου να επιτευχθεί η ακριβής απόκριση του μονοβάθμιου ταλαντωτή κατά την φάση της μη ολίσθησης, η πρώτη τιμή της συχνότητας θα πρέπει να ισούται με την ιδιοσυχνότητα του μονοβάθμιου ταλαντωτή.

Αντίστοιχα θα πρέπει να προσδιοριστεί και η συχνότητα στη φάση ολίσθησης προκειμένου να αποτελέσει τη δεύτερη συχνότητα. Η ιδιοσυχνότητα του συστήματος κατά τη διάρκεια της ολίσθησης σύμφωνα με την υφιστάμενη βιβλιογραφία αποτελεί ένα αμφιλεγόμενο ζήτημα, μιας και αλλού αναφέρεται ότι ισούται με τη διπλάσια ιδιοσυχνότητα του μη ολισθαίνοντος συστήματος (Rathje and Bray, 2000 και Rathje and Bray, 1999) και αλλού (Westermo and Udawadia, 1983 και Mostaghel et al., 1983) ότι ισούται με:

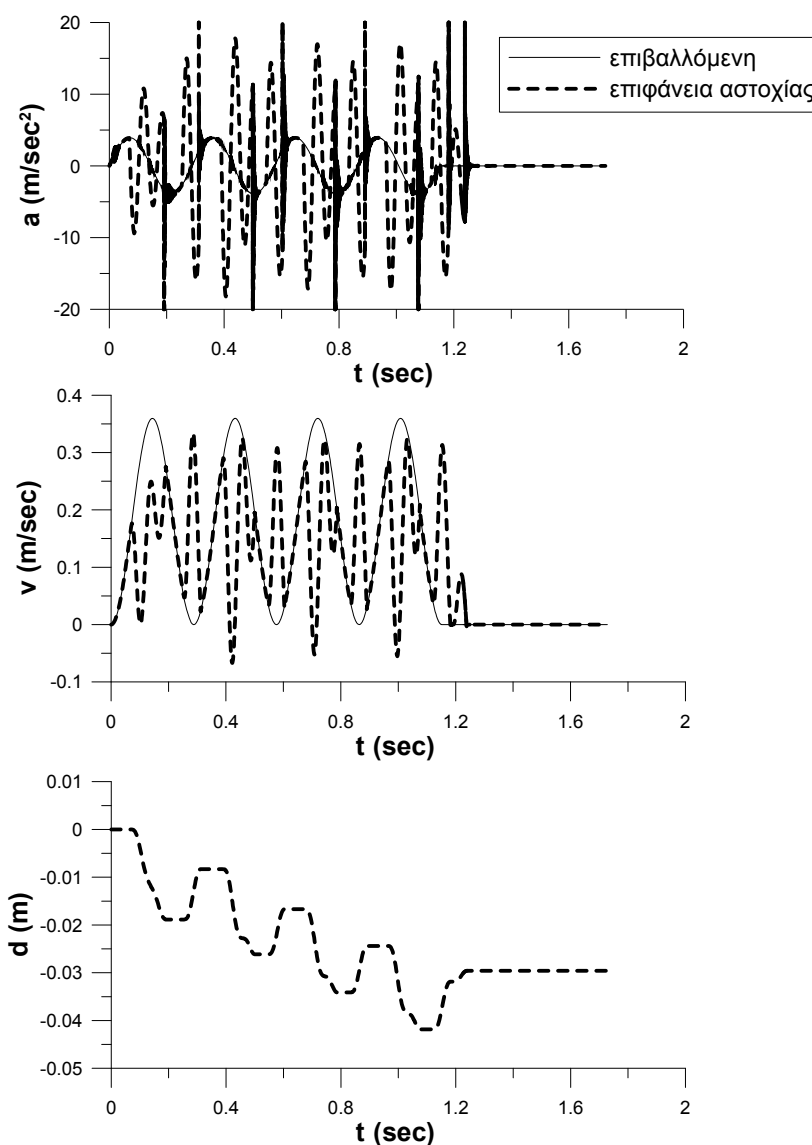
$$\omega'_n = \frac{\omega_n}{\sqrt{1-\gamma}} \quad (5.5)$$

όπου  $\gamma$  ο λόγος της μάζας που ταλαντώνεται προς τη συνολική μάζα του συστήματος,  $\omega_n$  η κυκλική ιδιοσυχνότητα του συστήματος, και  $\omega'_n$  η κυκλική ιδιοσυχνότητα του ολισθαίνοντος συστήματος.

Η τελευταία σχέση υποδεικνύει ότι η κυκλική ιδιοσυχνότητα του συστήματος θα είναι άπειρη όταν δεν εφαρμόζεται μάζα στο επίπεδο ολίσθησης. Για τον λόγο αυτό η επίδραση της απόσβεσης κατά Rayleigh εκτιμάται για τιμή του λόγου μαζών ίση με 0.95. Στο Σχήμα 5.24 διακρίνονται οι χρονοϊστορίες της επιτάχυνσης και της ταχύτητας της επιβαλλόμενης φόρτισης και της επιφάνειας αστοχίας (κατώτερη μάζα) καθώς και η αθροιστική ολίσθηση. Η περίπτωση αυτή αναφέρεται σε λόγο ιδιοπεριόδου του ταλαντωτή προς περίοδο της κίνησης ίσο με τη μονάδα, σε λόγο  $\tan\phi \cdot g / \alpha_{\max}$  ίσο με 0.5 και σε λόγο μαζών ίσο με 0.95. Η απόσβεση Rayleigh εφαρμόστηκε στη κύρια ιδιοσυχνότητα του συστήματος και στη διπλάσια αυτής.

Η διαφορά μεταξύ των δύο αριθμητικών παραδοχών γίνεται εμφανής κατά τη σύγκριση των Σχημάτων 5.23 και 5.24. Πιο συγκεκριμένα, παρατηρώντας τον πρώτο κύκλο ολίσθησης διαπιστώνεται ότι κατά την πρώτη φάση ολίσθησης η αθροιστική ολίσθηση είναι ελάχιστα μεγαλύτερη κατά την εφαρμογή της απόσβεσης τύπου Rayleigh. Αυτό αποδίδεται στη μειωμένη δύναμη απόσβεσης η οποία οδηγεί σε αυξημένη σχετική επιτάχυνση του ταλαντωτή και τελικά μεγαλύτερη ολίσθηση. Επίσης, η δεύτερη φάση ολίσθησης λαμβάνει χώρα με αρκετή χρονική υστέρηση σε σχέση με την περίπτωση της μη συχνοτικά εξαρτημένης απόσβεσης, λόγω της διαφοράς των αρχικών συνθηκών κατά την προηγούμενη φάση μη ολίσθησης. Δηλαδή, μετά το πέρας της πρώτης φάσης ολίσθησης η σχετική επιτάχυνση του μονοβάθμιου ταλαντωτή είναι μεγαλύτερη για την περίπτωση της απόσβεσης τύπου Rayleigh (λόγω της μειωμένης δύναμης απόσβεσης).

Επομένως, παρόλο που ανεξαρτήτως τύπου απόσβεσης η κίνηση χαρακτηρίζεται από την ίδια διαφορική εξίσωση, οι αρχικές συνθήκες διαφέρουν.

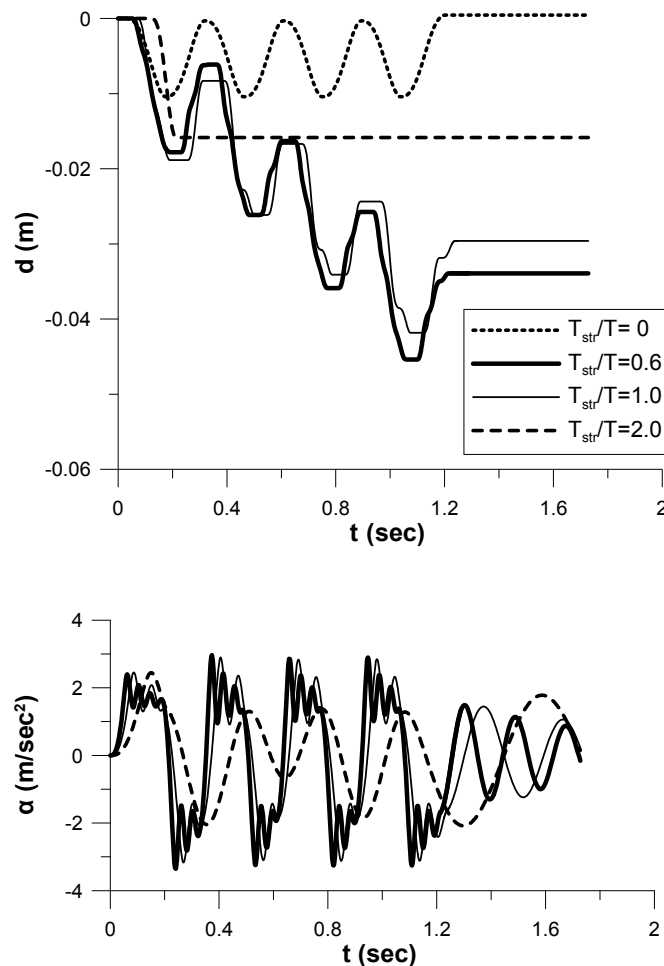


**Σχήμα 5.24.** Χρονοϊστορίες της επιβαλλόμενης επιτάχυνσης/ταχύτητας, της επιτάχυνσης/ταχύτητας της επιφάνειας αστοχίας και της αθροιστικής ολίσθησης. Τα αποτελέσματα αντιστοιχούν σε προσομοίωμα με τιμή του λόγου μαζών ίση με 0.95, σε συνθήκες συντονισμού και τιμή του λόγου  $\tan\phi \cdot g / \alpha_{\max}$  ίση με 0.5. Η απόσβεση θεωρείται ότι είναι τύπου Rayleigh.

Συνεπώς, η ολίσθηση για την απόσβεση τύπου Rayleigh στη δεύτερη φάση ολίσθησης είναι μικρότερη και τελικά το μέγεθος της παραμένουσας ολίσθησης στο τέλος του πρώτου κύκλου είναι σημαντικό. Η συμπεριφορά αυτή επαναλαμβάνεται και στους επόμενους κύκλους ολίσθησης, γεγονός που έχει ως τελικό αποτέλεσμα (έπειτα από τέσσερις κύκλους φόρτισης) να προκύψει τελική ολίσθηση πολύ μεγαλύτερου μεγέθους από την αντίστοιχη περίπτωση της μη συχνοτικά εξαρτημένης απόσβεσης. Σε αυτό το

σημείο πρέπει να σημειωθεί ότι η εφαρμογή της απόσβεσης τύπου Rayleigh σε διαφορετικές συχνότητες δεν μείωσε την απόκλιση των αποτελεσμάτων των δύο αριθμητικών μεθοδολογιών. Αντιθέτως, αρκετά ικανοποιητική σύγκλιση παρατηρήθηκε όταν η απόσβεση τύπου Rayleigh εφαρμόστηκε εξ ολοκλήρου στην ακαμψία του ταλαντωτή, σε πλήρη αντιστοιχία με το προσομοίωμα με τον αποσβεστήρα.

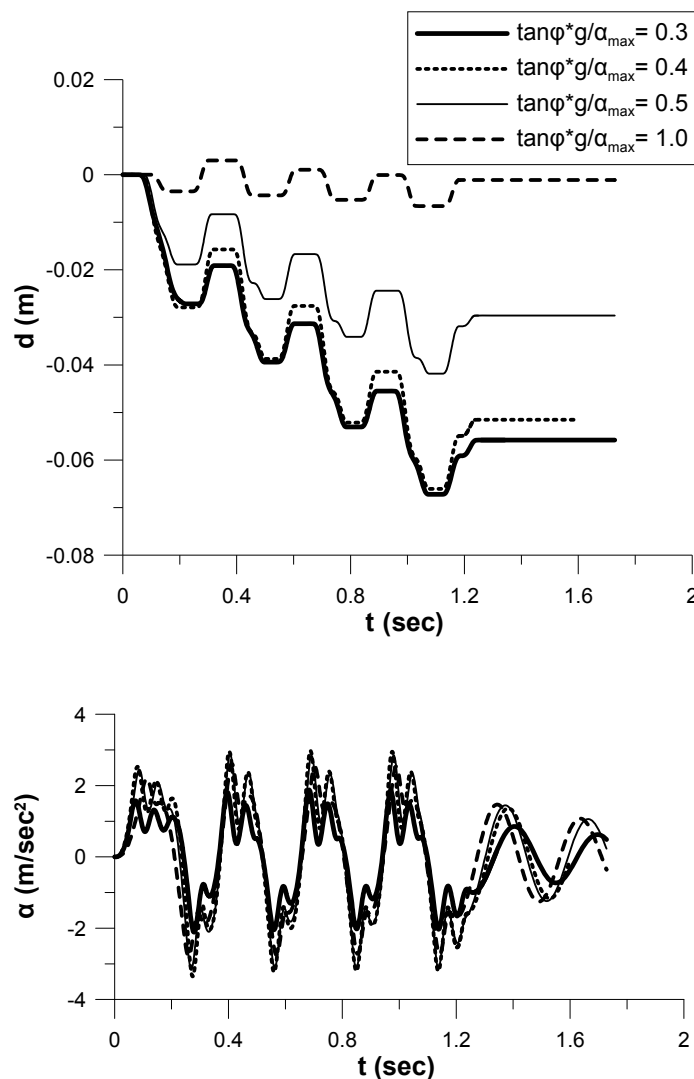
Μελετήθηκε επίσης και η επίδραση των σημαντικότερων παραμέτρων του εξεταζόμενου προβλήματος στη σεισμική απόκριση του τελευταίου προσομοιώματος. Στο Σχήμα 5.25 παρουσιάζονται οι χρονοϊστορίες της ολίσθησης για διάφορες περιπτώσεις του λόγου της ιδιοπεριόδου του συστήματος προς την περίοδο της αρμονικής κίνησης, δίνοντας έμφαση στην επίδραση της ευκαμψίας του εξεταζόμενου προσομοιώματος.



**Σχήμα 5.25** Χρονοϊστορίες της αθροιστικής ολίσθησης κατά μήκος της βάσης του απλού μονοβάθμιου συστήματος, για διάφορες τιμές του λόγου της ιδιοπεριόδου του προσομοιώματος προς την περίοδο της αρμονικής επιβαλλόμενης επιτάχυνσης. Παρουσιάζονται επίσης οι αντίστοιχες χρονοϊστορίες της επιτάχυνσης στην κορυφή του ταλαντωτή. Τα αποτελέσματα αντιστοιχούν σε τιμή του λόγου  $\tan\phi \cdot g / \alpha_{max}$  ίση με 0.5.

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα αυτά με τα αντίστοιχα που παρατίθενται στο Σχήμα 5.19 τα οποία αναφέρονται στην ίδια τιμή του λόγου  $\tan\phi^*g/\alpha_{\max}$ , ο οποίος είναι ίσος με 0.5, διαπιστώνεται ότι υπάρχει απόκλιση μεταξύ των υπολογισθέντων μετακινήσεων. Ειδικά για τις περιπτώσεις που ο λόγος της ιδιοπεριόδου του συστήματος προς την περίοδο της επιβαλλόμενης επιτάχυνσης είναι μικρότερος της μονάδας, η διαφορά αυτή είναι περισσότερο εμφανής και αποδίδεται στη μείωση των δυνάμεων απόσβεσης. Όμως για την περίπτωση όπου αναπτύσσεται η σχετική μετακίνηση μόνο της πρώτης φάσης ολίσθησης ( $T_{\text{str}}/T=2$ ) τα αποτελέσματα των δύο προσομοιωμάτων είναι συγκρίσιμα. Ένα επιπλέον ζήτημα που χρήζει προσοχής είναι ότι, όπως έχει ήδη αναφερθεί, η απόκριση του μονοβάθμιου ταλαντωτή στην περίπτωση που ο λόγος μαζών είναι διάφορος της μονάδας δεν περιορίζεται από την κρίσιμη επιτάχυνση κατά τη διάρκεια της ολίσθησης. Είναι φανερό και από το Σχήμα 5.25 ότι, ειδικά για χαμηλές τιμές του λόγου  $T_{\text{str}}/T$ , υπάρχει μία διακύμανση της επιτάχυνσης σχετικά με την κρίσιμη επιτάχυνση, η οποία είναι ιδιαίτερα υψίσυχη και υπερβαίνει σε μέγεθος την τιμή  $\tan\phi^*g$ .

Εν συνεχεία, ερμηνεύεται και η συσχέτιση του λόγου  $\tan\phi^*g/\alpha_{\max}$  με την αναπτυσσόμενη ολίσθηση και την αδρανειακή απόκριση του μονοβάθμιου ταλαντωτή. Προκειμένου να είναι εμφανής η επίδραση και για μεγάλες τιμές του λόγου  $\tan\phi^*g/\alpha_{\max}$  επιλέχθηκε η περίπτωση του συντονισμού και τα αποτελέσματα απεικονίζονται στο Σχήμα 5.26. Διαπιστώνεται ότι η μείωση του λόγου  $\tan\phi^*g/\alpha_{\max}$  σχετίζεται με αύξηση της παραμένουσας ολίσθησης, ενώ το αντίθετο ισχύει όταν η τιμή του λόγου αυξάνεται. Ειδικά όταν η διατμητική αντοχή της διεπιφάνειας ισούται με τη μέγιστη επιτάχυνση, η παραμένουσα ολίσθηση μπορεί να είναι σχεδόν μηδενική αν και μετά το πέρας το πρώτου κύκλου ολίσθησης η τιμή της είναι μεγαλύτερη. Όσον αφορά στην απόκριση του μονοβάθμιου ταλαντωτή, ελάχιστη είναι η επίδραση της μεταβολής του λόγου  $\tan\phi^*g/\alpha_{\max}$  στη μέγιστη τιμή της επιτάχυνσης, με δυσμενέστερη την περίπτωση για τιμή του λόγου ίση με 0.4. Παρατηρείται επίσης, ότι το συχνотικό περιεχόμενο της απόκρισης δεν επηρεάζεται από την τιμή του λόγου αυτού αλλά ούτε και από το μέγεθος της αναπτυσσόμενης ολίσθησης.



**Σχήμα 5.26** Χρονοϊστορίες της αθροιστικής ολίσθησης κατά μήκος της βάσης του απλού μονοβάθμιου συστήματος, για διάφορες τιμές του λόγου  $\tan\phi \cdot g / \alpha_{\max}$ . Παρουσιάζονται επίσης οι αντίστοιχες χρονοϊστορίες της επιτάχυνσης στην κορυφή του ταλαντωτή. Τα αποτελέσματα αντιστοιχούν σε τιμή του λόγου της ιδιοπεριόδου του προσομοιώματος προς την περίοδο της αρμονικής επιβαλλόμενης επιτάχυνσης ίση με τη μονάδα (συντονισμός).

#### 5.4 ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ ΔΥΟ ΕΠΙΦΑΝΕΙΩΝ ΑΣΤΟΧΙΑΣ

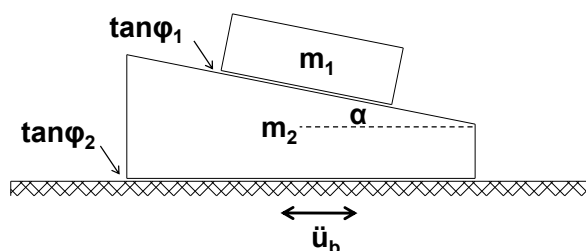
Η ανάλυση της σεισμικής ευστάθειας των Χ.Υ.Τ.Α. στην παρούσα διερεύνηση διενεργήθηκε μέχρι στιγμής ελέγχοντας δύο θεωρητικώς ανεξάρτητες επιφάνειες αστοχίας, δηλαδή την επιφάνεια που ορίζεται από τμήμα κυκλικού τόξου και τα απορριμματικά πρνή και την επιφάνεια που ορίζεται από τις διεπιφάνειες του συστήματος στεγάνωσης και το σύνολο του απορριμματικού όγκου. Όμως, η ανάλυση της σεισμικής ευστάθειας κατά μήκος του συστήματος στεγάνωσης με χρήση συζευγμένων μεθόδων έδειξε ότι είναι δυνατή η ανάπτυξη επιταχύνσεων που υπερβαίνουν την κρίσιμη επιτάχυνση. Συμπεραίνεται δηλαδή ότι δεν αποκλείεται η



ανάπτυξη διατμητικών τάσεων εντός του απορριμματικού όγκου που υπερβαίνουν τη διατμητική αντοχή της διεπιφάνειας του συστήματος στεγάνωσης. Είναι λοιπόν πιθανή η ταυτόχρονη εκδήλωση επιφάνειας αστοχίας μικρού βάθους στα απορριμματικά πρανά εκτός από τις υφιστάμενες διεπιφάνειες χαμηλής διατμητικής αντοχής κατά μήκος του συστήματος στεγάνωσης. Προκειμένου να διερευνηθεί η ευστάθεια ενός συστήματος που περιέχει δυο διακριτές επιφάνειες πεπερασμένης διατμητικής αντοχής διατυπώθηκε και αναπτύχθηκε σε γλώσσα προγραμματισμού FORTRAN ένα νέο προσομοίωμα το οποίο όμως βασίζεται στις θεμελιώδεις παραδοχές του προσομοιώματος του Newmark (1965).

#### 5.4.1 Διατύπωση νέου ημι-αναλυτικού προσομοιώματος διπλής ολίσθησης

Το νέο προσομοίωμα, το οποίο απεικονίζεται στο Σχήμα 5.27, αποτελείται από δύο απολύτως δύσκαμπτα επίπεδα σώματα τα οποία βρίσκονται τοποθετημένα το ένα πάνω στο άλλο και διαχωρίζονται από μία διεπιφάνεια πεπερασμένης διατμητικής αντοχής. Στη βάση του κατώτερου σώματος υφίσταται μία επιπλέον διεπιφάνεια πεπερασμένης διατμητικής αντοχής, ενώ και οι δύο διεπιφάνειες χαρακτηρίζονται από τριβή τύπου Coulomb θεωρώντας ταυτόχρονα ότι η σχέση τάσεων-παραμορφώσεων τους είναι απολύτως πλαστική. Επιπλέον θεωρείται η γενικότερη περίπτωση κατά την οποία η ανώτερη διεπιφάνεια είναι κεκλιμένη σε σχέση με το οριζόντιο επίπεδο κατά γωνία ( $\alpha$ ).



**Σχήμα 5.27** Σχηματική απεικόνιση του απλού προσομοιώματος υπολογισμού διπλής ολίσθησης σύμφωνα με τις βασικές παραδοχές του κλασσικού προσομοιώματος Newmark (1965).

Η διαδικασία υπολογισμού των σεισμικών μετακινήσεων κατά μήκος των δύο διεπιφανειών μπορεί να αναλυθεί στα ακόλουθα βήματα:

Βήμα 1<sup>ο</sup> : Έλεγχος της ευστάθειας της ανώτερης διεπιφάνειας

Η κατάστρωση των εξισώσεων ισορροπίας των δύο σωμάτων οδηγεί στις ακόλουθες ανισώσεις για την έναρξη της ολίσθησης στην άνω διεπιφάνεια με διεύθυνση προς τα κατάντη του πρανούς:

$$m_1(\ddot{u}_b - \ddot{u}_2)(\cos \alpha + \sin \alpha \tan \phi_1) + m_1 g (\sin \alpha - \cos \alpha \tan \phi_1) \geq 0 \quad (5.6)$$

και για την έναρξη της ολίσθησης με διεύθυνση προς τα ανάντη του πρανούς:

$$m_1(\ddot{u}_b - \ddot{u}_2)(\cos \alpha - \sin \alpha \tan \phi_1) + m_1 g (\sin \alpha + \cos \alpha \tan \phi_1) \leq 0 \quad (5.7)$$

όπου  $m_1$  η μάζα του άνω σώματος,  $\ddot{u}_b$  η επιβαλλομένη επιτάχυνση,  $\ddot{u}_2$  η σχετική επιτάχυνση του κατώτερου σώματος,  $\alpha$  η γωνία κλίσης της άνω διεπιφάνειας ως προς το οριζόντιο επίπεδο και  $\phi_1$  η γωνία τριβής της άνω διεπιφάνειας.

Εφόσον διαπιστωθεί ότι είναι εφικτή η ολίσθηση του άνω σώματος τότε συνεχίζεται η διαδικασία υπολογισμού μεταβαίνοντας στο επόμενο βήμα. Στο στάδιο αυτό ελέγχεται και η ευστάθεια κατά μήκος της κατώτερης διεπιφάνειας και υπολογίζεται η σχετική μετακίνηση (ολίσθηση) και επιτάχυνση θεωρώντας την κρίσιμη επιτάχυνση ίση με  $\tan \phi_2 \cdot g$ , όπου  $\phi_2$  η γωνία τριβής της κατώτερης διεπιφάνειας.

#### Βήμα 2<sup>ο</sup> : Υπολογισμός της σχετικής μετακίνησης της κατώτερης διεπιφάνειας

Υπολογισμός των ορθών και διατμητικών δυνάμεων που μεταβιβάζονται από το ανώτερο σώμα στο κατώτερο λόγω της διεπιφάνειας οι οποίες δίνονται από τις εξής σχέσεις, αντίστοιχα:

$$m_1 g \cos \alpha - m_1(\ddot{u}_b - \ddot{u}_2) \sin \alpha \quad (5.8)$$

$$\{ [m_1 g \cos \alpha - m_1(\ddot{u}_b - \ddot{u}_2) \sin \alpha] \tan \phi_1 \} \operatorname{sgn}(\dot{u}_1) \quad (5.9)$$

όπου  $\operatorname{sgn}(\dot{u}_1)$  το πρόσημο της σχετικής ταχύτητας του άνω σώματος.

Οι δυνάμεις αυτές αναλύονται στην οριζόντια και κατακόρυφη διεύθυνση. Από την ισορροπία επί του κατώτερου επιπέδου προκύπτει ότι η συνισταμένη της κατακόρυφης δύναμης πολλαπλασιασμένης επί  $\tan \phi_2$  και της οριζόντιας δύναμης, όταν διαιρεθεί με την μάζα του κατώτερου σώματος αποτελεί την κρίσιμη επιτάχυνσή του. Στη συνέχεια

γίνεται διπλή ολοκλήρωση της σχετικής επιτάχυνσης του κατώτερου σώματος για τον υπολογισμό της σχετικής μετακίνησής του ή αλλιώς της ολίσθησης.

#### Βήμα 3ο : Υπολογισμός της σχετικής μετακίνησης της ανώτερης διεπιφάνειας

Η κρίσιμη επιτάχυνση του ανώτερου σώματος προκύπτει από την επίλυση των σχέσεων (5.6) και (5.7) ως προς τη διαφορά της σχετικής επιτάχυνσης του κατώτερου σώματος ( $\ddot{u}_2$ ) από την επιβαλλόμενη επιτάχυνση ( $\ddot{u}_b$ ). Στο προηγούμενο βήμα υπολογίστηκε και η σχετική επιτάχυνση του κατώτερου σώματος, οπότε η σχετική μετακίνηση κατά μήκος της άνω διεπιφάνειας προκύπτει από την ολοκλήρωση της διαφοράς της κρίσιμης επιτάχυνσης από τη συνολική επιβαλλόμενη επιτάχυνση ( $\ddot{u}_b - \ddot{u}_2$ ) στο άνω σώμα.

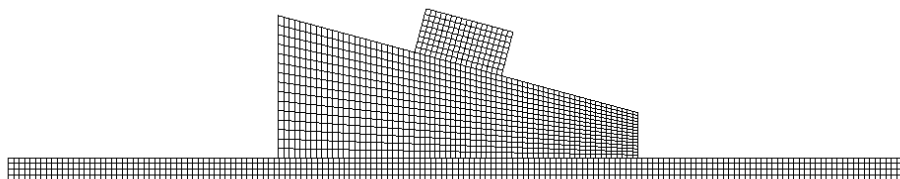
Η διαδικασία που περιγράφηκε στα προηγούμενα βήματα κωδικοποιήθηκε σε γλώσσα προγραμματισμού FORTRAN έτσι ώστε να είναι εφικτός ο υπολογισμός των σεισμικών μετακινήσεων για οποιαδήποτε χρονοϊστορία επιβαλλόμενης διέγερσης του συστήματος.

#### **5.4.2 Επαλήθευση των αποτελεσμάτων μέσω αριθμητικής προσομοίωσης**

Τα βασικά χαρακτηριστικά του προτεινόμενου ημι-αναλυτικού προσομοιώματος παρουσιάζονται στη παρούσα ενότητα με την αναλυτική παράθεση ενός αντιπροσωπευτικού παραδείγματος. Για τον σκοπό αυτό επιλέχθηκε γωνία κλίσης της άνω διεπιφάνειας ως προς το οριζόντιο επίπεδο ίση με  $15^\circ$  και γωνίες τριβής της ανώτερης και κατώτερης διεπιφάνειας ίσες με  $23^\circ$  και  $16^\circ$ , αντίστοιχα. Οι τιμές της μάζας του ανώτερου ( $m_1$ ) και του κατώτερου ( $m_2$ ) τεμάχους προσδιορίστηκαν έτσι ώστε ο λόγος τους ( $m_1/m_2$ ) να είναι ίσος με 0.1, καθώς η κρίσιμη επιτάχυνση για καμία από τις δύο διεπιφάνειες δεν εξαρτάται από το απόλυτο μέγεθος της μάζας που υπέρκειται σε αυτήν. Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε για την περίπτωση επιβολής παλμού Ricker με κεντρική συχνότητα ίση με 2Hz και μέγιστη επιβαλλόμενη επιτάχυνση ίση με 0.5g. Το συγκεκριμένο παράδειγμα ενδείκνυται για την παρουσίαση των χαρακτηριστικών της διπλής ολίσθησης μιας και η ανώτερη διεπιφάνεια έχει μικρότερη κρίσιμη επιτάχυνση από την κατώτερη, γεγονός που επιτρέπει την ανάπτυξη της ολίσθησης κατά μήκος και των δύο διεπιφανειών. Η προαναφερθείσα συνθήκη για την ανάπτυξη της διπλής ολίσθησης, πηγάζει κυρίως από το γεγονός ότι στο παρόν απλοποιητικό προσομοίωμα δεν λαμβάνεται υπόψη η αδρανειακή απόκριση της μάζας που περικλείεται μεταξύ των

δύο διεπιφανειών, με αποτέλεσμα να μην είναι δυνατή η ενίσχυση της σεισμικής κίνησης.

Το ίδιο παράδειγμα προσομοιώθηκε και με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων προκειμένου να επαληθευθεί η αριθμητική ακρίβεια του προτεινόμενου προσομοιώματος. Στο Σχήμα 5.28 φαίνεται ο κάρναβος των πεπερασμένων στοιχείων επίπεδης παραμόρφωσης του αριθμητικού προσομοιώματος το οποίο προσομοιώθηκε στον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS (2004). Πιο συγκεκριμένα, τα τρία μέρη του προσομοιώματος (βάση, κατώτερο τέμαχος και ανώτερο τέμαχος) θεωρήθηκαν απολύτως δύσκαμπτα με μεγάλο μέτρο ελαστικότητας, ενώ η σύνδεση των τριών τμημάτων επιτεύχθηκε με τον καθορισμό των αντίστοιχων ζευγών επιφανειών επαφής. Τα ζεύγη διεπιφανειών είναι: (α) για την άνω διεπιφάνεια η κατώτερη επιφάνεια του άνω τεμάχους και η ανώτερη επιφάνεια του κάτω τεμάχους, και (β) για την κάτω διεπιφάνεια η κατώτερη επιφάνεια του κάτω τεμάχους και η ανώτερη επιφάνεια της βάσης.



**Σχήμα 5.28** Σχηματική απεικόνιση του αριθμητικού προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων που αναπτύχθηκε προκειμένου να διαπιστωθεί η ακρίβεια του προτεινόμενου ημι-αναλυτικού προσομοιώματος υπολογισμού διπλής ολίσθησης.

Το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS χρησιμοποιεί έναν αλγόριθμο επίλυσης προβλημάτων επαφής, σύμφωνα με τον οποίο οι εξισώσεις επαφής διατυπώνονται πρώτα για την πρώτη επιφάνεια και εν συνεχεία εντοπίζεται το κοντινότερο σημείο στη δεύτερη επιφάνεια του ζεύγους, λαμβάνοντας υπόψη την κάθετη απόσταση προς τον κόμβο της πρώτης. Επιπροσθέτως, θεωρήθηκε δύσκαμπτη κατακόρυφη συμπεριφορά της διεπιφάνειας, δηλαδή χωρίς μεταβίβαση ορθών τάσεων όταν υφίσταται κάθετη σχετική μετατόπιση, το οποίο ουσιαστικά συνεπάγεται πλήρη επαφή των επιφανειών. Η διατμητική αντοχή και των δύο διεπιφανειών προσδιορίστηκε ως απολύτως πλαστική χωρίς τη δυνατότητα ανάπτυξης ελαστικής παραμόρφωσης. Οι περιγραφείσες συνθήκες που καθορίζουν τη μηχανική συμπεριφορά

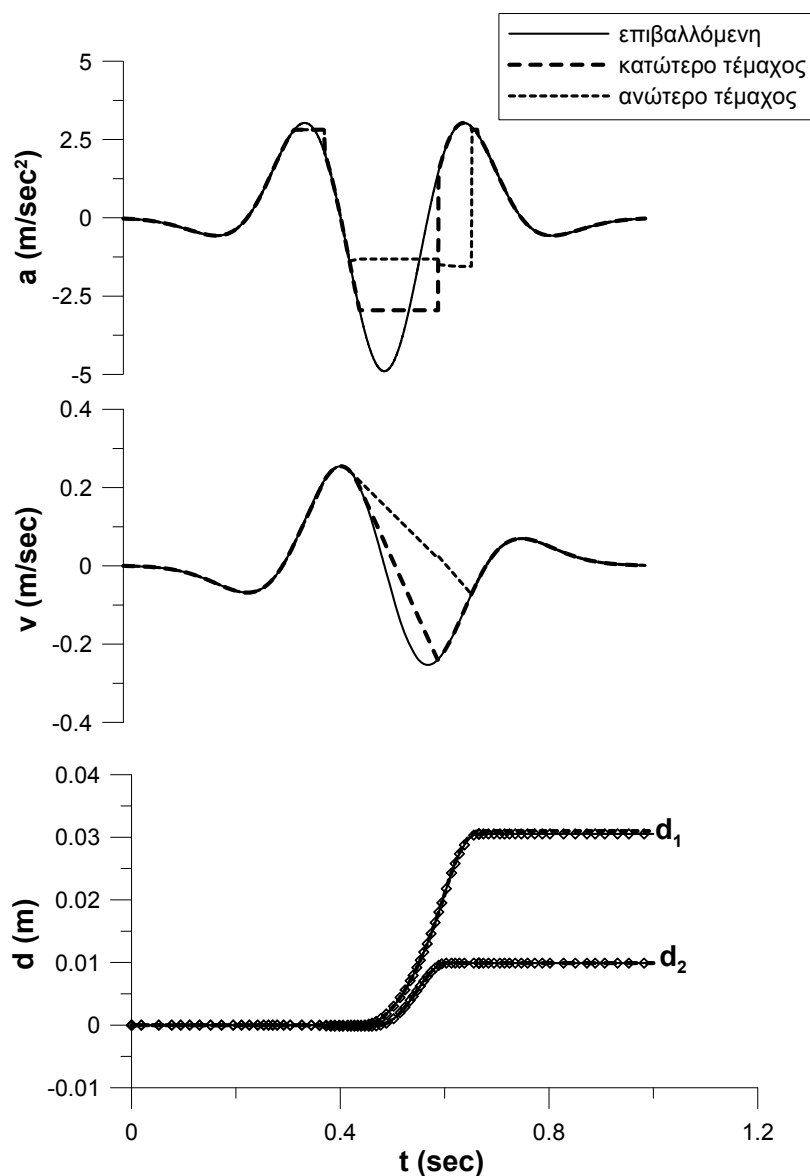
των διεπιφανειών επιλέχθηκαν ώστε να είναι αντίστοιχες με τις θεμελιώδεις παραδοχές του προτεινόμενου προσομοιώματος.

Στο Σχήμα 5.29 παρουσιάζονται οι χρονοϊστορίες της επιτάχυνσης και της ταχύτητας της επιβαλλόμενης κίνησης και των δύο ολισθαινόντων τεμαχών. Παράλληλα φαίνονται οι χρονοϊστορίες της ολίσθησης για τα δύο σώματα όπως υπολογίστηκαν τόσο από τον κώδικα που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της παρούσας έρευνας (συνεχείς γραμμές) όσο και από την ανάλυση με χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων (σύμβολα). Επίσης, σημειώνεται ότι η ολίσθηση του άνω τεμάχους ( $d_1$ ) αναφέρεται στη σχετική μετακίνησή του ως προς το κατώτερο σώμα και υπολογίζεται κατά μήκος της επιφάνειας ολίσθησης.

Αρχικά παρατηρείται αξιοσημείωτη σύγκλιση των αποτελεσμάτων των δύο μεθόδων επίλυσης του συγκεκριμένου προβλήματος. Για την ακρίβεια, οι τιμές της ολίσθησης που προβλέπονται από τις δύο μεθόδους διαφέρουν ελάχιστα σε ποσοστό μικρότερο του 1%. Το γεγονός αυτό επαληθεύει την ορθότητα της διαμόρφωσης και επίλυσης του προβλήματος της διπλής ολίσθησης, βάσει των παραδοχών του κλασσικού προσομοιώματος Newmark (1965). Όσον αφορά στον μηχανισμό της διπλής ολίσθησης διαπιστώνεται ότι το συγκεκριμένο παράδειγμα μπορεί να διαχωριστεί σε πέντε χρονικά διαστήματα βάσει της αναπτυσσόμενης ολίσθησης:

- $0.328\text{sec} < t < 0.398\text{sec}$ , μονή ολίσθηση κατά μήκος της κατώτερης διεπιφάνειας,
- $0.434\text{sec} < t < 0.452\text{sec}$ , μονή ολίσθηση κατά μήκος της ανώτερης διεπιφάνειας,
- $0.453\text{sec} < t < 0.602\text{sec}$ , διπλή ολίσθηση κατά μήκος και των δύο διεπιφανειών,
- $0.603\text{sec} < t < 0.666\text{sec}$ , μονή ολίσθηση κατά μήκος της ανώτερης διεπιφάνειας,
- $0.668\text{sec} < t < 0.677\text{sec}$ , μονή ολίσθηση κατά μήκος της κατώτερης διεπιφάνειας.

Κατά τη διάρκεια των τεσσάρων χρονικών διαστημάτων μονής ολίσθησης, ο μηχανισμός συσώρευσης της ολίσθησης κατά μήκος της εκάστοτε διεπιφάνειας δεν διαφέρει από τον αντίστοιχο του κλασσικού προσομοιώματος Newmark (1965). Όμως για το χρονικό διάστημα που αναπτύσσεται ολίσθηση κατά μήκος και των δυο διεπιφανειών, η ολίσθηση του άνω τεμάχους μειώνεται ως αποτέλεσμα της ανάπτυξης ολίσθησης κατά μήκος της κατώτερης διεπιφάνειας. Δηλαδή, καθώς η αδρανειακή δύναμη που ασκείται στο άνω τέμαχος περιορίζεται από την κρίσιμη επιτάχυνση της κατώτερης διεπιφάνειας, η σχετική επιτάχυνση μειώνεται και ακολούθως μειώνεται και η σχετική μετακίνηση ( $d_1$ ).



**Σχήμα 5.29.** Χαρακτηριστικό παράδειγμα εκτίμησης διπλής ολίσθησης, για το οποίο ο λόγος μαζών είναι ίσος με 0.1, η κλίση του άνω επιπέδου είναι ίση με  $15^\circ$  και οι γωνίες τριβής κατά μήκος της άνω και κάτω διεπιφάνειας είναι  $23^\circ$  και  $16^\circ$ , αντίστοιχα. Παρουσιάζονται οι χρονοϊστορίες της επιβαλλόμενης επιτάχυνσης/ταχύτητας, της επιτάχυνσης/ταχύτητας των δύο επιφανειών αστοχίας, καθώς και της αθροιστικής ολίσθησης κατά μήκος της άνω διεπιφάνειας ( $d_1$ ) και κατά μήκος της κάτω διεπιφάνειας ( $d_2$ ). Τα αποτελέσματα προέκυψαν για την περίπτωση επιβαλλόμενης διέγερσης παλμού Ricker με μέγιστη επιτάχυνση 0.5g. Στο τελευταίο γράφημα απεικονίζονται με σύμβολα τα αποτελέσματα της αντίστοιχης αριθμητικής ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία για αντιπαραβολή με την ημι-αναλυτική μεθοδολογία.

Επίσης, κατά τη διάρκεια της διπλής ολίσθησης η κρίσιμη επιτάχυνση στη κατώτερη επιφάνεια αυξάνεται λόγω της αλληλεπίδρασης με το ανώτερο σώμα και των μεταβιβαζόμενων δυνάμεων επαφής. Το γεγονός αυτό έχει ως αποτέλεσμα αφενός μεν

τη μείωση της χρονικής διάρκειας της ολίσθησης στην κατώτερη διεπιφάνεια, αφετέρου δε την μείωση του μεγέθους της συσσωρευόμενης ολίσθησης ( $d_2$ ). Η αύξηση της κρίσιμης επιτάχυνσης της κατώτερης επιφάνειας κατά τη διάρκεια της ολίσθησης του ανώτερου τεμάχους σχετίζεται και με το γεγονός ότι, δεν αναπτύσσεται αντίθετης φοράς ολίσθηση κατά τη διάρκεια της τέταρτης φάσης στην κατώτερη διεπιφάνεια. Συμπερασματικά η σχετική μετακίνηση του ανώτερου τεμάχους είναι μεγαλύτερη της αντίστοιχης του κατώτερου τεμάχους, ενώ εν γένει, οι υπολογισθείσες τιμές της ολίσθησης είναι μειωμένες και για τις δύο διεπιφάνειες συγκριτικά με το κλασσικό προσομοίωμα Newmark (1965).

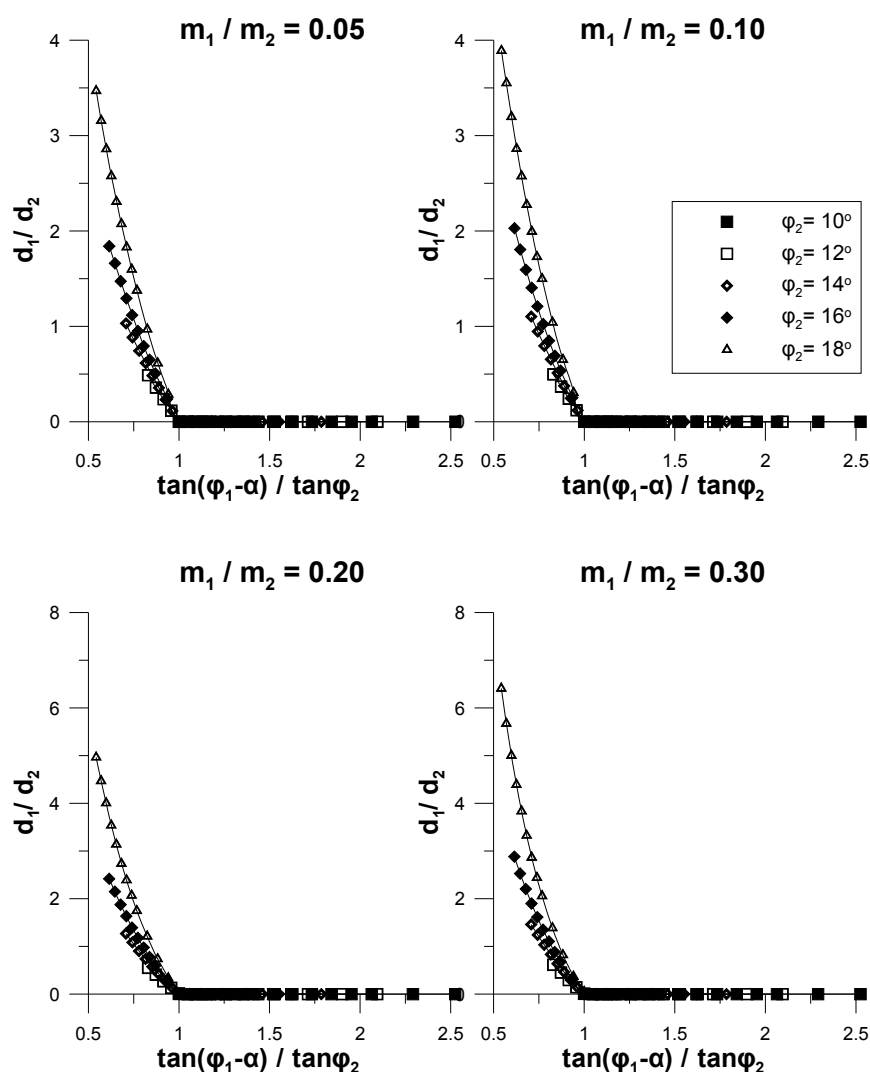
### 5.4.3 Παραμετρική διερεύνηση

Από την αναλυτική παρουσίαση της ανάπτυξης της διπλής ολίσθησης είναι φανερό ότι οι κυριότερες παράμετροι του εν λόγω φαινομένου είναι: ο λόγος των μαζών ( $m_1/m_2$ ), η διατμητική αντοχή (γωνία τριβής) της κάθε διεπιφάνειας ( $\phi_1, \phi_2$ ) και η γωνία του άνω επιπέδου ολίσθησης ( $\alpha$ ) σε σχέση με το οριζόντιο επίπεδο. Διευκρινίζεται ότι όπως έχει ήδη αναφερθεί, το απόλυτο μέγεθος της μάζας κάθε ολισθαίνοντος σώματος δεν επηρεάζει την ανάπτυξη της ολίσθησης, εν αντιθέσει με τον λόγο των μαζών που υπεισέρχεται στον υπολογισμό της κρίσιμης επιτάχυνσης του κατώτερου τεμάχους όταν έχει ήδη αναπτυχθεί ολίσθηση κατά μήκος της άνω διεπιφάνειας.

Προκειμένου να διερευνηθεί η επίδραση των σημαντικότερων παραμέτρων στις υπολογιζόμενες παραμένουσες μετακινήσεις διεξήχθη μία εκτενής παραμετρική διερεύνηση. Η επιλογή του εύρους διακύμανσης των παραμέτρων έγινε θεωρώντας γωνία τριβής  $\phi_1$  αντιπροσωπευτική της εσωτερικής γωνίας τριβής του απορριμματικού υλικού και γωνία τριβής  $\phi_2$  αντιπροσωπευτική της γωνίας τριβής των γεωσυνθετικών διεπιφανειών. Ακόμη, συγκριτικά με τις τιμές των εν λόγω παραμέτρων που αναφέρονται στη βιβλιογραφία (βλ. Πίνακες 2.3 και 2.8), το προαναφερθέν εύρος διακύμανσης προσεγγίζει τα κατώτερα δυνατά όρια του, αποσκοπώντας στη δυνατότητα ανάπτυξης σχετικών μετακινήσεων για ρεαλιστικές τιμές της μέγιστης επιβαλλόμενης επιτάχυνσης. Για τον λόγο αυτό η γωνία τριβής της άνω διεπιφάνειας θεωρείται ότι κυμαίνεται μεταξύ  $20^\circ$  και  $34^\circ$  (17 τιμές), ενώ οι αντίστοιχες τιμές για την κατώτερη διεπιφάνεια είναι  $10^\circ$  και  $18^\circ$  (5 τιμές). Επιπλέον, εξετάστηκαν τρεις διαφορετικές τιμές για την κλίση του ανώτερου επιπέδου ολίσθησης, δηλαδή  $10^\circ$ ,  $15^\circ$  και

20°. Ο λόγος των μαζών των δύο ολισθαίνοντων τεμαχών ( $m_1 / m_2$ ) θεωρείται ότι λαμβάνει τις τιμές 0.05, 0.1, 0.2 και 0.3.

Στο Σχήμα 5.30 παρουσιάζονται οι κατανομές του λόγου της ολίσθησης του άνω τεμαχούς προς την αντίστοιχη του κάτω ( $d_1/d_2$ ) συναρτήσει του λόγου της κρίσιμης επιτάχυνσης των δύο επιφανειών ολίσθησης ( $\tan(\varphi_1-\alpha)/\tan\varphi_2$ ), όπως θα προέκυπταν σύμφωνα με το κλασσικό προσομοίωμα Newmark (1965). Επίσης, φαίνονται τα αποτελέσματα για κάθε δυνατό συνδυασμό γωνιών τριβής (85 περιπτώσεις) και για κάθε τιμή του λόγου μαζών που εξετάστηκε.



**Σχήμα 5.30** Κατανομή του λόγου της ολίσθησης του άνω τεμαχούς προς την αντίστοιχη του κάτω ( $d_1/d_2$ ) συναρτήσει του λόγου της κρίσιμης επιτάχυνσης των δύο επιφανειών ολίσθησης ( $\tan(\varphi_1-\alpha)/\tan\varphi_2$ ). Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται για τιμή της γωνίας του άνω επιπέδου ολίσθησης ίση με  $10^\circ$  και διάφορες τιμές του λόγου μαζών, και αντιστοιχούν στην περίπτωση επιβαλλόμενης διέγερσης παλμού Ricker με μέγιστη επιτάχυνση 0.5g.



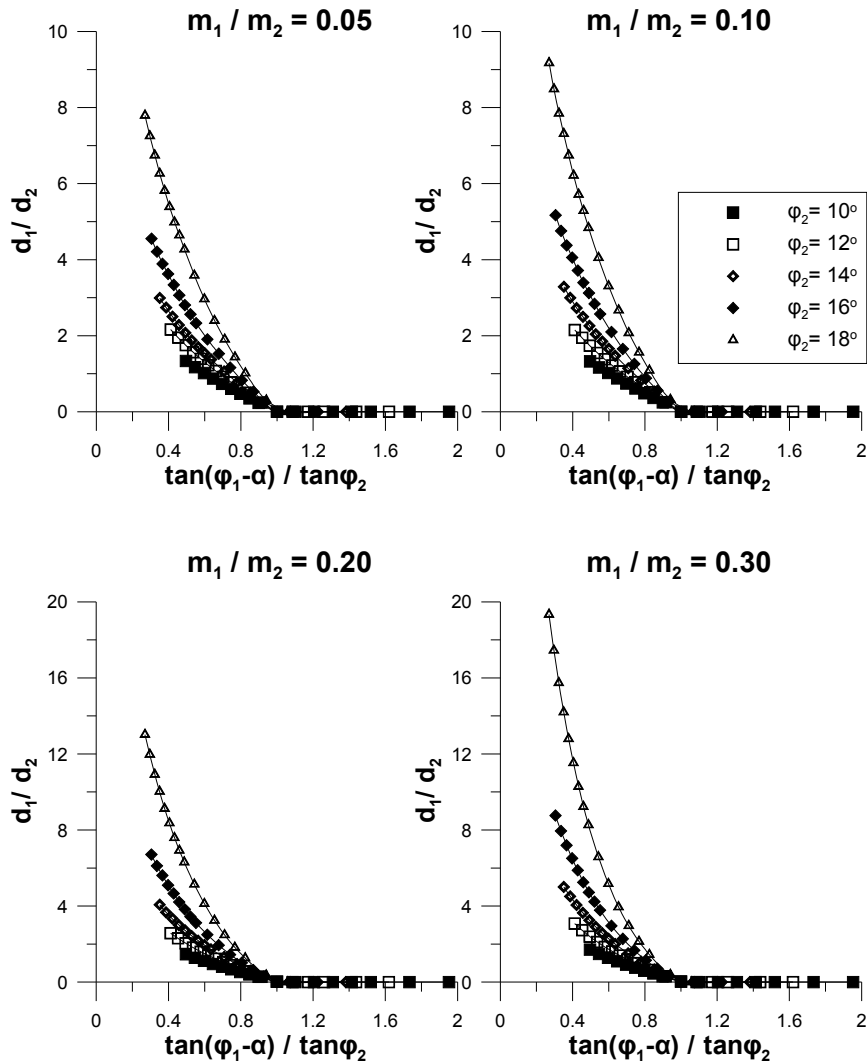
Παρατηρείται ότι, η ολίσθηση στο άνω τεμάχος αρχίζει να αναπτύσσεται μόνο όταν ο λόγος των κρίσιμων επιταχύνσεων των δύο διεπιφανειών αρχίσει να λαμβάνει τιμές μικρότερες της μονάδας, δηλαδή όταν η κρίσιμη επιτάχυνση για την ολίσθηση του άνω σώματος είναι μικρότερη της αντίστοιχης τιμής του κατώτερου σώματος. Διαπιστώνεται επίσης ότι, ανεξαρτήτως της τιμής του λόγου μαζών, ο λόγος των τιμών ολίσθησης των δύο τεμαχών χαρακτηρίζεται από τα εξής στοιχεία:

- αυξάνεται καθώς μειώνεται ο λόγος των κρίσιμων επιταχύνσεων των δύο διεπιφανειών, ακόμα και για σταθερή τιμή της γωνίας τριβής της κατώτερης διεπιφάνειας,
- αυξάνεται καθώς μεγαλώνει η γωνία τριβής της κατώτερης διεπιφάνειας, ακόμα και για σταθερή τιμή του λόγου των κρίσιμων επιταχύνσεων των δύο διεπιφανειών.

Το πρώτο χαρακτηριστικό αποδίδεται κυρίως στην αύξηση της σχετικής μετακίνησης του άνω τεμάχους ( $d_1$ ), λόγω της μείωσης της κρίσιμης επιτάχυνσης της διεπιφάνειάς του και δευτερευόντως στη μείωση της σχετικής μετακίνησης του κατώτερου τεμάχους ( $d_2$ ), ως αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης με το ανώτερο ολισθαίνον τεμάχος. Στην περίπτωση αυτή η αλληλεπίδραση ουσιαστικά σχετίζεται με την μεταβολή της κρίσιμης επιτάχυνσης του κατώτερου τεμάχους κατά τη διάρκεια ολίσθησης του άνω τεμάχους. Το φαινόμενο αυτό εντείνεται καθώς η διαφορά των κρίσιμων επιταχύνσεων των δύο διεπιφανειών είναι μεγαλύτερη, όταν δηλαδή ο λόγος των τιμών των κρίσιμων επιταχύνσεων μειώνεται. Το δεύτερο χαρακτηριστικό είναι απόρροια τόσο της μείωσης της ολίσθησης του κατώτερου τεμάχους όσο και της αύξησης της ολίσθησης του άνω τεμάχους. Η ολίσθηση του κατώτερου τεμάχους μειώνεται λόγω της αύξησης του μεγέθους της κρίσιμης επιτάχυνσής της διεπιφάνειάς του, ενώ η ολίσθηση του άνω τεμάχους αυξάνεται λόγω της μειωμένης διάρκειας της ολίσθησης του κάτω τεμάχους.

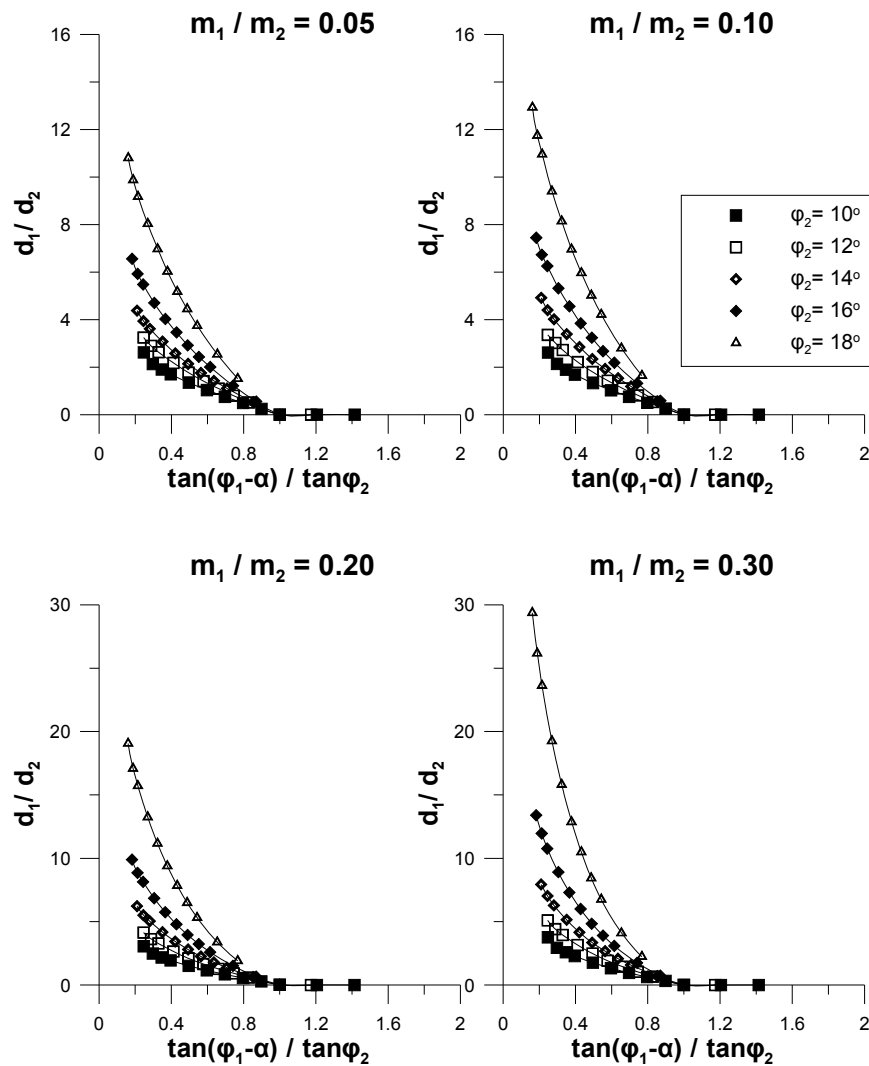
Όσον αφορά στη σύγκριση των δύο μηχανισμών αστοχίας, είναι φανερό ότι ο λόγος των υπολογιζόμενων τιμών ολίσθησης μπορεί να λάβει τιμές τόσο μικρότερες όσο και μεγαλύτερες της μονάδας. Όμως, για τη συγκεκριμένη περίπτωση γωνίας κλίσης της άνω επιφάνειας αστοχίας, καθώς και για πολύ μικρές τιμές της διατμητικής αντοχής της κατώτερης διεπιφάνειας, οι σχετικές μετακινήσεις που αναπτύσσονται κατά μήκος της είναι σχεδόν πάντα μεγαλύτερες.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί τα γενικότερα χαρακτηριστικά της αύξησης του λόγου των τιμών ολίσθησης κατά μήκος των δύο διεπιφανειών είναι ανεξάρτητα του λόγου των δύο μαζών ( $m_1/m_2$ ). Όμως συγκρίνοντας τα αποτελέσματα του Σχήματος 5.30 είναι εμφανές ότι η αύξηση της τιμής του λόγου μαζών συντελεί στην αύξηση του λόγου των παραμενουσών σχετικών μετακινήσεων των δύο επιφανειών αστοχίας. Η παρατήρηση αυτή σχετίζεται κυρίως με τη μείωση της ολίσθησης κατά μήκος της κατώτερης διεπιφάνειας. Η αύξηση του λόγου των μαζών συντελεί στην αύξηση της κρίσιμης επιτάχυνσης για την ολίσθηση του κατώτερου τεμάχους, λόγω του μεγαλύτερου μεγέθους των δυνάμεων επαφής που μεταβιβάζονται κατά την ολίσθηση του άνω τεμάχους.



**Σχήμα 5.31** Κατανομή του λόγου της ολίσθησης του άνω τεμάχους προς την αντίστοιχη του κάτω ( $d_1/d_2$ ) συναρτήσει του λόγου της κρίσιμης επιτάχυνσης των δύο επιφανειών ολίσθησης ( $\tan(\phi_1 - \alpha) / \tan\phi_2$ ). Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται για τιμή της γωνίας του άνω επιπέδου ολίσθησης ίση με  $15^\circ$  και διάφορες τιμές του λόγου μαζών, και αντιστοιχούν στην περίπτωση επιβαλλόμενης διέγερσης παλμού Ricker με μέγιστη επιτάχυνση  $0.5g$ .

Η επίδραση της αύξησης του λόγου των μαζών γίνεται περισσότερο εμφανής στα Σχήματα 5.31 και 5.32, όπου απεικονίζονται οι κατανομές του λόγου της ολίσθησης των δύο διεπιφανειών συναρτήσει του λόγου των τιμών της κρίσιμης επιτάχυνσής τους, για την περίπτωση που η γωνία του άνω επιπέδου είναι ίση με  $15^\circ$  και  $20^\circ$ , αντίστοιχα. Πιο συγκεκριμένα, για αυτές τις τιμές της κλίσης του άνω επιπέδου ολίσθησης, η τιμή του λόγου των σχετικών μετακινήσεων μπορεί ακόμα και να διπλασιαστεί καθώς η τιμή του λόγου των μαζών αυξάνεται από 0.05 σε 0.30.



**Σχήμα 5.32** Κατανομή του λόγου της ολίσθησης του άνω τεμάχους προς την αντίστοιχη του κάτω ( $d_1/d_2$ ) συναρτήσει του λόγου της κρίσιμης επιτάχυνσης των δύο επιφανειών ολίσθησης ( $\tan(\phi_1 - \alpha) / \tan\phi_2$ ). Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται για τιμή της γωνίας του άνω επιπέδου ολίσθησης ίση με  $20^\circ$  και διάφορες τιμές του λόγου μαζών, και αντιστοιχούν στην περίπτωση επιβαλλόμενης διέγερσης παλμού Ricker με μέγιστη επιτάχυνση 0.5g.

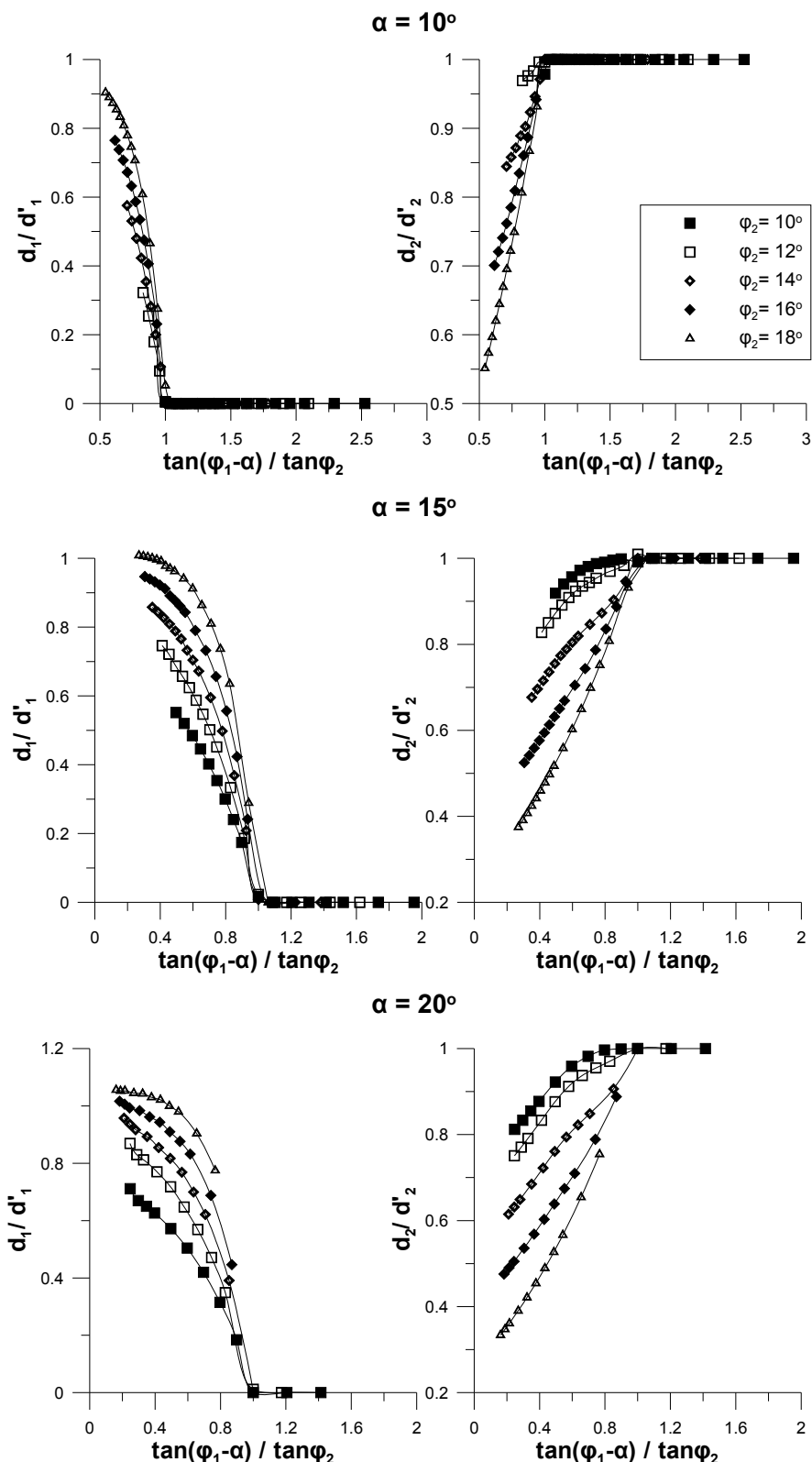
Συγκρίνοντας τα Σχήματα 5.30 έως 5.32 διαπιστώνεται ότι η αύξηση της γωνίας του άνω επιπέδου αστοχίας σε σχέση με το οριζόντιο επίπεδο συντελεί στην αύξηση του

λόγου των σχετικών μετακινήσεων των δύο διεπιφανειών. Το γεγονός αυτό μπορεί να αποδοθεί στην αύξηση των σχετικών μετακινήσεων της άνω επιφάνειας αστοχίας λόγω της μείωσης της κρίσιμης επιτάχυνσής της, αλλά και στην μείωση της ολίσθησης κατά μήκος της κατώτερης διεπιφάνειας ως αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης των δύο σωμάτων. Η αύξηση του λόγου της σχετικής μετακίνησης κατά μήκος των δύο διεπιφανειών συνεπάγεται επιπλέον και την αύξηση των περιπτώσεων στις οποίες η άνω επιφάνεια αστοχίας είναι κρίσιμότερη, δηλαδή τις περιπτώσεις όπου ο λόγος των τιμών ολίσθησης είναι μεγαλύτερος της μονάδας. Πιο συγκεκριμένα, λόγω της αύξησης της κλίσης του άνω επιπέδου η ολίσθηση κατά μήκος της άνω διεπιφάνειας είναι κρίσιμότερη ακόμη και για μικρές τιμές της διατμητικής αντοχής της κάτω διεπιφάνειας. Παρατηρείται επίσης ότι, υφίσταται για κάθε περίπτωση μία οριακή τιμή του λόγου των κρίσιμων επιταχύνσεων των δύο διεπιφανειών για την οποία αρχίζει να είναι κρίσιμότερη η άνω διεπιφάνεια. Η οριακή τιμή του λόγου των κρίσιμων επιταχύνσεων αυξάνεται καθώς μεγαλώνει και η γωνία τριβής της κατώτερης διεπιφάνειας, καθιστώντας την ολίσθηση του άνω τεμάχους πιο κρίσιμη ανεξαρτήτως της γωνίας τριβής  $\varphi_1$  όταν η γωνία τριβής  $\varphi_2$  είναι ίση με  $18^\circ$ .

Συμπερασματικά, από την παραμετρική διερεύνηση κατέστη σαφές ότι η κρίσιμη επιφάνεια αστοχίας, αλλά και το μέγεθος της αναπτυσσόμενης ολίσθησης κάθε επιφάνειας αστοχίας δεν εξαρτώνται μόνο από τον λόγο των κρίσιμων επιταχύνσεων των δύο διεπιφανειών. Η τιμή του μεγέθους της διατμητικής αντοχής της κατώτερης διεπιφάνειας, επηρεάζει την αθροιστική ολίσθηση κατά μήκος και των δύο διεπιφανειών, ενώ αντίστοιχη είναι η επίδραση του λόγου των μαζών των δύο επιφανειών αστοχίας και της κλίσης της άνω επιφάνειας αστοχίας.

#### **5.4.4 Σύγκριση με το κλασσικό προσομοίωμα Newmark**

Οι διαφορές μεταξύ του προτεινόμενου προσομοιώματος που αναπτύχθηκε και αφορά στη διπλή (ταυτόχρονη) ολίσθηση κατά μήκος δύο διεπιφανειών, και του κλασσικού προσομοιώματος κατά Newmark (1965) έγιναν εμφανείς κατά την περιγραφή του νέου προσομοιώματος. Όμως, προκειμένου να ποσοτικοποιηθεί η επίδραση της διπλής ολίσθησης στις αναπτυσσόμενες σχετικές μετακινήσεις, διενεργήθηκαν οι αντίστοιχες αναλύσεις της προηγούμενης παραμετρικής διερεύνησης και για το κλασσικό προσομοίωμα Newmark.



**Σχήμα 5.33** Κατανομή του λόγου της ολίσθησης του άνω και κάτω τεμάχους όπως υπολογίστηκαν από το προσομοίωμα διπλής ολίσθησης προς τις αντίστοιχες που υπολογίστηκαν από το κλασσικό προσομοίωμα Newmark, συναρτήσει του λόγου της κρίσιμης επιτάχυνσης των δύο επιφανειών ολίσθησης ( $\tan(\varphi_1 - \alpha) / \tan\varphi_2$ ). Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται για τιμή του λόγου μαζών ίση με 0.30, και αντιστοιχούν στην περίπτωση επιβαλλόμενης διέγερσης παλμού Ricker με μέγιστη επιτάχυνση 0.5g.

Στο Σχήμα 5.33 φαίνονται οι κατανομές του λόγου της ολίσθησης της κάθε επιφάνειας αστοχίας όπως υπολογίστηκε σύμφωνα με το προσομοίωμα διπλής ολίσθησης προς την αντίστοιχη κατά το κλασσικό προσομοίωμα Newmark. Τα αποτελέσματα αυτά αντιστοιχούν σε λόγο μαζών ίσο με 0.3, δηλαδή την περίπτωση όπου είναι και πιο έντονη η επίδραση του φαινομένου της διπλής ολίσθησης. Αρχικά παρατηρείται ότι για την άνω επιφάνεια αστοχίας στην περίπτωση που ο λόγος των κρίσιμων επιταχύνσεων είναι μεγαλύτερος της μονάδας, στο προσομοίωμα διπλής ολίσθησης δεν είναι δυνατή η ανάπτυξη σχετικής ολίσθησης γεγονός που δεν ισχύει και για το κλασσικό προσομοίωμα. Η απόκλιση των δύο μεθοδολογιών μειώνεται όταν μειώνεται η κρίσιμη επιτάχυνση της άνω διεπιφάνειας, ή όταν αυξάνονται η διατμητική αντοχή της κατώτερης διεπιφάνειας και η κλίση της άνω διεπιφάνειας.

Αντιθέτως, η ολίσθηση κατά μήκος της κατώτερης διεπιφάνειας ταυτίζεται για τις δύο μεθοδολογίες όταν ο λόγος των κρίσιμων επιταχύνσεων των δύο διεπιφανειών είναι μεγαλύτερος της μονάδας. Καθώς ο λόγος των κρίσιμων επιταχύνσεων των δύο διεπιφανειών μειώνεται, ελαττώνεται και η ολίσθηση κατά μήκος της κατώτερης διεπιφάνειας καθιστώντας συντηρητική την κλασσική μέθοδο Newmark. Η αναξιοπιστία της προσέγγισης της μονής ολίσθησης μεγαλώνει καθώς αυξάνεται η διατμητική αντοχή της κατώτερης διεπιφάνειας και η κλίση της άνω επιφάνειας αστοχίας.

Εν γένει, διαπιστώνεται ότι η αλληλεπίδραση των δύο μηχανισμών αστοχίας επιδρά κυρίως ευνοϊκά ως προς την ευστάθειά τους γιατί μειώνει τις αναπτυσσόμενες μετακινήσεις κατά μήκος και των δύο διεπιφανειών ολίσθησης. Στις εξεταζόμενες περιπτώσεις φάνηκε ότι οι δύο μηχανισμοί αστοχίας δρουν ανάστροφα, καθώς η αύξηση των μετακινήσεων κατά μήκος της διεπιφάνειας στεγάνωσης συνεπάγεται μείωση των σχετικών μετακινήσεων στα απορριμματικά πρανή, ενώ η αύξηση των σχετικών μετακινήσεων στα απορριμματικά πρανή συνεπάγεται μείωση της ολίσθησης κατά μήκος του συστήματος στεγάνωσης.

## 5.5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο κεφάλαιο αυτό εξετάστηκε η δυναμική ευστάθεια των Χ.Υ.Τ.Α., όσον αφορά στις δύο κυριότερες μορφές αστοχίας τους, εφαρμόζοντας τις δύο απλοποιητικές μεθόδους υπολογισμού της σεισμικής ευστάθειας εδαφικών πρανών. Πιο συγκεκριμένα, με βάση

τα αποτελέσματα της εκτενούς παραμετρικής διερεύνησης της δυναμικής απόκρισης των Χ.Υ.Τ.Α. (4<sup>ο</sup> Κεφάλαιο) εφαρμόστηκε η ψευδοστατική μέθοδος και η ασύζευκτη μέθοδος υπολογισμού των παραμενουσών παραμορφώσεων για κυκλικές επιφάνειες αστοχίας των πρανών και για αστοχία κατά μήκος διεπιφάνειας του συστήματος στεγάνωσης. Διερευνήθηκαν οι παραδοχές των συζευγμένων μεθόδων καθώς και οι σημαντικότερες παράμετροί τους εξετάζοντας ενδελεχώς την περίπτωση της ολίσθησης κατά μήκος του συστήματος στεγάνωσης στη βάση των εξεταζόμενων Χ.Υ.Τ.Α.. Επίσης, διατυπώθηκε ένα νέο ημι-αναλυτικό προσομοίωμα το οποίο λαμβάνει ταυτόχρονα υπόψη την ανάπτυξη της ολίσθησης κατά μήκος δύο επιφανειών αστοχίας.

Για την ευστάθεια κυκλικών επιφανειών αστοχίας, οι οποίες διέρχονται εξ ολοκλήρου διαμέσου της απορριμματικής μάζας, αποδείχτηκε ότι η μέγιστη τιμή της ισοδύναμης επιτάχυνσης εξαρτάται μεν σε μεγάλο βαθμό από τις επιμέρους παραμέτρους που ορίζουν τη δυναμική απόκριση των Χ.Υ.Τ.Α. αλλά μπορεί να προσεγγιστεί από ένα φάσμα σχεδιασμού (Σχήμα 5.1). Το εν λόγω φάσμα σχεδιασμού, το οποίο βασίζεται στη μέγιστη τιμή της οριζόντιας συνιστώσας της ισοδύναμης επιτάχυνσης, εμπεριέχει δύο παραδοχές: μία συντηρητική και μία μη συντηρητική. Η συντηρητική παραδοχή είναι ότι δεν λαμβάνεται υπόψη η χρονική μεταβολή της ισοδύναμης επιτάχυνσης, δηλαδή ότι η μέγιστη τιμή της δρα για ελάχιστο χρονικό διάστημα. Η επίδραση της παραδοχής αυτής μπορεί να περιοριστεί εκτιμώντας το φάσμα ισοδύναμων επιταχύνσεων βάσει επίδοσης, δηλαδή να αντιστοιχεί σε συγκεκριμένο επίπεδο παραμόρφωσης. Οι υπολογιζόμενες παραμορφώσεις για αυτήν τη μορφή αστοχίας, λαμβάνοντας υπόψη και την επίδραση της αύξησης λόγω εφαρμογής της κατακόρυφης συνιστώσας της ισοδύναμης επιτάχυνσης, είναι μικρότερες από:

- 10cm όταν οι τιμές του λόγου  $k_y/MHEA$  είναι μεγαλύτερες από 0.7,
- 30cm όταν οι τιμές του λόγου  $k_y/MHEA$  είναι μεγαλύτερες από 0.5.

Θεωρώντας ότι ο συντελεστής ασφαλείας κατά τον αντισεισμικό σχεδιασμό ευστάθειας πρανών λαμβάνεται ίσος με τη μονάδα, η εφαρμοζόμενη επιτάχυνση θα πρέπει να είναι ίση με  $k_y$ . Το γεγονός αυτό επιτρέπει τον πολλαπλασιασμό του φάσματος επί 70% και 50% αντίστοιχα έτσι ώστε να προκύψουν δύο φάσματα σχεδιασμού βάσει επίδοσης.

Αντίστοιχα, για την περίπτωση της ευστάθειας κατά μήκος του συστήματος στεγάνωσης, οι παραμένουσες παραμορφώσεις δεν ξεπερνούν τα 5cm για τιμές του

λόγου  $k_y/MHEA$  μεγαλύτερες του 0.5. Όμως είναι γεγονός ότι, αφενός μεν οι υπολογισθείσες μετακινήσεις είναι οι παραμένουσες τιμές και όχι οι μέγιστες και αφετέρου δε οι σεισμικές μετακινήσεις κατά μήκος διεπιφανειών του συστήματος στεγάνωσης ενδέχεται να προκαλέσουν καταπόνηση του ίδιου του συστήματος στεγάνωσης. Για τον λόγο αυτό είναι προφανές ότι πρέπει να χρησιμοποιούνται πιο ακριβείς μέθοδοι για τον προσδιορισμό της ευστάθειας κατά μήκος των διεπιφανειών του συστήματος στεγάνωσης.

Η εφαρμογή των συζευγμένων μεθόδων απέδειξε ότι το ενδεχόμενο ανάπτυξης ολίσθησης κατά μήκος μίας εκ των διεπιφανειών του συστήματος στεγάνωσης αποτελεί συνάρτηση τόσο του λόγου της ιδιοπεριόδου της κατασκευής προς την περίοδο της διέγερσης, όσο και του λόγου της διατμητικής αντοχής της διεπιφάνειας προς τη μέγιστη επιβαλλόμενη επιτάχυνση. Επίσης, η παραμένουσα ολίσθηση μπορεί να κανονικοποιηθεί ως προς την μέγιστη επιβαλλόμενη επιτάχυνση και το τετράγωνο της περιόδου της επιβαλλόμενης κίνησης. Η εκτίμηση της επίδρασης των παραδοχών της αριθμητικής προσομοίωσης έδειξε ότι η εφαρμογή απόσβεσης τύπου Rayleigh μπορεί να αυξήσει το μέγεθος της παραμένουσας ολίσθησης, ενώ μικρότερη απόκλιση επιτυγχάνεται με την αποκλειστική εφαρμογή της απόσβεσης στην δυσκαμψία. Διαπιστώθηκε επίσης ότι, υφίσταται μία οριακή τιμή του λόγου της διατμητικής αντοχής της διεπιφάνειας προς τη μέγιστη επιβαλλόμενη επιτάχυνση πέραν της οποίας δεν είναι εφικτή η ανάπτυξη της ολίσθησης. Η οριακή αυτή τιμή θα μπορούσε ενδεχομένως να χρησιμεύσει ως κριτήριο σχεδιασμού για τα συστήματα στεγάνωσης. Όμως αυτό εξαρτάται και από τη συνεπαγόμενη καταπόνηση του συστήματος στεγάνωσης, το οποίο αποτελεί αντικείμενο διερεύνησης του επόμενου κεφαλαίου.

Τέλος, εξετάστηκε και η συσχέτιση μεταξύ των δύο μορφών αστοχίας, δηλαδή τα στοιχεία που καθορίζουν την πιο κρίσιμη μορφή. Θεωρώντας την ίδια μέθοδο ανάλυσης ευστάθειας, δηλαδή την ασύζευκτη, προέκυψε ότι όσο αυξάνει η διαφορά μεταξύ της διατμητικής αντοχής του απορριμματικού υλικού και της διεπιφάνειας του συστήματος στεγάνωσης τόσο γίνεται πιο κρίσιμη η ολίσθηση κατά μήκος του συστήματος στεγάνωσης. Πάντως, για κάθε περίπτωση που εξετάστηκε, η κρίσιμη επιτάχυνση της κυκλικής επιφάνειας αστοχίας ήταν μεγαλύτερη της αντίστοιχης για αστάθεια κατά μήκος του συστήματος στεγάνωσης. Στην αντίθετη περίπτωση, δηλαδή όταν η κρίσιμη επιτάχυνση της κυκλικής επιφάνειας αστοχίας είναι η μικρότερη, υπάρχει το ενδεχόμενο ταυτόχρονης ανάπτυξης ολίσθησης κατά μήκος δύο διεπιφανειών. Το



ενδεχόμενο αυτό εξετάστηκε μέσω της διατύπωσης ενός νέου προσομοιώματος που είναι ικανό να υπολογίσει τις σεισμικές μετακινήσεις κατά τη διπλή ολίσθηση. Το προσομοίωμα αυτό αν και δεν λαμβάνει υπόψη την αδρανειακή απόκριση της μάζας που περιέχεται μεταξύ των δύο διεπιφανειών, γεγονός που μπορεί να επηρεάσει το τελικό μέγεθος των μετακινήσεων, συντελεί στην ποσοτικοποίηση της επίδρασης της διπλής ολίσθησης. Όπως αποδείχτηκε, η επίδραση του φαινομένου της διπλής ολίσθησης εξαρτάται από τον λόγο των μαζών των δυο επιφανειών αστοχίας, τον λόγο των κρίσιμων επιταχύνσεων τους και την κλίση του άνω επιπέδου αστοχίας.

Η θεώρηση επίπεδης επιφάνειας αστοχίας στα απορριμματικά πρηνή μπορεί εύκολα να επαλειφθεί, εφαρμόζοντας για την κρίσιμη επιτάχυνση των κυκλικών επιφανειών ανάστροφο υπολογισμό της γωνίας κλίσης του επιπέδου. Συμπεραίνεται ότι, το προταθέν προσομοίωμα της διπλής ολίσθησης μπορεί να χρησιμοποιείται με αποτελεσματικότητα για την αξιόπιστη εκτίμηση της σημασίας του φαινομένου κατά τον αντισεισμικό σχεδιασμό των Χ.Υ.Τ.Α.

## 5.6 ΑΝΑΦΟΡΕΣ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

- ABAQUS, (2004) "Analysis User's Manual Version 6.4", ABAQUS Inc., USA.
- Ambraseys, N.N., and Menu, J.M., (1988) "Earthquake-induced ground displacements", Earthquake engineering and structural dynamics, 16, 985-1006.
- Ambraseys, N.N., and Srbulov, M., (1994) "Attenuation of earthquake-induced ground displacements", Earthquake engineering and structural dynamics, 23, 467-487.
- Ambraseys, N.N., and Srbulov, M., (1995) "Earthquake induced displacements of slopes", Soil Dynamics and Earthquake engineering, 14, 59-71.
- Bishop, A.W. (1954) "The use of the slip circle in the stability analysis of slopes", Geotechnique, 5(1), 7 - 17.
- Cai, Z., and Bathurst, R.J., (1996) "Deterministic sliding block methods for estimating seismic displacements of earth structures", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 15, 225-268.
- California Geological Survey (2008) "Guidelines for evaluating and mitigating seismic hazards in California", Special Publication 117A, 19-35.
- Chopra, A.K., and Zhang, L., (1991) "Earthquake-induced base sliding on concrete gravity dams", Journal of Structural Engineering, 117 (12), 3698-3719.
- Duncan, J.M., (1996) "State of the art: Limit equilibrium and finite - element analysis of slopes", Journal of Geotechnical Engineering, 122 (7), 577 - 596.
- Fellenius, W., (1927) "Erdstatische Berechnungen", Ernst, Berlin.
- Filz G.M, Esterhuizen J.B., and Duncan J.M., (2001) "Progressive failure of lined waste impoundments", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 127(10), 841-848.

- Fredlund, D.G., Krahn., and Pufahl, D.E., (1981) "The relationship between limit equilibrium slope stability methods", in Proceedings of the Tenth International Conference on soil mechanics and foundation engineering, Stockholm, 409 - 416.
- Iura, M., Matsui, K., and Kosaka, I., (1992) "Analytical expressions for three different modes in harmonic motion of sliding structures", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 21, 757-769.
- Kavazanjian, E.Jr., and Matasovic N., (2001) "Seismic design of mixed and hazardous waste landfills", in Proceedings of Fourth International conference on recent advances in geotechnical earthquake engineering and soil dynamics and symposium in honor of professor W.D. Liam Finn.
- Koerner R.M., and Soong T.-Y., (2000) "Leachate in landfills: the stability issues", Geotextiles and Geomembranes, 18, 293-309.
- Kramer, S.L., and Lindwall, N.W., (2004) "Dimensionality and directionality effects in Newmark sliding block analyses", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 130(3), 303-315.
- Kramer, S.L., and Smith, M.W., (1997) "Modified Newmark model for seismic displacements of compliant slopes", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 123(7), 635-644.
- Lin, J.-S., and Whitman, R.V. (1983) "Decoupling approximation to the evaluation of earthquake-induced plastic slip in earth dams", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 11, 667-678.
- Lin, J.-S., and Whitman, R.V., (1986) "Earthquake induced displacements of sliding blocks", Journal of Geotechnical Engineering, 112 (1), 44 - 59.
- Makdisi, F.I., and Seed, H.B., (1978) "Simplified procedure for estimating dam and embankment earthquake induced deformations", Journal of Geotechnical Engineering Division, 104, 849-867.
- Mostanghel, N., Hejazi, M., Tanbakuchi, J., (1983) "Response of sliding structures to harmonic support motion", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 11, 355-366.
- Newmark, N.M., (1965) "Effect of earthquakes on dams and embankments", Geotechnique, 15 (2), 139-160.
- Rathje, E.M., and Bray, J.D., (1999) "An examination of simplified earthquake-induced displacement procedures for earth structures", Canadian Geotechnical Journal, 36, 72-87.
- Rathje, E.M., and Bray, J.D., (2000) "Nonlinear coupled seismic sliding analysis of earth structures", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 126 (11), 1002-1013.
- Sarma, S.K., (1974) "Critical acceleration versus static factor of safety in stability analysis of earth dams and embankments", Geotechnique, Technical Notes, 661 - 665.
- Sarma, S.K., (1975) "Seismic stability of earth dams and embankments", Geotechnique, 25 (4), 743-761.
- Sarma, S.K., (1981) "Seismic displacement analysis of earth dams", Journal of Geotechnical Engineering Division, 107, 1735-1739.
- Sarma, S.K., and Kourkoulis, R., (2004) "Investigation into the prediction of sliding block displacements in seismic analysis of earth dams", Proc. of 13th World conference on Earthquake Engineering, Vancouver, Canada.

- Saygili, G., and Rathje, E.M., (2008) "Empirical predictive models for earthquake-induced sliding displacements of slopes", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 134(6), 790-803.
- Seed R.B., Mitchell J.K., and Seed H.B., (1990) "Kettleman Hills Waste Landfill Slope Failure. II: Stability analysis", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 116 (4), 669-691.
- Seed, H.B., (1979) "Considerations in the earthquake-resistant design of earth and rockfill dams", *Geotechnique*, 29 (3), 215 - 263.
- Shewbridge, S.E., (1996) "Yield acceleration of lined landfills", *Journal of Geotechnical Engineering*, 122(2), 156-158.
- Singh, S. and Murphy, B., (1990) "Evaluation of the Stability of Sanitary Landfills" in *Geotechnics of Waste Fills – Theory and Practice*, eds. A. Landya and G.D. Knowles (Philadelphia: American Society for Testing and Materials), 240-258.
- Stewart, J.P., Blake, T.F., and Hollingsworth, R.A. (2003) "A screen analysis procedure for seismic slope stability", *Earthquake Spectra*, 19 (3), 697 - 712.
- Tika-Vassilikos, T.E., Sarma, S.K., and Ambraseys, N.N., (1993) "Seismic displacements on shear surfaces in cohesive soils", *Earthquake engineering and structural dynamics*, 22, 709-721.
- Westermo, B., and Udwadia, F., (1983) "Periodic response of a sliding oscillator system to harmonic excitation", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 11, 135-146.
- Yan, L., Matasovic, N., and Kavazanjian, E., (1996) "Seismic response of a block on an inclined plane to vertical and horizontal excitation acting simultaneously", *Proceedings of 11th Conference of Engineering Mechanics*, Vol. 2, 1110-1113.
- Yegian, M.K., Marciano, E.A., and Ghahraman, V.G., (1991) "Earthquake induced permanent deformations: probabilistic approach", *Journal of Geotechnical Engineering*, 117 (1), 35-50.
- Zekkos, D.P., (2005) "Evaluation of static and dynamic properties of municipal solid waste", *Dissertation, Doctor of Philosophy, Department of Civil and Environmental Engineering, University of California, Berkeley, California, USA.*



### Σεισμική ευστάθεια πρανών Χ.Υ.Τ.Α.: Λεπτομερής αριθμητική προσομοίωση

#### 6.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η απαίτηση της ασφαλούς απόθεσης των απορριμμάτων με στόχο την ελαχιστοποίηση της περιβαλλοντικής διακινδύνευσης, έχει διατυπωθεί στους διεθνείς και ελληνικούς κανονισμούς (US EPA, 1993, EC, 1999, και ΚΥΑ Η.Π. 29407/3508, 2002) με τις προδιαγραφές για την κατασκευή του σύνθετου συστήματος στεγάνωσης (βλ. Σχήμα 2.1). Η σεισμική συμπεριφορά του συστήματος αυτού, όπως έχει αναφερθεί και στη βιβλιογραφική ανασκόπηση (2<sup>ο</sup> Κεφάλαιο), έχει θεωρηθεί ότι καθορίζεται από την ανάπτυξη σεισμικών μετακινήσεων κατά μήκος των εμπεριεχόμενων διεπιφανειών χαμηλής διατμητικής αντοχής. Επέκταση αυτής της θεώρησης αποτελεί η παραδοχή ότι, η σεισμική καταπόνηση του συστήματος στεγάνωσης είναι αλληλένδετη με την ανάπτυξη των σεισμικών μετακινήσεων. Θεωρείται λοιπόν ότι, περιορίζοντας τις αναπτυσσόμενες σεισμικές μετακινήσεις εξασφαλίζεται τόσο η ευστάθεια του Χ.Υ.Τ.Α. όσο και η ακεραιότητα του συστήματος στεγάνωσης, με αποτέλεσμα να προτείνονται αυστηρότερα όρια επιτρεπόμενων μετακινήσεων για την ανάπτυξη ολίσθησης κατά μήκος των διεπιφανειών εντός του συστήματος στεγάνωσης (Kavazanjian and Matasovic, 2001).

Όμως η τρωτότητα της γεωμεμβράνης στεγάνωσης, εξαιτίας έντονης σεισμικής καταπόνησης, έχει αποδειχθεί τόσο από τις βλάβες που εντοπίστηκαν έπειτα από σεισμούς, όσο και από αποτελέσματα πειραμάτων σε φυγοκεντριστή (Thusyanthan et al., 2007). Υπενθυμίζεται ότι από τους οκτώ Χ.Υ.Τ.Α. που αναφέρονται στον Πίνακα 2.2 ότι διαθέτουν σύστημα στεγάνωσης, οι τέσσερις παρουσίασαν βλάβη στη γεωμεμβράνη. Επίσης, τα αποτελέσματα των πειραμάτων σε φυγοκεντριστή για ένα υπόγειο Χ.Υ.Τ.Α. έδειξαν αύξηση της απομένουσας εφελκυστικής τάσης της γεωμεμβράνης ίση με 30% της

αρχικής στατικής τάσης κατά μέγιστο. Είναι λοιπόν ανάγκη να εξακριβωθεί η πιθανή συσχέτιση της καταπόνησης του συστήματος στεγάνωσης με τις αναπτυσσόμενες σεισμικές μετακινήσεις.

Στο κεφάλαιο που προηγήθηκε, παρουσιάστηκαν διεξοδικά οι υφιστάμενες μεθοδολογίες ανάλυσης της σεισμικής ευστάθειας και έγινε σαφές ότι δεν είναι δυνατή η εκτίμηση της σεισμικής καταπόνησης του συστήματος στεγάνωσης με την εφαρμογή των απλοποιητικών μεθοδολογιών. Επίσης επισημαίνεται ότι, οι μέθοδοι εκτίμησης της σεισμικής ευστάθειας κατά μήκος μίας διεπιφάνειας του συστήματος στεγάνωσης, που εξετάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, είναι ικανές να λαμβάνουν υπόψη είτε τη διδιάστατη γεωμετρία της διατομής του Χ.Υ.Τ.Α. (ασύζευκτη μέθοδος), είτε τη συζευγμένη απόκριση με την ολίσθηση στη βάση, με την εφαρμογή όμως μονοβάθμιων συστημάτων.

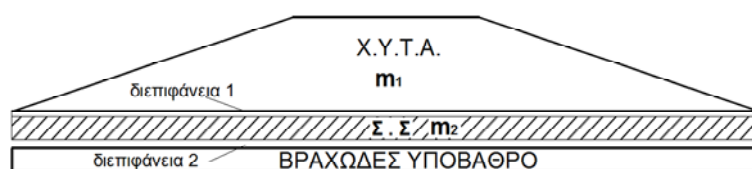
Πιο ακριβείς συζευγμένες μεθοδολογίες έχουν εφαρμοστεί για τον προσδιορισμό της σεισμικής ευστάθειας κατασκευών παρεμφερών με τους Χ.Υ.Τ.Α. όπως είναι τα χωμάτινα φράγματα. Για παράδειγμα, η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων έχει εφαρμοστεί για την εκτίμηση των μόνιμων παραμορφώσεων στην περίπτωση της σεισμικής απόκρισης του φράγματος La Villita κατά τον σεισμό στο Μεξικό (1985) μέσω συζευγμένων αναλύσεων (Uddin, 1997). Θεωρώντας ως προϋπάρχουσα επιφάνεια αστοχίας στα πρυνή του φράγματος την κρίσιμη επιφάνεια αστοχίας, η οποία προέκυψε από ψευδοστατικές αναλύσεις, υπολογίστηκε η συζευγμένη απόκριση με τις σεισμικές μετακινήσεις (διαδικασία ενός βήματος) του συστήματος. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της εργασίας αυτής, οι σεισμικές μετακινήσεις που υπολογίστηκαν είχαν μικρή απόκλιση από αυτές που αναπτύχθηκαν κατά τον σεισμό.

Η εφαρμογή της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων δύναται να αποδώσει λοιπόν με ακρίβεια τη συζευγμένη δυναμική απόκριση κατά μήκος προδιαγεγραμμένων επιφανειών αστοχίας, όπως για παράδειγμα είναι οι διεπιφάνειες του συστήματος στεγάνωσης. Κατ' αυτόν τον τρόπο συνεκτιμάται στην ευστάθεια της κατασκευής και η διδιάστατη γεωμετρία της, ενώ είναι δυνατή και η προσομοίωση του συστήματος στεγάνωσης και συνεπώς ο προσδιορισμός της καταπόνησής του. Επιπλέον, μια σημαντική συνιστώσα του προβλήματος, η οποία μπορεί να ληφθεί υπόψη κατά την αριθμητική προσομοίωση, είναι η κατανομή των αρχικών γεωστατικών τάσεων. Η επίδραση αυτής της παραμέτρου σχετίζεται άμεσα με την ανάπτυξη της ολίσθησης, λόγω

της συσχέτισης της ορθής τάσης με τη διατμητική αντοχή. Με βάση αυτό το σκεπτικό και χρησιμοποιώντας λεπτομερή αριθμητική προσομοίωση, αναλύεται στο παρόν κεφάλαιο η σεισμική ευστάθεια των Χ.Υ.Τ.Α. και η καταπόνηση του συστήματος στεγάνωσης.

## 6.2 ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΣΤΕΓΑΝΩΣΗΣ

Η τυπική διάταξη ενός σύνθετου συστήματος στεγάνωσης που διαθέτει και σύστημα συλλογής στραγγίσματος (βλ. Σχήμα 2.1), περιέχει αρκετές (τουλάχιστον τρεις) διαφορετικές διεπιφάνειες είτε εδαφικού υλικού-γεωσυνθετικού, είτε διαφορετικών τύπων γεωσυνθετικών μεταξύ τους. Από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση του 2<sup>ου</sup> Κεφαλαίου διαπιστώθηκε ότι, δεν είναι εφικτός ο θεωρητικός προσδιορισμός της κρίσιμης διεπιφάνειας για την ευστάθεια, καθώς το εύρος διακύμανσης των προτεινόμενων παραμέτρων διατμητικής αντοχής για κάθε τύπο διεπιφάνειας είναι αρκετά ευρύ. Παρακάτω λοιπόν, εκτιμάται η σεισμική συμπεριφορά ενός Χ.Υ.Τ.Α., του οποίου το σύστημα στεγάνωσης διαθέτει περισσότερες από μία προδιαγεγραμμένες επιφάνειες χαμηλής διατμητικής αντοχής. Η σχηματική απεικόνιση της εξεταζόμενης περίπτωσης αποτυπώνεται στο Σχήμα 6.1. Παρόλο που παρουσιάζεται η ειδική περίπτωση ενός υπέργειου Χ.Υ.Τ.Α. απλοποιημένης τραπεζοειδούς διατομής, η ανάλυση που ακολουθεί δεν εξαρτάται από τον τύπο του Χ.Υ.Τ.Α.



**Σχήμα 6.1.** Σχηματική απεικόνιση της θεωρήσης δύο προδιαγεγραμμένων επιφανειών εντός του συστήματος στεγάνωσης (Σ.Σ.) με μάζα  $m_2$  ενός υπέργειου Χ.Υ.Τ.Α. με μάζα  $m_1$ .

Για τους σκοπούς αυτής της προσομοίωσης καταστρώθηκε το προσομοίωμα διπλής ολίσθησης, που παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, για την ειδική περίπτωση που η άνω διεπιφάνεια ολίσθησης είναι οριζόντια. Η σεισμική συμπεριφορά ενός συστήματος με δύο προδιαγεγραμμένες επιφάνειες αστοχίας καθορίζεται από τη συσχέτιση των διατμητικών αντοχών τους. Πιο συγκεκριμένα, διακρίνονται οι εξής περιπτώσεις:

- η κατώτερη διεπιφάνεια χαρακτηρίζεται από την χαμηλότερη διατμητική αντοχή, με συνέπεια να μην είναι δυνατή η ανάπτυξη διατμητικών τάσεων που να υπερβαίνουν τη διατμητική αντοχή της ανώτερης διεπιφάνειας,
- η ανώτερη διεπιφάνεια χαρακτηρίζεται από την χαμηλότερη διατμητική αντοχή, έτσι ώστε να είναι εφικτή η ανάπτυξη σεισμικών μετακινήσεων κατά μήκος και της κατώτερης διεπιφάνειας.

Οι συνθήκες που ορίζουν την ευστάθεια των δύο διεπιφανειών για την δεύτερη περίπτωση είναι οι ακόλουθες:

$$\alpha_{crit1} = g * \tan \phi_1 \quad (6.1)$$

$$a_{crit2} = \frac{m_1}{m_2} (\tan \phi_2 \pm \tan \phi_1) * g + g * \tan \phi_2 \quad (6.2)$$

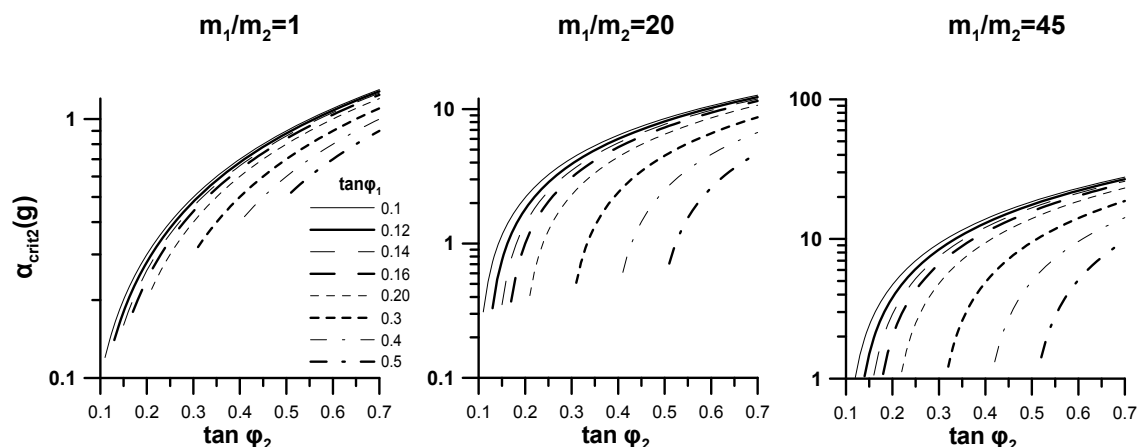
όπου  $\alpha_{crit1}$  και  $\alpha_{crit2}$  η κρίσιμη επιτάχυνση της άνω και κάτω διεπιφάνειας αντίστοιχα,  $\phi_1$  και  $\phi_2$  η γωνία τριβής της άνω και κάτω διεπιφάνειας αντίστοιχα, και  $m_1$  και  $m_2$  η μάζα που υπέρκειται της άνω διεπιφάνειας και η μάζα που περικλείεται μεταξύ των δύο διεπιφανειών, αντίστοιχα. Παρατηρείται ότι, η κρίσιμη επιτάχυνση της κατώτερης διεπιφάνειας εκτός από τη διατμητική αντοχή της, εξαρτάται και από τη σχετική διατμητική αντοχή (διαφορά των διατμητικών αντοχών των δύο διεπιφανειών), αλλά και από τον λόγο των μαζών ( $m_1/m_2$ ).

Στο Σχήμα 6.2 αποτυπώνεται η διακύμανση της κρίσιμης επιτάχυνσης κατά μήκος της κατώτερης διεπιφάνειας συναρτήσει της διατμητικής αντοχής της, για διάφορες τιμές της διατμητικής αντοχής της άνω διεπιφάνειας. Επιπλέον, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για διάφορες τιμές του λόγου μαζών, ενώ η ελάχιστη τιμή της διαφοράς των γωνιών τριβής των δύο διεπιφανειών θεωρείται ίση με  $1^\circ$ . Παρατηρείται, ότι η ελάχιστη τιμή της κρίσιμης επιτάχυνσης για την κατώτερη διεπιφάνεια αυξάνεται συναρτήσει του λόγου μαζών, λαμβάνοντας τιμές ίσες με 0.12g, 0.3g και 1.0g για τιμή του λόγου μαζών ίση με 1, 20 και 45, αντίστοιχα.

Γνωρίζοντας ότι ο λόγος μαζών ενδέχεται να υπερβεί κατά πολύ την τιμή 45, ειδικά όταν πλέον ολοκληρωθεί η διαδικασία απόθεσης απορριμμάτων στον Χ.Υ.Τ.Α., θεωρείται μη ρεαλιστική η ανάπτυξη σεισμικών μετακινήσεων κατά μήκος δύο διεπιφανειών του συστήματος στεγάνωσης. Συνεπώς, από τα δύο εξεταζόμενα σενάρια συσχέτισης των διατμητικών αντοχών των διεπιφανειών του συστήματος στεγάνωσης



εξάγεται το συμπέρασμα ότι, σεισμικές μετακινήσεις είναι εφικτό να λάβουν χώρα μόνο κατά μήκος της διεπιφάνειας του συστήματος στεγάνωσης που χαρακτηρίζεται από την χαμηλότερη διατμητική αντοχή. Επιπλέον, αναφορικά με την καταπόνηση των γεωσυνθετικών του συστήματος στεγάνωσης, εκτιμάται ότι η δυσμενέστερη σεισμική ένταση προκύπτει για ολίσθηση κατά μήκος της κατώτερης διεπιφάνειας του υπό εξέταση γεωσυνθετικού.

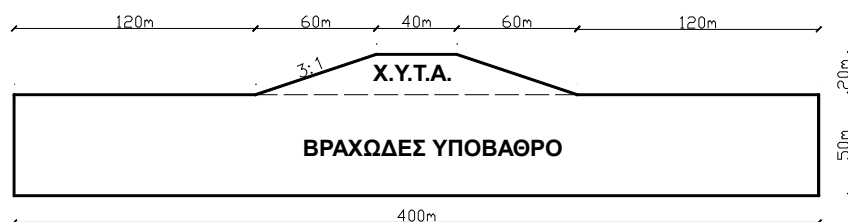


**Σχήμα 6.2.** Κατανομή της κρίσιμης επιτάχυνσης της κατώτερης διεπιφάνειας ολίσθησης συναρτήσει της διατμητικής αντοχής της, για διάφορες τιμές της διατμητικής αντοχής της ανώτερης διεπιφάνειας και για διάφορες τιμές του λόγου μαζών. Τα αποτελέσματα προϋποθέτουν μικρότερη διατμητική αντοχή κατά μήκος της ανώτερης διεπιφάνειας.

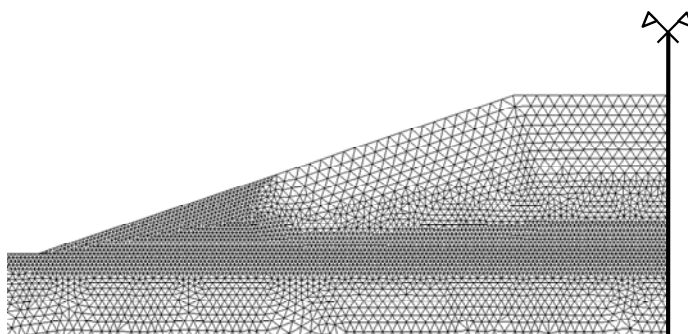
### 6.3 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

Προκειμένου να εξεταστεί η συζευγμένη δυναμική ευστάθεια των Χ.Υ.Τ.Α., κατά μήκος προδιαγεγραμμένης επιφάνειας χαμηλής διατμητικής αντοχής, αλλά και η ενδεχόμενη καταπόνηση του συστήματος στεγάνωσης καταστρώθηκαν κατάλληλα αριθμητικά προσομοιώματα πεπερασμένων στοιχείων στο κώδικα ABAQUS (2004). Για τον σκοπό αυτό επιλέχθηκε μία εκ των τριών τοπικών διατομών που εξετάστηκαν και στο 4<sup>ο</sup> Κεφάλαιο, η οποία αντιπροσωπεύει έναν υπέργειο Χ.Υ.Τ.Α. και τα γεωμετρικά της στοιχεία φαίνονται στο Σχήμα 6.3. Η θέση της γεωμεμβράνης στεγάνωσης απεικονίζεται με διακεκομμένη γραμμή. Το προσομοίωμα αποτελείται από τρία διακριτά μέρη: (α) τον απορριμματικό όγκο (Χ.Υ.Τ.Α.), (β) τη γεωμεμβράνη στεγάνωσης, και (γ) το βραχώδες υπόβαθρο. Η σύνδεση των τριών τμημάτων επιτυγχάνεται με τον καθορισμό δύο ζευγών διεπιφανειών επαφής: (α) κάτω όριο απορριμμάτων με άνω επιφάνεια της γεωμεμβράνης, και (β) κάτω επιφάνεια της γεωμεμβράνης με άνω επιφάνεια του βραχώδους υποβάθρου.

Το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS (2004) χρησιμοποιεί έναν αλγόριθμο επίλυσης για τέτοια προβλήματα επαφής. Σύμφωνα με τον αλγόριθμο αυτό οι εξισώσεις επαφής διατυπώνονται πρώτα για την πρώτη επιφάνεια και εν συνεχεία εντοπίζεται το κοντινότερο σημείο στη δεύτερη επιφάνεια του ζεύγους, λαμβάνοντας υπόψη την κάθετη απόσταση προς τον κόμβο της πρώτης. Ως πρώτη επιφάνεια επιλέγεται η πιο εύκαμπτη από τις δύο για καθεμία από τις διεπιφάνειες, δηλαδή στη συγκεκριμένη περίπτωση η κατώτερη επιφάνεια των απορριμμάτων και η κατώτερη της γεωμεμβράνης στεγάνωσης για τα δύο ζεύγη επιφανειών επαφής, αντίστοιχα. Επιπροσθέτως, επιλέγεται δύσκαμπτη κατακόρυφη συμπεριφορά της διεπιφάνειας, δηλαδή χωρίς μεταβίβαση ορθών τάσεων όταν υφίσταται κάθετη σχετική μετατόπιση, το οποίο ουσιαστικά συνεπάγεται πλήρη επαφή των επιφανειών. Όσον αφορά στη διατμητική αντοχή των διεπιφανειών, θεωρείται ότι ο συντελεστής τριβής για την άνω διεπιφάνεια είναι μεγαλύτερος του αντίστοιχου της κατώτερης διεπιφάνειας και επομένως δεν υπάρχει δυνατότητα ανάπτυξης ολίσθησης (σύμφωνα με την επεξήγηση του Σχήματος 6.2), ενώ για την κατώτερη διεπιφάνεια η γωνία τριβής επιλέχθηκε ίση με  $11^\circ$ . Σημειώνεται ότι, οι παραδοχές αυτές συνάδουν με το γεγονός ότι η γεωμεμβράνη καταπονείται όταν αναπτύσσονται σεισμικές μετακινήσεις κατά μήκος της κατώτερης διεπιφάνειάς της.



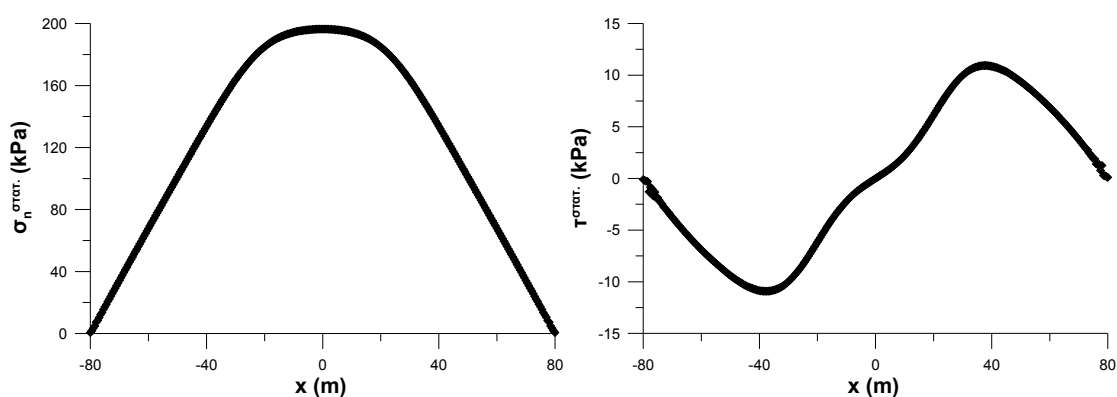
**Σχήμα 6.3.** Τυπική διατομή του εξεταζόμενου υπεργείου Χ.Υ.Τ.Α. Με διακεκομμένη γραμμή αναπαρίσταται η θέση της γεωμεμβράνης στεγάνωσης.



**Σχήμα 6.4.** Λεπτομέρεια του καννάβου πεπερασμένων στοιχείων που αναπτύχθηκε για την διενέργεια της παραμετρικής διερεύνησης.

Η διακριτοποίηση του απορριμματικού όγκου και του βραχώδους υποβάθρου έγινε με τριγωνικά πεπερασμένα στοιχεία επίπεδης παραμόρφωσης, ενώ για τη γεωμεμβράνη χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία ελκυστήρων καθώς διαθέτει μόνο αξονική δυσκαμψία. Μία λεπτομέρεια του καννάβου του προσομοιώματος διακρίνεται στο Σχήμα 6.4, όπου είναι εμφανής η πιο πυκνή διακριτοποίηση που έγινε κατά μήκος της γεωμεμβράνης και σε ικανό μήκος εκατέρωθεν της, με μέγεθος στοιχείου της τάξης του 0.5m. Σκοπός της πύκνωσης του καννάβου είναι η ακριβής εκτίμηση της κατανομής των τάσεων, ειδικά στις γωνίες του προσομοιώματος, καθώς τόσο οι ορθές όσο και οι διατμητικές τάσεις καθορίζουν την ανάπτυξη των σεισμικών μετακινήσεων. Προκειμένου μάλιστα να ληφθούν υπόψη οι γεωστατικές τάσεις χωρίς τη συνακόλουθη παραμόρφωση του Χ.Υ.Τ.Α., αναπτύχθηκε μία υπορουτίνα στον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS, με την οποία επιτυγχάνεται η σωστή κατανομή των αρχικών γεωστατικών τάσεων. Πιο συγκεκριμένα σε κάθε πεπερασμένο στοιχείο αντιστοιχίζονται οι τέσσερις συνιστώσες της τάσης στο σημείο ολοκλήρωσης, οπότε προαπαιτείται για την εφαρμογή της η στατική επίλυση του προβλήματος με την επιβολή του φορτίου λόγω βαρύτητας.

Στο Σχήμα 6.5 απεικονίζονται οι κατανομές της στατικής ορθής και διατμητικής τάσης κατά μήκος της κατώτερης διεπιφάνειας της γεωμεμβράνης. Παρατηρείται ότι, ενώ η ορθή τάση διατηρεί μια συμμετρική κατανομή ως προς τον άξονα συμμετρίας του προσομοιώματος, η διατμητική τάση χαρακτηρίζεται από αντί-συμμετρική κατανομή. Είναι εμφανές ότι η ορθή τάση λαμβάνει τη μέγιστη τιμή της επί του άξονα συμμετρίας του προσομοιώματος, ενώ η διατμητική τάση λαμβάνει τη μέγιστη και την ελάχιστη τιμή της σε απόσταση 40m εκατέρωθεν του άξονα συμμετρίας.

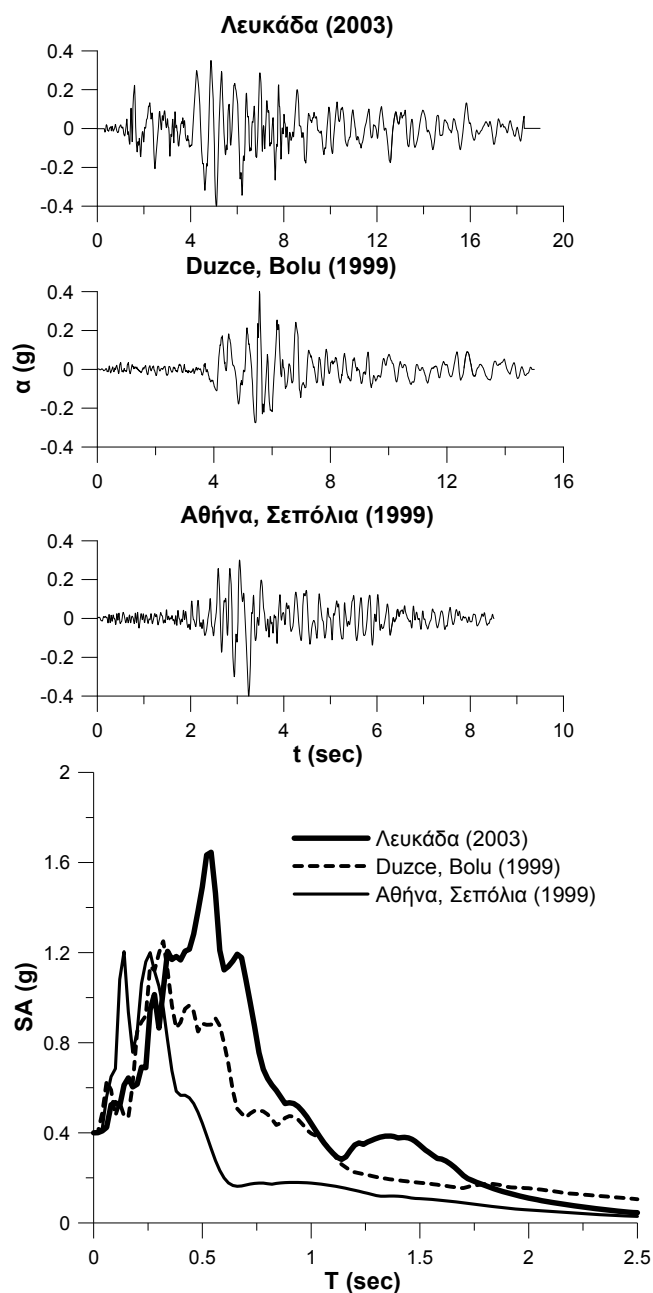


**Σχήμα 6.5.** Κατανομή της στατικής ορθής ( $\sigma_n^{\text{στατ.}}$ ) και της διατμητικής ( $\tau^{\text{στατ.}}$ ) τάσης κατά μήκος της γεωμεμβράνης στεγάνωσης.

Με σκοπό τον προσδιορισμό της επίδρασης της ιδιοπεριόδου της κατασκευής, της περιόδου της διέγερσης και της μέγιστης επιβαλλόμενης επιτάχυνσης διεξάγεται μία εκτενής παραμετρική διερεύνηση. Εξετάστηκαν πέντε χαρακτηριστικές τιμές της ταχύτητας διάδοσης του διατμητικού κύματος, δηλαδή 125m/sec, 188m/sec, 250m/sec, 325m/sec και 400m/sec, ενώ η κατανομή της θεωρείται ομοιόμορφη καθ' ύψος λόγω του μικρού σχετικά ύψους του Χ.Υ.Τ.Α. Αντίστοιχα, και η πυκνότητα του απορριμματικού υλικού έχει μία σταθερή τιμή ίση με 1tn/m<sup>3</sup>. Η ιδιοπερίοδος του προσομοιώματος, όπως προσδιορίστηκε έπειτα από αναλύσεις ιδιοσυχνοτήτων στο κώδικα πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS, είναι ίση με 0.57sec, 0.38sec, 0.29sec, 0.22sec, και 0.19sec για κάθε τιμή της ταχύτητας διάδοσης του διατμητικού κύματος.

Οι διεγέρσεις που χρησιμοποιούνται είναι αρχικά ημιτονοειδούς κατανομής με περίοδο ίση με 0.058sec, 0.29sec, 0.57sec και 1.44sec, και χρονική διάρκεια επιβολής αντίστοιχη σε 4 κύκλους επιβαλλόμενης επιτάχυνσης. Η χρήση παλμών ημιτόνου διαθέτει κάποια πλεονεκτήματα έναντι των σεισμικών καταγραφών. Ένα από αυτά είναι το γεγονός ότι, η κατανομή της ταχύτητάς είναι πλήρως συμμετρική, γεγονός που καταλήγει σε μηδενική ολίσθηση για την κλασσική ανάλυση Newmark (1965) για τις εξεταζόμενες περιπτώσεις. Η πλήρως συμμετρική κατανομή της ταχύτητας ενδείκνυται για τον προσδιορισμό του μηχανισμού συσσώρευσης της ολίσθησης. Επιπλέον, είναι εφικτή η άμεση σύγκριση με τα αποτελέσματα των αναλυτικών λύσεων, αλλά και των απλοποιητικών προσομοιωμάτων που παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο. Επιπροσθέτως, κατ' αντιστοιχία με τις απλοποιητικές τεχνικές που παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, είναι δυνατή η διερεύνηση της κανονικοποίησης της σεισμικής μετακίνησης ως προς την επιτάχυνση και το τετράγωνο της περιόδου της διέγερσης.

Πέραν των απλών διεγέρσεων παλμών ημιτόνου μελετήθηκε και η συζευγμένη απόκριση της γεωκατασκευής και για την επιβολή σεισμικών καταγραφών. Πιο συγκεκριμένα, για την καταγραφή του σεισμού της Λευκάδας (2003), την καταγραφή στα Σεπόλια του σεισμού της Αθήνας (1999) και την καταγραφή Bolu από τον σεισμό Duzce (1999). Σε όλες τις хроνοϊστορίες επιτάχυνσης επιβλήθηκε επικλιμάκια αναγωγή σε δύο τιμές επιτάχυνσης δηλαδή 0.1g και 0.4g. Στο Σχήμα 6.6. παρουσιάζονται οι хроνοϊστορίες επιτάχυνσης για τις τρεις σεισμικές καταγραφές και τα ελαστικά φάσματα απόκρισής τους.



**Σχήμα 6.6.** Χρονοϊστορίες επιτάχυνσης για τις τρεις σεισμικές καταγραφές που χρησιμοποιήθηκαν στην παραμετρική διερεύνηση ανηγμένες σε μέγιστη επιτάχυνση ίση με 0.4g. Παρουσιάζονται και τα αντίστοιχα ελαστικά φάσματα απόκρισης για απόσβεση ίση με 5%.

#### 6.4 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ – ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΙΣ

Αρχικά, παρουσιάζεται διεξοδικά η πιο χαρακτηριστική περίπτωση από τις προαναφερθείσες που εξετάστηκαν στο πλαίσιο της παραμετρικής διερεύνησης, με σκοπό τον προσδιορισμό των βασικών στοιχείων που δεσπόζουν στη συζευγμένη διδιάστατη απόκριση του προσομοιώματος με δυνατότητα ανάπτυξης ολίσθησης κατά μήκος της κατώτερης διεπιφάνειας της γεωμεμβράνης. Επιλέχθηκε η περίπτωση κατά

την οποία το απορριμματικό υλικό χαρακτηρίζεται από ταχύτητα διάδοσης διατμητικού κύματος ίση με 250m/sec (ιδιοπερίοδος ίση με 0.29sec), ενώ ο επιβαλλόμενος ημιτονοειδής παλμός έχει περίοδο ίση με 0.29 sec και μέγιστη επιτάχυνση ίση με 0.4g. Σε αντιστοιχία με τις απλοποιητικές μεθόδους, οι παραπάνω παράμετροι συνοψίζονται σε λόγο ιδιοπεριόδου της κατασκευής προς περίοδο της διέγερσης ίσο με τη μονάδα (συντονισμός ασύζευκτου συστήματος) και σε τιμή του λόγου  $\tan\phi \cdot g / \alpha_{\max}$  ίση με 0.5.

Στο Σχήμα 6.7 παρατίθενται οι χρονοϊστορίες της ολίσθησης (d), της ταχύτητας (v), της διατμητικής (τ) και ορθής τάσης ( $\sigma_n$ ), τριών χαρακτηριστικών θέσεων κατά μήκος της γεωμεμβράνης. Οι θέσεις έχουν επιλεγεί έτσι ώστε να είναι αντιπροσωπευτικές των αρχικών συνθηκών, δηλαδή:

- Θέση Α, θέση ελάχιστης τιμής της στατικής διατμητικής τάσης ( $x = -40m$ ).
- Θέση Β, θέση μέγιστης τιμής της στατικής ορθής τάσης και μηδενικής στατικής διατμητικής τάσης ( $x = 0m$ ).
- Θέση Γ, θέση μέγιστης τιμής της στατικής διατμητικής τάσης ( $x = 40m$ ).

Σημειώνεται, ότι η κατανομή των στατικών τάσεων καθορίζει την ανάπτυξη της ολίσθησης κατά μήκος της κατώτερης διεπιφάνειας της γεωμεμβράνης. Αυτό ισχύει διότι η συνθήκη έναρξης της ολίσθησης σε οποιοδήποτε σημείο της γεωμεμβράνης ορίζεται από την ακόλουθη σχέση:

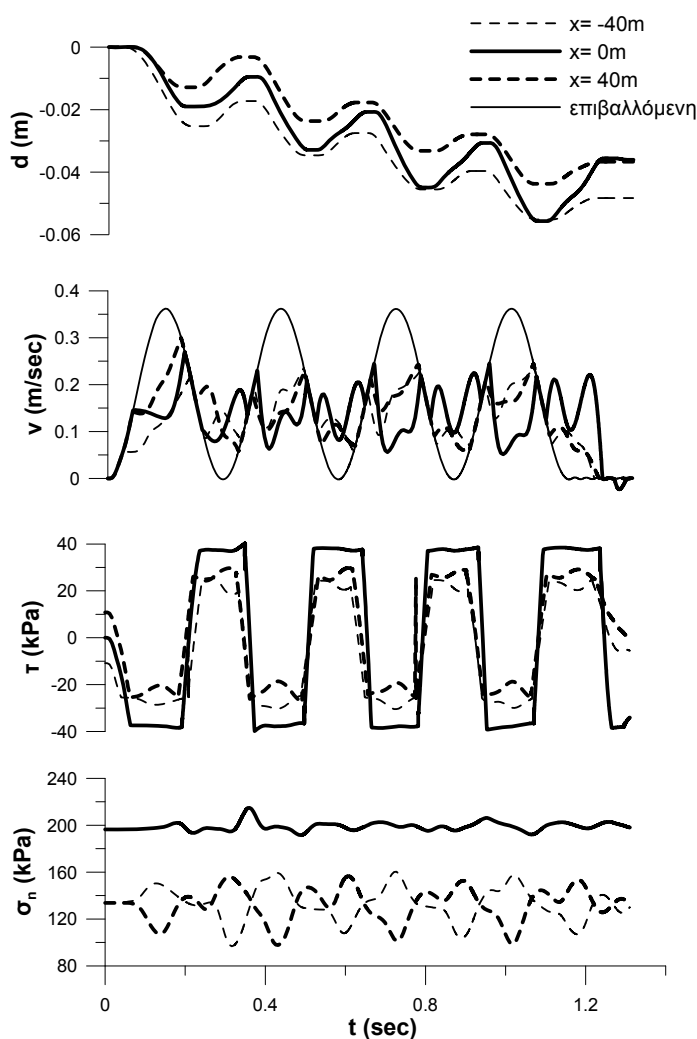
$$\left| \tau^{\text{στατ.}} + \tau^{\text{δυν.}} \right| \geq \left( \sigma_n^{\text{στατ.}} + \sigma_n^{\text{δυν.}} \right) \cdot \tan \phi \quad (6.3)$$

όπου  $\tau^{\text{στατ.}}$  και  $\tau^{\text{δυν.}}$  οι διατμητικές τάσεις λόγω στατικής και δυναμικής φόρτισης αντίστοιχα,  $\sigma_n^{\text{στατ.}}$  και  $\sigma_n^{\text{δυν.}}$  οι αντίστοιχες ορθές τάσεις, και  $\phi$  η γωνία τριβής της διεπιφάνειας.

Είναι φανερό ότι η παραμένουσα ολίσθηση μετά το πέρας των τεσσάρων κύκλων ολίσθησης είναι διαφορετική για τα τρία επιλεγμένα χαρακτηριστικά σημεία. Σημειώνεται επίσης ότι, ο όρος κύκλος ολίσθησης αναφέρεται σε δύο διαδοχικά ζεύγη γεγονότων μη ολίσθησης-ολίσθησης και διαφέρει σε χρονική διάρκεια από τον κύκλο της επιβαλλόμενης κίνησης.

Εξετάζοντας αρχικά τη διαδικασία συσσώρευσης της ολίσθησης για το σημείο Α, γίνεται εύκολα αντιληπτό από τη χρονοϊστορία της ολίσθησης το γεγονός ότι στο τέλος

του πρώτου κύκλου ολίσθησης έχει ήδη προκύψει σημαντικό ποσοστό της παραμένουσας ολίσθησης. Το γεγονός αυτό μπορεί να οφείλεται σε δύο παράγοντες: (α) στη διαφορετική χρονική διάρκεια των δύο γεγονότων ολίσθησης, στο δεύτερο από τα οποία η φορά των σεισμικών σχετικών μετακινήσεων αντιστρέφεται, και (β) στη διαφορετική σχετική ταχύτητα κατά τη διάρκεια των δύο γεγονότων ολίσθησης. Η σχετική ταχύτητα αφορά στη διαφορά της επιβαλλόμενης ταχύτητας από την ταχύτητα που αναπτύσσεται ακριβώς στα σημεία που υπέρκεινται στη διεπιφάνεια, η οποία είναι ουσιαστικά η πρώτη παράγωγος της κρίσιμης επιτάχυνσης.



**Σχήμα 6.7.** Χρονοϊστορίες της ολίσθησης ( $d$ ), της ταχύτητας ( $v$ ), της διατμητικής ( $\tau$ ) και ορθής τάσης ( $\sigma_n$ ), τριών χαρακτηριστικών θέσεων κατά μήκος της γεωμεμβράνης. Τα αποτελέσματα αντιστοιχούν σε λόγο της ιδιοπεριόδου της κατασκευής (0.29sec) προς την περίοδο του ημιτονοειδούς παλμού ίσο με μονάδα και για λόγο  $\tan\phi \cdot g / a_{\max}$  ίσο με 0.5.

Η πρώτη εξήγηση (περί της διαφορετικής χρονικής διάρκειας) σχετίζεται άμεσα με την κρίσιμη επιτάχυνση για την έναρξη της ολίσθησης, παράμετρος η οποία όπως

φάνηκε από την αναπτυχθείσα αναλυτική λύση εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό και από τις αδρανειακές δυνάμεις λόγω της δυναμικής απόκρισης. Βέβαια, στη συγκεκριμένη περίπτωση εξαρτάται και από την αρχική αρνητική τιμή της διατμητικής τάσης. Η χρονοϊστορία της διατμητικής τάσης σε αυτό το σημείο δείχνει ότι η στατική διατμητική τάση είναι ομόφορη της επιβαλλόμενης δυναμικής διατμητικής τάσης και για τον λόγο αυτό η έναρξη της ολίσθησης προηγείται αυτής του αντισυμμετρικού σημείου Γ. Η σύγκριση αυτή βασίζεται στο γεγονός ότι το σημείο Γ λόγω της θέσης του χαρακτηρίζεται από την ίδια διατμητική αντοχή (ίδια τιμή ορθής τάσης) αλλά και ίδια αδρανειακή δύναμη. Η επίδραση αυτή αντιστρέφεται όταν η επιβαλλόμενη διατμητική τάση αλλάζει φορά με αποτέλεσμα να καθυστερεί η έναρξη του δεύτερου γεγονότος ολίσθησης.

Η δεύτερη εξήγηση (περί της διαφορετικής σχετικής ταχύτητας) σχετίζεται με τη μη γραμμική κατανομή της ταχύτητας κατά τη διάρκεια των δύο γεγονότων ολίσθησης, δηλαδή η κρίσιμη επιτάχυνση δεν είναι σταθερή κατά τη διάρκεια της ολίσθησης. Το χαρακτηριστικό αυτό όπως φάνηκε και από τις αναλύσεις των απλοποιητικών συστημάτων του 4<sup>ου</sup> Κεφαλαίου, απορρέει από την ανάπτυξη ισχυρής αδρανειακής δύναμης στο επίπεδο της ολίσθησης, είτε λόγω μεγάλου ποσοστού της μάζας που δεν ταλαντώνεται είτε λόγω μειωμένης απόσβεσης κατά την εφαρμογή της απόσβεσης κατά Rayleigh. Επιπλέον, κατά τη διάρκεια της ολίσθησης μεταβάλλεται και η διατμητική αντοχή, ως αποτέλεσμα της μεταβολής της ορθής τάσης κατά την ταλάντωση του προσομοιώματος. Στο Σχήμα 6.7 είναι εμφανές ότι η διατμητική αντοχή αυξάνεται κατά τη διάρκεια του πρώτου γεγονότος ολίσθησης, ενώ μειώνεται κατά τη διάρκεια του δεύτερου στο σημείο Α. Παρόλα αυτά, η επίδραση αυτής της μεταβολής στο μέγεθος της ολίσθησης είναι πολύ μικρή σε σχέση με τις προαναφερθείσες παραμέτρους.

Στην θέση Γ, η οποία όπως αναφέρθηκε αντιστοιχεί στη θέση της μέγιστης τιμής της στατικής διατμητικής τάσης, η παραμένουσα ολίσθηση είναι μικρότερη από την προηγούμενως εξεταζόμενη θέση Α τόσο μετά το πέρας του πρώτου κύκλου ολίσθησης όσο και μετά το πέρας των τεσσάρων κύκλων ολίσθησης. Σε αντίθεση με την προηγούμενη εξεταζόμενη θέση, η αρχική θετική στατική διατμητική τάση συντελεί στη μείωση της χρονικής διάρκειας του πρώτου γεγονότος ολίσθησης, μέσω της αύξησης της κρίσιμης επιτάχυνσης για την έναρξη της ολίσθησης. Η επίδραση αυτή αντιστρέφεται με την αλλαγή της φοράς της επιβαλλόμενης διατμητικής τάσης, με αποτέλεσμα η χρονική διάρκεια του δεύτερου γεγονότος ολίσθησης να αυξάνεται. Επιπροσθέτως, η μη



γραμμική κατανομή της ταχύτητας σε αυτή τη θέση σχετίζεται κυρίως με τις αναπτυσσόμενες αδρανειακές δυνάμεις, η επίδραση των οποίων όμως είναι αντίστοιχη με της θέσης Α.

Όμως, η επίδραση της αδρανειακής απόκρισης στην κατανομή της ορθής τάσης κατά τη διάρκεια της ολίσθησης, και συνεπώς της διατμητικής αντοχής, είναι αντίστροφη. Δηλαδή, κατά το πρώτο γεγονός ολίσθησης κάθε κύκλου η διατμητική αντοχή μειώνεται κατ' απόλυτη τιμή, σε σχέση με τη στατική τιμή της, ενώ μεγαλώνει στο δεύτερο γεγονός ολίσθησης. Η διαφοροποίηση των αναπτυσσόμενων σεισμικών μετακινήσεων μεταξύ των σημείων Α και Γ αποδίδεται, κατά κύριο λόγο στην αντίθετη τιμή της στατικής διατμητικής τάσης, και δευτερευόντως την αντίθετη φορά της διακύμανσης της δυναμικής ορθής τάσης. Αντιθέτως, για τη θέση Β ούτε η στατική διατμητική τάση επηρεάζει τη συσσώρευση της ολίσθησης, ούτε η κατανομή της δυναμικής τάσης. Η κύρια παράμετρος που καθορίζει τη συζευγμένη απόκριση είναι οι αδρανειακές δυνάμεις, οι οποίες λαμβάνουν και τη μέγιστη τιμή τους.

Αντίστοιχη συμπεριφορά χαρακτηρίζει και τους επόμενους κύκλους ολίσθησης, αλλάζοντας όμως το μέγεθος της παραμένουσας ολίσθησης μετά το πέρας κάθε κύκλου. Αποτέλεσμα αυτής της συμπεριφοράς είναι να προκύπτει τελικά ένα ικανό μέγεθος αθροιστικής ολίσθησης για κάθε σημείο της γεωμεμβράνης, η οποία όμως διαφέρει από θέση σε θέση. Όπως διαπιστώθηκε τρεις είναι οι βασικοί παράγοντες που καθορίζουν τον μηχανισμό συσσώρευσης της ολίσθησης στη γεωμεμβράνη: (α) η στατική διατμητική τάση, (β) οι αδρανειακές δυνάμεις, και (γ) η δυναμική ορθή τάση. Όμως η στατική διατμητική τάση κυμαίνεται αντισυμμετρικά, ενώ η ορθή τάση και οι αδρανειακές δυνάμεις κυμαίνονται συμμετρικά ως προς τον άξονα συμμετρίας του προσομοιώματος. Η αλληλεπίδραση λοιπόν κάθε παραμέτρου είναι αρκετά πολύπλοκη καταλήγοντας σε μη ομοιόμορφη κατανομή της ολίσθησης κατά μήκος της κατώτερης διεπιφάνειας της γεωμεμβράνης στεγάνωσης.

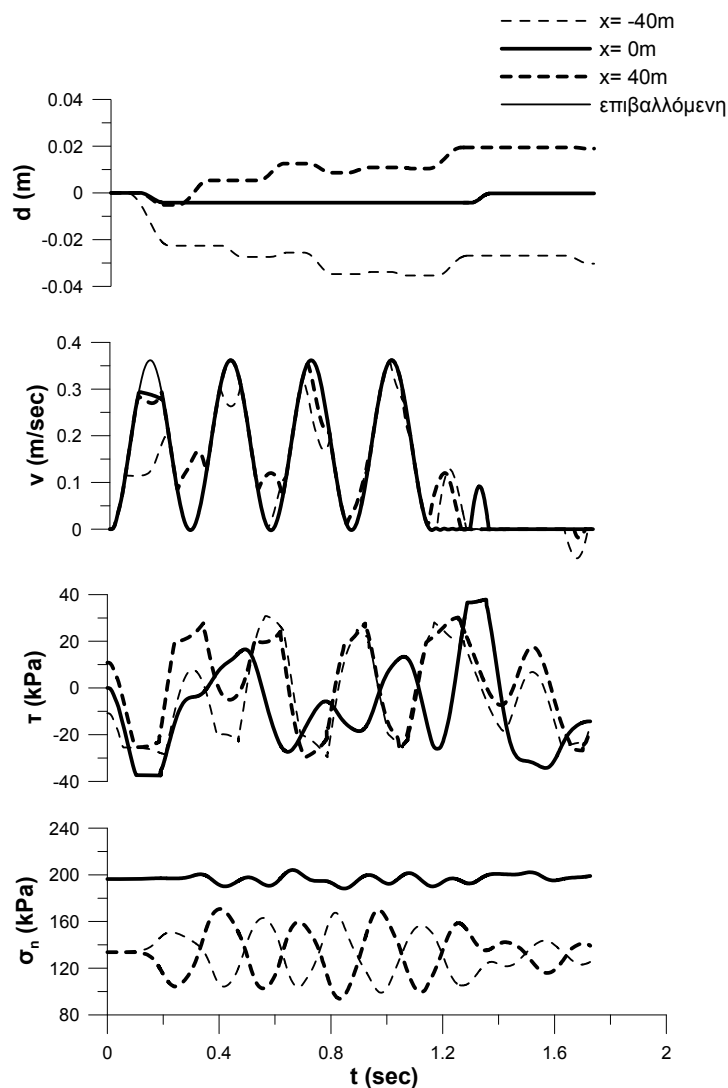
#### 6.4.1 Παραμετρική διερεύνηση

Με σκοπό τον προσδιορισμό της επίδρασης των επιμέρους παραμέτρων που καθορίζουν τη συζευγμένη δυναμική απόκριση του εξεταζόμενου προσομοιώματος, διεξάγεται μία αριθμητική παραμετρική διερεύνηση. Αρχικά εξετάζεται η επίδραση της ευκαμψίας της κατασκευής, μεταβάλλοντας την ταχύτητα διάδοσης του διατμητικού κύματος. Θεωρώντας σταθερή την περίοδο της επιβαλλόμενης χρονοϊστορίας της επιτάχυνσης

(παλμός ημιτόνου), η μείωση/αύξηση της ταχύτητας διάδοσης του διατμητικού κύματος συνεπάγεται αύξηση/μείωση της ιδιοπεριόδου της κατασκευής, αλλά και της τιμής του λόγου της ιδιοπεριόδου της κατασκευής προς την περίοδο της διέγερσης ( $T_{str}/T$ ). Στα Σχήματα 6.8 έως 6.11 παρουσιάζονται οι χρονοϊστορίες της ολίσθησης, της ταχύτητας, της διατμητικής και της ορθής τάσης των τριών χαρακτηριστικών θέσεων κατά μήκος της γεωμεμβράνης για διαφορετικές τιμές του λόγου  $T_{str}/T$  με φθίνουσα σειρά.

Για το προσομοίωμα με τη μεγαλύτερη ευκαμψία, δηλαδή τη μεγαλύτερη ιδιοπερίοδο, η τιμή του λόγου της ιδιοπεριόδου της κατασκευής προς την περίοδο του παλμού είναι περίπου ίση με δύο. Από το Σχήμα 6.8. διαπιστώνεται ότι, ενώ στο σημείο Β η μετακίνηση είναι σχεδόν μηδενική στα σημεία Α και Γ αναπτύσσεται ολίσθηση αντίθετης φοράς. Συγκρίνοντας δε τα αποτελέσματα αυτά με την αντίστοιχη περίπτωση του συντονισμού (Σχήμα 6.7) η διαφορά είναι προφανής. Η εν λόγω διαφοροποίηση αποδίδεται κυρίως στην επίδραση των αδρανειακών δυνάμεων.

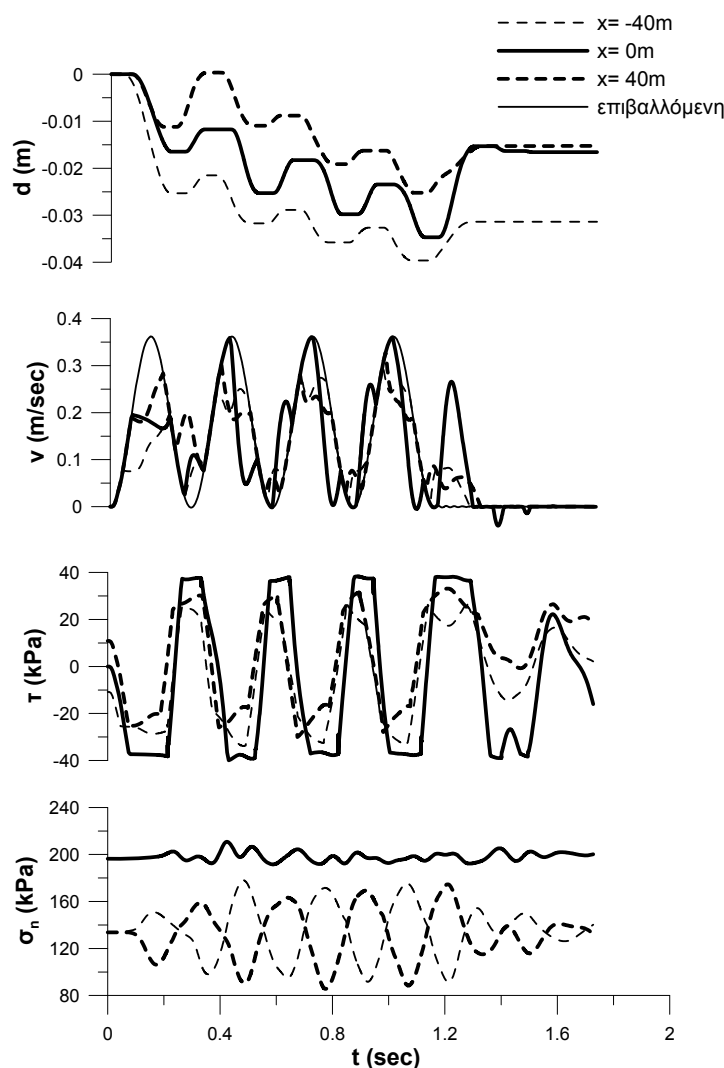
Πιο συγκεκριμένα, όπως διαπιστώθηκε και από τη συζευγμένη δυναμική απόκριση των απλοποιητικών συστημάτων, κατά την αύξηση του λόγου της ιδιοπεριόδου της κατασκευής προς την περίοδο της διέγερσης σε τιμές μεγαλύτερες της μονάδας, η αδρανειακή απόκριση του προσομοιώματος είναι εκτός φάσης με την επιβαλλόμενη κίνηση. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της κρίσιμης επιτάχυνσης, σε σύγκριση με το συντονισμό, και την ανάπτυξη ολίσθησης κυρίως ή/και αποκλειστικά κατά τον πρώτο κύκλο της επιβαλλόμενης κίνησης. Η παρατήρηση αυτή χαρακτηρίζει επαρκώς την θέση Β, όπου δεν υφίσταται η επίδραση της στατικής διατμητικής τάσης και της δυναμικής ορθής τάσης. Όμως στα σημεία Α και Γ, εικάζεται ότι οι αδρανειακές δυνάμεις επηρεάζουν σε μικρότερο βαθμό, σε σχέση με το σημείο Β, την ανάπτυξη της ολίσθησης λόγω του μικρότερου υπερκείμενου ύψους, αλλά και του διαφορετικού μεγέθους της ολίσθησης κατά το πρώτο γεγονός ολίσθησης. Αυτό αποτυπώνεται με την εξέλιξη περισσότερων του ενός γεγονότων ολίσθησης. Ο ρόλος της στατικής διατμητικής τάσης είναι αρκετά σημαντικός στην ανάπτυξη της ολίσθησης των δύο αυτών σημείων, καθώς φαίνεται ότι η υφιστάμενη διαφορά της ολίσθησης μεταξύ των δύο σημείων κατά τον πρώτο κύκλο ολίσθησης εντείνεται μέχρι το πέρας της επιβαλλόμενης κίνησης. Αντιθέτως, παρατηρείται ότι η επίδραση της χρονικής διακύμανσης της ορθής τάσης στη συσσώρευση της ολίσθησης δεν είναι σημαντική για τα δύο σημεία.



**Σχήμα 6.8.** Χρονοϊστορίες της ολίσθησης ( $d$ ), της ταχύτητας ( $v$ ), της διατμητικής ( $\tau$ ) και ορθής τάσης ( $\sigma_n$ ), τριών χαρακτηριστικών θέσεων κατά μήκος της γεωμεμβράνης. Τα αποτελέσματα αντιστοιχούν σε λόγο της ιδιοπεριόδου της κατασκευής (0.57sec) προς την περίοδο του ημιτονοειδούς παλμού (0.29sec) περίπου ίσο με 2 και για λόγο  $\tan\phi \cdot g / \alpha_{\max}$  ίσο με 0.5.

Η περαιτέρω αύξηση της δυσκαμψίας (βλ. Σχήμα 6.9) απαλείφει μεν το φαινόμενο της αντίθετης φοράς της ολίσθησης μεταξύ των δύο αντισυμμετρικών σημείων, αλλά είναι προφανής η διαφορά μεταξύ της αναπτυσσόμενης ολίσθησης στις τρεις εξεταζόμενες θέσεις. Παρόλο που η διαδικασία συσσώρευσης της ολίσθησης σε αυτήν την περίπτωση είναι αντίστοιχη με την περίπτωση του συντονισμού, δηλαδή αποτελείται σε καθεμία από τις τρεις θέσεις από τέσσερις κύκλους ολίσθησης (κάθε κύκλος αποτελείται από δύο διαδοχικές φάσεις μη ολίσθησης-ολίσθησης), η παραμένουσα ολίσθηση είναι μικρότερου μεγέθους. Παρατηρείται μάλιστα ότι, η μεν χρονική διάρκεια των γεγονότων ολίσθησης του 2<sup>ου</sup>, 3<sup>ου</sup> και 4<sup>ου</sup> κύκλου ολίσθησης

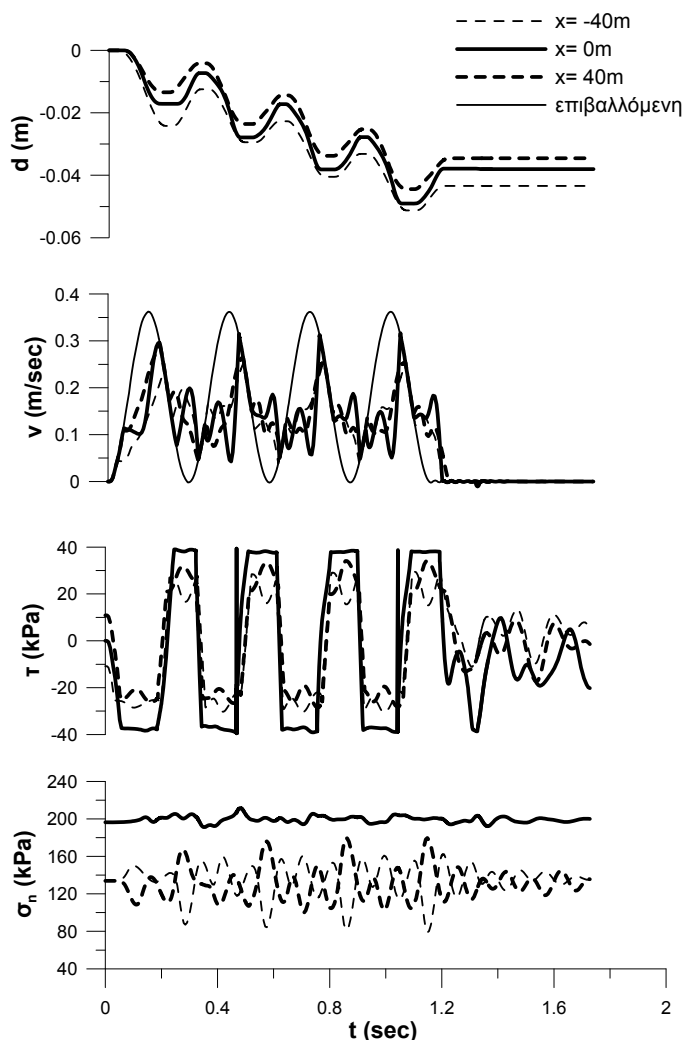
μειώνεται σημαντικά συγκριτικά με του πρώτου κύκλου, η δε κρίσιμη επιτάχυνση κατά τη διάρκεια των αντίστοιχων γεγονότων ολίσθησης αυξάνεται. Αποτέλεσμα των προαναφερθέντων παρατηρήσεων είναι να παρατηρούνται τα μεγαλύτερα μεγέθη ολίσθησης κατά τον πρώτο κύκλο ολίσθησης.



**Σχήμα 6.9.** Χρονοϊστορίες της ολίσθησης ( $d$ ), της ταχύτητας ( $v$ ), της διατμητικής ( $\tau$ ) και ορθής τάσης ( $\sigma_n$ ), τριών χαρακτηριστικών θέσεων κατά μήκος της γεωμεμβράνης. Τα αποτελέσματα αντιστοιχούν σε λόγο της ιδιοπεριόδου της κατασκευής (0.38sec) προς την περίοδο του ημιτονοειδούς παλμού (0.29sec) περίπου ίσο με 1.33 και για λόγο  $\tan\phi \cdot g / \alpha_{\max}$  ίσο με 0.5.

Για τη θέση Β η συμπεριφορά αυτή μπορεί να ερμηνευτεί μέσω της μείωσης των αδρανειακών δυνάμεων συγκριτικά με την περίπτωση του συντονισμού, η οποία προέκυψε από τη μεγαλύτερη της μονάδας τιμή του λόγου της ιδιοπεριόδου της κατασκευής προς την περίοδο της διέγερσης. Στις θέσεις Α και Γ, εκτός των μεγαλύτερων αδρανειακών δυνάμεων, παρατηρείται και αρκετά έντονη συνεισφορά της διακόμησης

της ορθής τάσης. Επιπλέον, δεν πρέπει να αμελείται η επίδραση της στατικής διατμητικής τάσης, χάρη στην οποία τα δύο αντισυμμετρικά σημεία εξακολουθούν να αναπτύσσουν διαφορετικό μέγεθος παραμένουσας σεισμικής μετακίνησης.

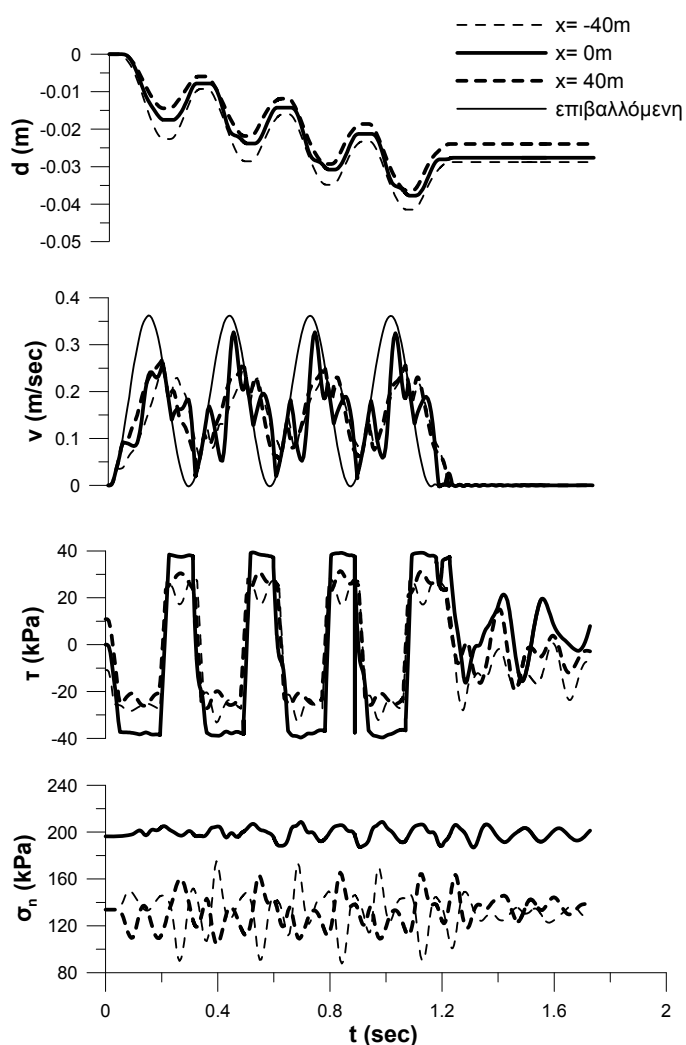


**Σχήμα 6.10.** Χρονοϊστορίες της ολίσθησης ( $d$ ), της ταχύτητας ( $v$ ), της διατμητικής ( $\tau$ ) και ορθής τάσης ( $\sigma_n$ ), τριών χαρακτηριστικών θέσεων κατά μήκος της γεωμεμβράνης. Τα αποτελέσματα αντιστοιχούν σε λόγο της ιδιοπεριόδου της κατασκευής (0.22sec) προς την περίοδο του ημιτονοειδούς παλμού (0.29sec) περίπου ίσο με 0.77 και για λόγο  $\tan\phi \cdot g/\alpha_{\max}$  ίσο με 0.5.

Η επιπλέον μείωση της ιδιοπεριόδου του προσομοιώματος (0.22sec) συνεπάγεται ότι ο λόγος  $T_{\text{str}}/T$  είναι μικρότερος της μονάδας και ίσος με 0.77, οπότε η απόκριση του συστήματος είναι μεν σε φάση με την επιβαλλόμενη κίνηση, αλλά οι αδρανειακές δυνάμεις είναι μικρότερες από ότι στην περίπτωση του συντονισμού. Οι αναπτυσσόμενες σεισμικές μετακινήσεις, οι οποίες απεικονίζονται στο Σχήμα 6.10, είναι μεγαλύτερου μεγέθους από ότι στην προηγούμενη περίπτωση όπου η τιμή του λόγου  $T_{\text{str}}/T$  είναι ίση με 1.33 (Σχήμα 6.9), αλλά και ελάχιστα μικρότερες της περίπτωσης του

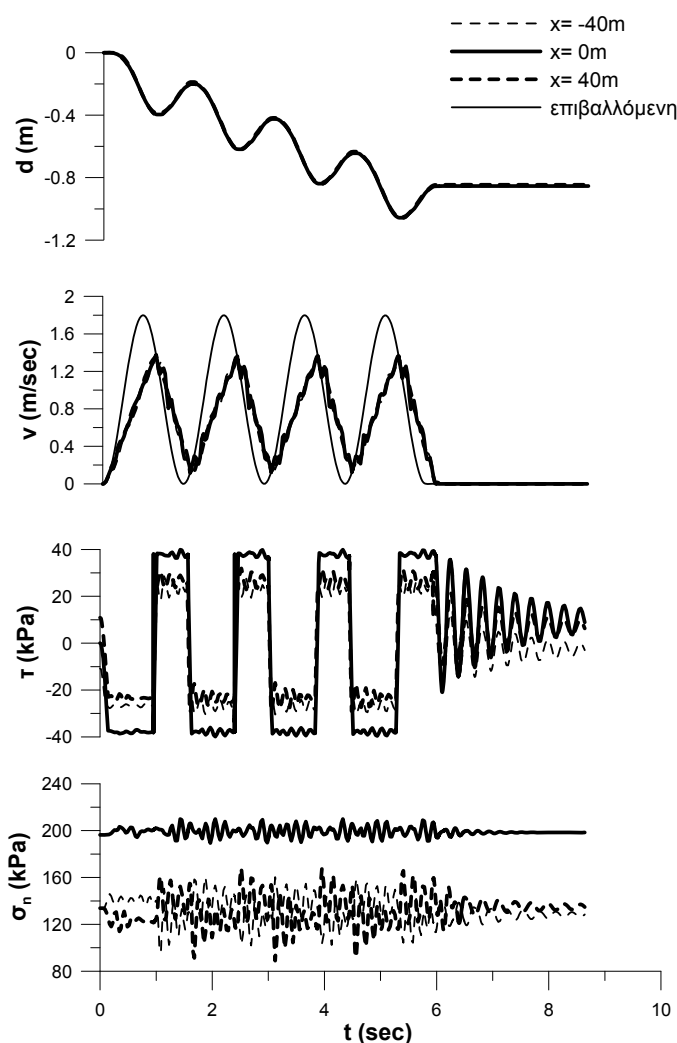
συντονισμού. Επιπλέον, η περαιτέρω μείωση του λόγου  $T_{str}/T$  μειώνει την διαφορά της αθροιστικής ολίσθησης μεταξύ των τριών εξεταζόμενων θέσεων μετά από τέσσερις κύκλους φόρτισης.

Παρατηρείται ακόμη ότι, η χρονική διάρκεια των γεγονότων ολίσθησης διαφέρει ελάχιστα, παρόλο που η αρχική διατμητική τάση για τις τρεις θέσεις είναι διαφορετική, υποδηλώνοντας ότι η επίδραση αυτού του παράγοντα στη συζευγμένη ολίσθηση έχει εξασθενήσει. Από την άλλη πλευρά, ιδιαίτερα έντονη είναι η διακύμανση της ορθής τάσης για τα σημεία Α και Γ, οπότε ανάλογη είναι και η επίδρασή της στην κρίσιμη επιτάχυνση κατά τη διάρκεια της ολίσθησης και στη διαμόρφωση της τελικής αθροιστικής σεισμικής μετακίνησης.



**Σχήμα 6.11.** Χρονοϊστορίες της ολίσθησης ( $d$ ), της ταχύτητας ( $v$ ), της διατμητικής ( $\tau$ ) και ορθής τάσης ( $\sigma_n$ ), τριών χαρακτηριστικών θέσεων κατά μήκος της γεωμεμβράνης. Τα αποτελέσματα αντιστοιχούν σε λόγο της ιδιοπεριόδου της κατασκευής (0.19sec) προς την περίοδο του ημιτονοειδούς παλμού (0.29sec) περίπου ίσο με 0.63 και για λόγο  $\tan\phi \cdot g/\alpha_{max}$  ίσο με 0.5.

Αντίστοιχες παρατηρήσεις ισχύουν και για το πιο δύσκαμπτο από τα εξεταζόμενα προσομοιώματα (βλ. Σχήμα 6.11) με ιδιοπερίοδο ίση με 0.19sec. Το μέγεθος της αναπτυσσόμενης ολίσθησης έχει μειωθεί, ενώ ταυτόχρονα έχει ελαχιστοποιηθεί και η διαφορά των σεισμικών μετακινήσεων μεταξύ των τριών εξεταζόμενων θέσεων. Παρατηρείται δε ότι, η χρονική διάρκεια των γεγονότων ολίσθησης είναι παραπλήσια, οπότε συμπεραίνεται ότι η επίδραση της στατικής διατμητικής τάσης στη συσσώρευση της ολίσθησης είναι αμελητέα. Επίσης, το γεγονός αυτό δείχνει ότι η εξέλιξη της ολίσθησης κατά μήκος της γεωμεμβράνης αναμένεται να είναι αρκετά ομοιόμορφη.



**Σχήμα 6.12.** Χρονοϊστορίες της ολίσθησης ( $d$ ), της ταχύτητας ( $v$ ), της διατμητικής ( $\tau$ ) και ορθής τάσης ( $\sigma_n$ ), τριών χαρακτηριστικών θέσεων κατά μήκος της γεωμεμβράνης. Τα αποτελέσματα αντιστοιχούν σε λόγο της ιδιοπερίόδου της κατασκευής (0.29sec) προς την περίοδο του ημιτονοειδούς παλμού (1.44sec) περίπου ίσο με 0.2 και για λόγο  $\tan\phi \cdot g / \alpha_{\max}$  ίσο με 0.5.

Παρακάτω αναλύεται και η επίδραση της περιόδου του επιβαλλόμενου παλμού ημιτόνου, παραθέτοντας δύο ενδεικτικές περιπτώσεις οι οποίες περιλαμβάνουν έναν

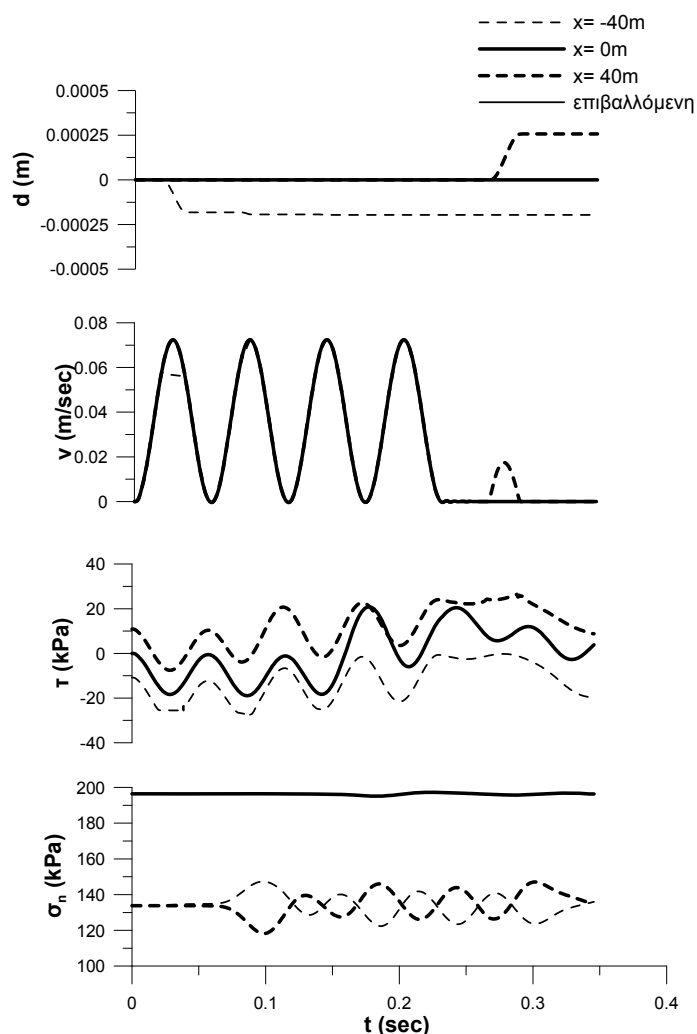
παλμό μεγάλης περιόδου ( $T=1.44\text{sec}$ ) και ένα υψίσυχνο παλμό ( $T=0.057\text{sec}$ ). Στη διερεύνηση αυτή διατηρήθηκε σταθερή η ταχύτητα διάδοσης του διατμητικού κύματος, και η ιδιοπερίοδος της κατασκευής η οποία είναι ίση με  $0.29\text{sec}$ , καταλήγοντας σε τιμές του λόγου  $T_{\text{str}}/T$  ίσες με  $0.2$  και  $5$  για τους δύο παλμούς, αντίστοιχα. Στο Σχήμα 6.12, όπου απεικονίζονται οι χρονοϊστορίες της ολίσθησης, της ταχύτητας, της διατμητικής και ορθής τάσης των τριών σημείων για τον παλμό μεγάλης περιόδου, διαπιστώνεται ότι η ολίσθηση λαμβάνει εξαιρετικά μεγάλες τιμές σε σύγκριση με τις μέχρι στιγμής εξεταζόμενες περιπτώσεις. Το φαινόμενο αυτό αποδίδεται κυρίως στη μεγάλη περίοδο του παλμού, η οποία καταλήγει και σε μεγάλες τιμές της ταχύτητας της επιβαλλόμενης κίνησης, αφού ως γνωστόν η ολίσθηση προκύπτει από την ολοκλήρωση της σχετικής ταχύτητας. Επιπλέον, η μικρή τιμή του λόγου της ιδιοπεριόδου του προσομοιώματος προς την περίοδο του παλμού, συνεπάγεται τη μείωση της τιμής της κρίσιμης επιτάχυνσης για την έναρξη της ολίσθησης.

Ενδιαφέρον παρουσιάζει επίσης, η σχετικά ομοιόμορφη ανάπτυξη της ολίσθησης για τις τρεις εξεταζόμενες θέσεις. Η παρατήρηση αυτή, σε συνδυασμό με την ίδια χρονική διάρκεια των γεγονότων ολίσθησης, δείχνει ότι η επίδραση του στατικού πεδίου τάσεων στη συζευγμένη απόκριση έχει πρακτικά μηδενιστεί. Ακόμη παρατηρείται σχεδόν γραμμική κατανομή της ταχύτητας των σημείων της γεωμεμβράνης κατά τη διάρκεια της ολίσθησης, γεγονός που παραπέμπει στην κλασσική ανάλυση Newmark (1965) για απολύτως δόσκαμπα σώματα. Σε πλήρη αντίθεση με τα προαναφερθέντα, ο υψίσυχνος παλμός σχετίζεται με πρακτικά μηδενικές σεισμικές μετακινήσεις (βλ. Σχήμα 6.13). Υπενθυμίζεται ότι, για τη συγκεκριμένη τιμή του λόγου  $T_{\text{str}}/T$  δεν είναι δυνατή η ανάπτυξη της ολίσθησης σύμφωνα και με την αναλυτική λύση του προηγούμενου κεφαλαίου.

Η επίδραση του συχνотικού περιεχομένου της επιβαλλόμενης διέγερσης εξετάζεται και για τις τρεις σεισμικές καταγραφές υπολογίζοντας τη συζευγμένη απόκριση του προσομοιώματος με ιδιοπερίοδο ίση με  $0.29\text{sec}$ . Στο Σχήμα 6.14 παρουσιάζονται οι χρονοϊστορίες της ολίσθησης για την καταγραφή του σεισμού της Λευκάδας (2003), την καταγραφή στα Σεπόλια από τον σεισμό της Αθήνας (1999) και την καταγραφή Bolu από τον σεισμό Duzce (1999), στα τρία εξεταζόμενα σημεία. Είναι προφανές ότι το σύνθετο συχνотικό περιεχόμενο των τριών καταγραφών έχει επιδράσει στη διαδικασία συσσώρευσης της ολίσθησης. Πιο συγκεκριμένα, για την καταγραφή του σεισμού της Λευκάδας (2003) λαμβάνουν χώρα περισσότερα γεγονότα ολίσθησης σε σύγκριση με τις

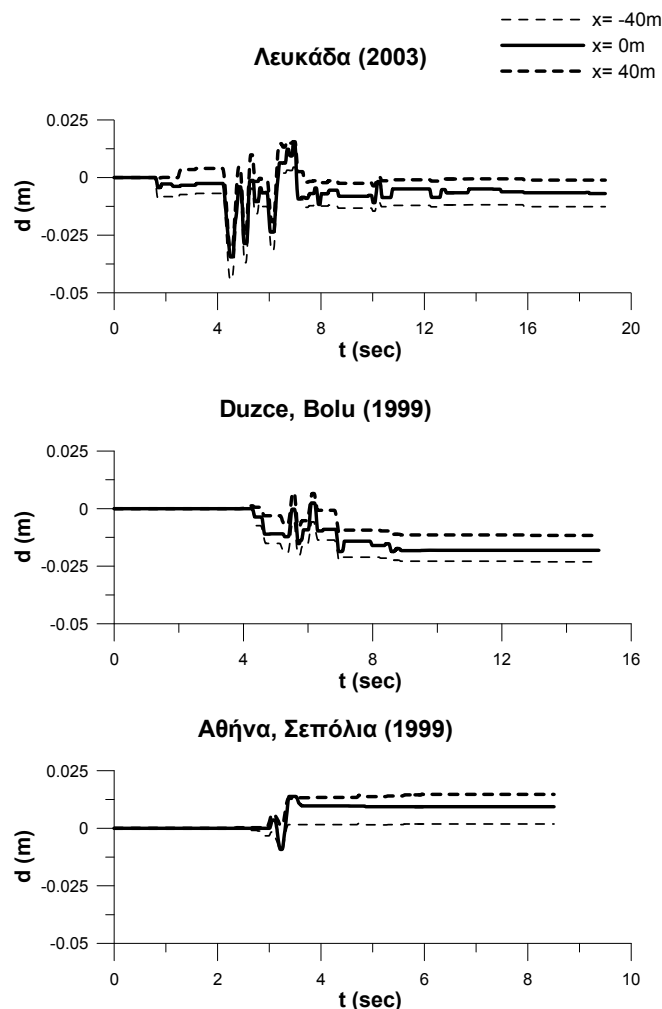


άλλες δύο καταγραφές, γεγονός το οποίο αναμενόταν αφού οι σημαντικοί κύκλοι της καταγραφής αυτής είναι περισσότεροι.



**Σχήμα 6.13.** Χρονοϊστορίες της ολίσθησης ( $d$ ), της ταχύτητας ( $v$ ), της διατμητικής ( $\tau$ ) και ορθής τάσης ( $\sigma_n$ ), τριών χαρακτηριστικών θέσεων κατά μήκος της γεωμεμβράνης. Τα αποτελέσματα αντιστοιχούν σε λόγο της ιδιοπεριόδου της κατασκευής (0.29sec) προς την περίοδο του ημιτονοειδούς παλμού (0.057sec) περίπου ίσο με 5 και για λόγο  $\tan\phi \cdot g / \alpha_{\max}$  ίσο με 0.5.

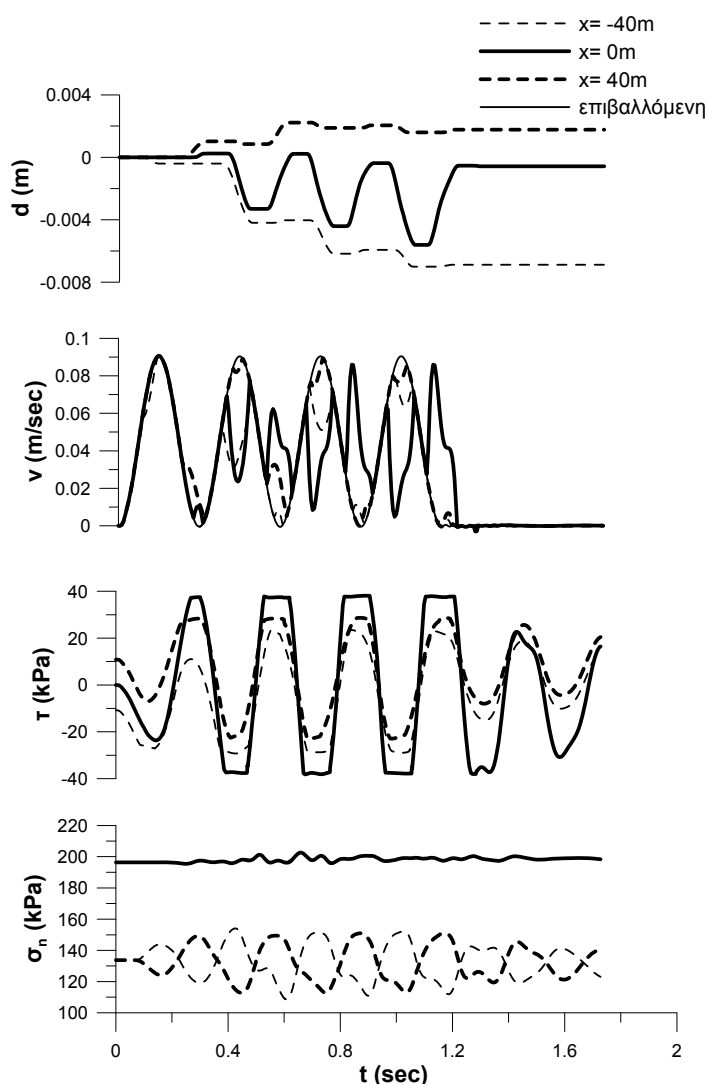
Αντιθέτως, η καταγραφή από τον σεισμό της Αθήνας στα Σεπόλια (1999) προκαλεί την ανάπτυξη μόνο δύο κύκλων ολίσθησης, με κύρια διεύθυνση ολίσθησης αντίθετη των άλλων δύο καταγραφών. Επιπλέον, παρατηρείται ότι και στις τρεις καταγραφές το μέγεθος της παραμένουσας σεισμικής μετακίνησης διαφέρει για τις εξεταζόμενες θέσεις του Χ.Υ.Τ.Α.. Πιο συγκεκριμένα, για τις καταγραφές του σεισμού της Λευκάδας (2003) και του Duzce (1999) υπολογίζεται μεγαλύτερο μέγεθος ολίσθησης στη θέση Α, ενώ για την καταγραφή στα Σεπόλια (Αθήνα, 1999) η μέγιστη ολίσθηση αναπτύσσεται στη θέση Γ λόγω της αντίθετης φοράς της ολίσθησης.



**Σχήμα 6.14.** Χρονοϊστορίες της ολισθήσης ( $d$ ) των τριών χαρακτηριστικών θέσεων κατά μήκος της γεωμεμβράνης για τις καταγραφές των σεισμών της Λευκάδας (2003), της Αθήνας (Σεπόλια, 1999), και του Duzce (Bolu, 1999). Τα αποτελέσματα αντιστοιχούν σε λόγο της ιδιοπεριόδου της κατασκευής ( $0.29\text{sec}$ ) και για λόγο  $\tan\phi \cdot g / \alpha_{\max}$  ίσο με  $0.5$ , με μέγιστη επιτάχυνση ίση με  $0.4g$ .

Η τελευταία παράμετρος που εξετάστηκε είναι το μέγεθος της επιβαλλόμενης επιτάχυνσης. Ενδεικτικά παρατίθεται η αντίστοιχη περίπτωση με το χαρακτηριστικό παράδειγμα το οποίο αναλύθηκε λεπτομερώς (ιδιοπερίοδος του προσομοιώματος και περίοδος του παλμού ημιτόνου ίση με  $0.29\text{sec}$ ), αλλά η μέγιστη επιβαλλόμενη επιτάχυνση είναι ίση με  $0.1g$  αντί για  $0.4g$ . Στο Σχήμα 6.15 φαίνονται οι χρονοϊστορίες της ολισθήσης, της ταχύτητας, της διατμητικής και ορθής τάσης για τις τρεις εξεταζόμενες θέσεις. Η σύγκριση των δύο αντίστοιχων περιπτώσεων δείχνει αρχικά ότι η μείωση της μέγιστης επιβαλλόμενης επιτάχυνσης σχετίζεται με μείωση των αναπτυσσόμενων σεισμικών μετακινήσεων. Επιπλέον, διαπιστώνεται ότι η ολισθήση αρχίζει να συσσωρεύεται μετά τον πρώτο κύκλο της επιβαλλόμενης φόρτισης, και μόνο

για το σημείο Β οι κύκλοι ολίσθησης είναι πλήρεις, αναπτύσσοντας και ολίσθηση αντίθετης φοράς. Η μη συμμετρική ολίσθηση τόσο του σημείου Α όσο και του Γ, καταλήγει σε παραμένουσα ολίσθηση αντίθετης φοράς για τα δύο σημεία. Η συμπεριφορά αυτή αποδίδεται αφενός στις μικρότερες αδρανειακές δυνάμεις συγκριτικά με τη θέση Β, αφετέρου στην επίδραση της στατικής διατμητικής τάσης.



**Σχήμα 6.15.** Χρονοϊστορίες της ολίσθησης ( $d$ ), της ταχύτητας ( $v$ ), της διατμητικής ( $\tau$ ) και ορθής τάσης ( $\sigma_n$ ), τριών χαρακτηριστικών θέσεων κατά μήκος της γεωμεμβράνης. Τα αποτελέσματα αντιστοιχούν σε λόγο της ιδιοπεριόδου της κατασκευής (0.29sec) προς την περίοδο του ημιτονοειδούς παλμού ίσο με μονάδα και για λόγο  $\tan\phi \cdot g / a_{\max}$  ίσο για 2, με μέγιστη επιτάχυνση ίση με 0.1g.

#### 6.4.2 Κανονικοποίηση της μετακίνησης

Κατά την προηγηθείσα παραμετρική διερεύνηση διαπιστώθηκε ότι ο μηχανισμός συσσώρευσης της ολίσθησης και η παραμένουσα σεισμική μετακίνηση εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την ιδιοπερίοδο της κατασκευής, την περίοδο της επιβαλλόμενης

διέγερσης και τη μέγιστη επιβαλλόμενη επιτάχυνση. Η διερεύνηση όμως της δυναμικής απόκρισης των απλοποιητικών συζευγμένων προσομοιωμάτων στο προηγούμενο κεφάλαιο απέδειξε ότι η επίδραση των παραμέτρων αυτών μπορεί να συμπυκνωθεί σε δύο λόγους:

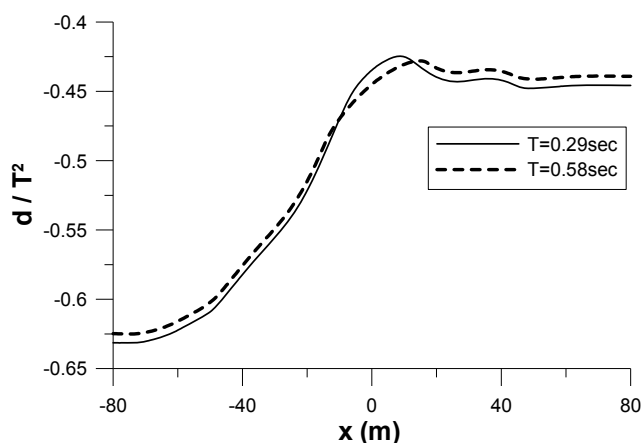
- τον λόγο της ιδιοπεριόδου της γεωκατασκευής προς την περίοδο της διέγερσης ( $T_{str}/T$ ), και
- τον λόγο της διατμητικής αντοχής της διεπιφάνειας προς τη μέγιστη επιβαλλόμενη επιτάχυνση ( $\tan\phi \cdot g/\alpha_{max}$ ).

Με βάση τα προαναφερθέντα πιστοποιήθηκε η ορθότητα της κανονικοποιημένης ολίσθησης ως προς τη μέγιστη επιβαλλόμενη επιτάχυνση και το τετράγωνο της περιόδου της διέγερσης. Η πιθανή κανονικοποίηση της ολίσθησης ως προς τις ίδιες παραμέτρους για τη λεπτομερή διδιάστατη αριθμητική προσομοίωση εξετάζεται στη συνέχεια.

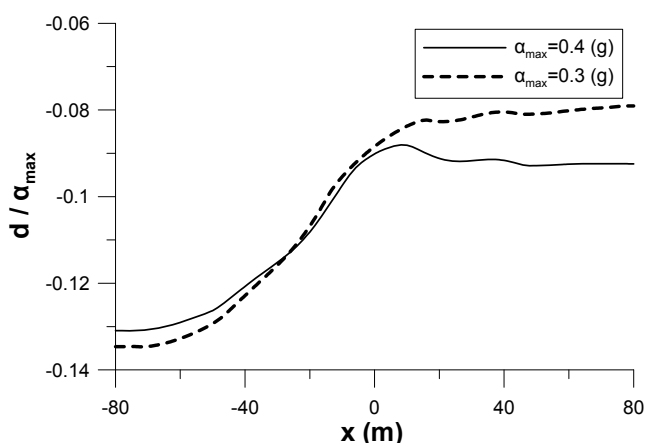
Το Σχήμα 6.16 παρουσιάζει την κανονικοποιημένη, ως προς το τετράγωνο της περιόδου της επιβαλλόμενης χρονοϊστορίας επιτάχυνσης, παραμένουσα σεισμική μετακίνηση κατά μήκος της κατώτερης διεπιφάνειας της γεωμεμβράνης για δύο προσομοιώσεις. Για τις δύο αυτές περιπτώσεις ο λόγος της ιδιοπεριόδου της κατασκευής προς την περίοδο της διέγερσης είναι ίσος με τη μονάδα και ο λόγος της διατμητικής αντοχής της διεπιφάνειας προς τη μέγιστη επιβαλλόμενη επιτάχυνση είναι ίσος με 0.5. Τα δύο προσομοιώματα χαρακτηρίζονται από διαφορετικές τιμές της ταχύτητας διάδοσης του διατμητικού κύματος (250m/sec και 125m/sec), οι οποίες σχετίζονται με διαφορετικές ιδιοπεριόδους του προσομοιώματος (0.29sec και 0.57sec) οι οποίες είναι ίσες κάθε φορά με την περίοδο της επιβαλλόμενης ημιτονικής επιτάχυνσης. Παρατηρείται αξιοσημείωτη σύγκλιση των υπολογισθέντων κανονικοποιημένων σεισμικών μετακινήσεων κατά μήκος της κατώτερης διεπιφάνειας της γεωμεμβράνης μεταξύ των δύο εξεταζόμενων περιπτώσεων.

Επιπλέον, εξετάζεται και η κανονικοποίηση ως προς τη μέγιστη επιβαλλόμενη επιτάχυνση. Για τον σκοπό αυτό συγκρίνονται τα αποτελέσματα δύο προσομοιωμάτων με λόγο ιδιοπεριόδου της κατασκευής προς την περίοδο της διέγερσης ίσο με τη μονάδα και λόγο της διατμητικής αντοχής της διεπιφάνειας προς τη μέγιστη επιβαλλόμενη επιτάχυνση ίσο με 0.5. Για την πρώτη εκ των δύο περιπτώσεων η διατμητική αντοχή της κατώτερης διεπιφάνειας χαρακτηρίζεται από γωνία τριβής ίση με  $11^\circ$ , ενώ η μέγιστη επιβαλλόμενη επιτάχυνση είναι ίση με 0.4g. Για τη δεύτερη περίπτωση η διατμητική

αντοχή της κατώτερης διεπιφάνειας χαρακτηρίζεται από γωνία τριβής ίση με  $8.5^\circ$ , ενώ η μέγιστη επιβαλλόμενη επιτάχυνση είναι ίση με  $0.3g$ . Από το Σχήμα 6.17 που παρατίθενται οι κατανομές των παραμενουσών μετακινήσεων μετά το πέρας των τεσσάρων κύκλων ολίσθησης κατά μήκος της γεωμεμβράνης, εξάγεται το συμπέρασμα ότι η αποτελεσματικότητα της κανονικοποίησης είναι ικανοποιητική για το μεγαλύτερο τμήμα της διεπιφάνειας.



**Σχήμα 6.16.** Κανονικοποίηση της παραμένουσας ολίσθησης ως προς το τετράγωνο της περιόδου. Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα δύο προσομοιωμάτων με λόγο  $T_{str}/T$  ίσο με τη μονάδα και λόγο  $\tan\phi \cdot g/\alpha_{max}$  ίσο με  $0.5$ . Η περίοδος του παλμού ημιτόνου και συνεπώς και η ιδιοπερίοδος του κάθε προσομοιώματος είναι ίση προς  $0.29\text{sec}$  και  $0.58\text{sec}$ , αντίστοιχα.



**Σχήμα 6.17.** Κανονικοποίηση της παραμένουσας ολίσθησης ως προς την μέγιστη επιβαλλόμενη επιτάχυνση. Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα δύο προσομοιωμάτων με λόγο  $T_{str}/T$  ίσο με τη μονάδα και ίδιο λόγο  $\tan\phi \cdot g/\alpha_{max}$  ίσο με  $0.5$ . Για την πρώτη περίπτωση η γωνία τριβής είναι ίση με  $11^\circ$  και η μέγιστη επιτάχυνση ίση με  $0.4g$  και για τη δεύτερη η γωνία τριβής είναι ίση με  $8.5^\circ$  και η μέγιστη επιτάχυνση ίση με  $0.3g$ .

Υπό το πρίσμα της κανονικοποίησης της συσσωρευόμενης ολίσθησης ως προς τη μέγιστη επιβαλλόμενη επιτάχυνση και το τετράγωνο της περιόδου της διέγερσης, παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.18 οι παραμένουσες σεισμικές μετακινήσεις κατά μήκος

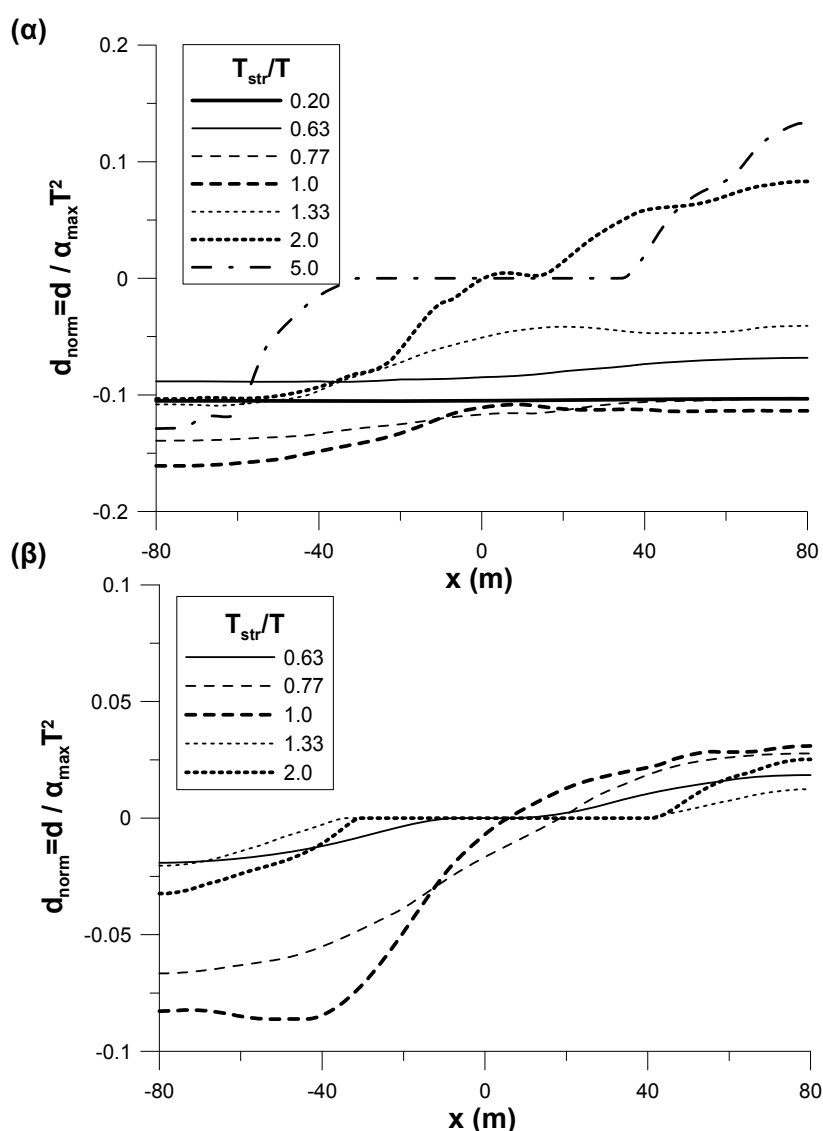
της κατώτερης διεπιφάνειας της γεωμεμβράνης. Τα αποτελέσματα αντιστοιχούν σε διάφορες τιμές του λόγου της ιδιοπεριόδου της κατασκευής προς την περίοδο της διέγερσης και για τιμές του λόγου της διατμητικής αντοχής της διεπιφάνειας προς την μέγιστη επιβαλλόμενη επιτάχυνση ίσες με 0.5 και 2.0. Κατ' αρχάς, παρατηρείται ότι η επίδραση του λόγου  $T_{str}/T$  στην κατανομή της παραμένουσας ολίσθησης είναι αρκετά έντονη. Ομοίως πολύ σημαντική είναι και η επίδραση της τιμής του λόγου  $\tan\phi \cdot g/\alpha_{max}$ .

Πιο συγκεκριμένα, εξετάζοντας την περίπτωση όπου ο λόγος  $\tan\phi \cdot g/\alpha_{max}$  λαμβάνει τιμή ίση με 0.5 (Σχήμα 6.18α), διαπιστώνεται ότι η κατανομή της ολίσθησης είναι ομοιόμορφη κατά μήκος της διεπιφάνειας της γεωμεμβράνης μόνο για σχετικά μικρές τιμές του λόγου  $T_{str}/T$  (0.2 και 0.63). Εν γένει, οι παραμένουσες σεισμικές μετακινήσεις αυξάνονται καθώς μεγαλώνει η τιμή του λόγου  $T_{str}/T$  πριν τον συντονισμό, ενώ μειώνονται για τιμές του λόγου  $T_{str}/T$  μεγαλύτερες της μονάδας. Επιπροσθέτως, παρουσιάζεται μια τάση να αναπτύσσονται μεγαλύτερες μετακινήσεις κατά μήκος του αριστερού τμήματος της διεπιφάνειας σχετικά με τον άξονα συμμετρίας, η οποία γίνεται πιο έντονη καθώς αυξάνεται η τιμή του λόγου  $T_{str}/T$  από 0.77 έως 1.33. Η περαιτέρω αύξηση του λόγου  $T_{str}/T$  σε τιμές μεγαλύτερες ή ίσες του δύο, καταλήγει στην ανάπτυξη αντισυμμετρικής ολίσθησης, δηλαδή παραμένουσα σεισμική μετακίνηση αντίθετης φοράς εκατέρωθεν του άξονα συμμετρίας.

Η αύξηση του λόγου  $\tan\phi \cdot g/\alpha_{max}$  έχει ως αποτέλεσμα, όπως άλλωστε αναμενόταν, τη μείωση των κανονικοποιημένων σεισμικών μετακινήσεων κατά μήκος της κατώτερης διεπιφάνειας της γεωμεμβράνης (βλ. Σχήμα 6.18β). Οι δύο ακραίες περιπτώσεις του λόγου  $T_{str}/T$  (0.2 και 5.0) δεν εξετάζονται καθώς δεν αναμένεται να αναπτυχθεί ολίσθηση. Αντίστοιχα με την προηγηθείσα περίπτωση η παραμένουσα ολίσθηση αυξάνεται καθώς μεγαλώνουν οι τιμές του λόγου  $T_{str}/T$  πριν τον συντονισμό. Αντιθέτως, στην περίπτωση της μικρότερης εξεταζόμενης τιμής του λόγου  $\tan\phi \cdot g/\alpha_{max}$ , η κατανομή των παραμενουσών σεισμικών μετακινήσεων παρουσιάζει αντισυμμετρική διακύμανση ως προς τον άξονα συμμετρίας σε όλες τις περιπτώσεις. Το φαινόμενο αυτό γίνεται πιο έντονο για τις περιπτώσεις του λόγου  $T_{str}/T$  (0.63, 1.33 και 2.0), στις οποίες δεν αναπτύσσεται ολίσθηση κατά μήκος του τμήματος της διεπιφάνειας το οποίο κείται κάτωθεν του καταστώματος του Χ.Υ.Τ.Α..

Τέλος, παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.19 οι αντίστοιχες κατανομές της κανονικοποιημένης παραμένουσας ολίσθησης κατά μήκος της κατώτερης διεπιφάνειας

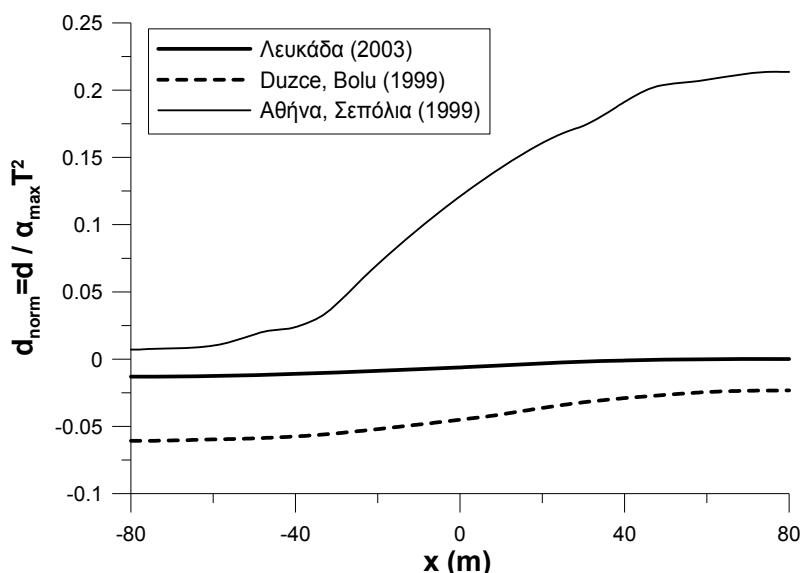
της γεωμεμβράνης για τις τρεις εξεταζόμενες σεισμικές καταγραφές. Η κανονικοποίηση των σεισμικών μετακινήσεων έγινε ως προς τη δεσπόζουσα περίοδο της κάθε χρονοϊστορίας επιτάχυνσης. Πρέπει να σημειωθεί ότι οι σεισμικές καταγραφές διαφέρουν σε σχέση με τους παλμούς ημιτόνου όσον αφορά στα χαρακτηριστικά που σχετίζονται με την ανάπτυξη της ολίσθησης. Τα χαρακτηριστικά αυτά αφορούν κυρίως τους σημαντικούς κύκλους φόρτισης, την ασύμμετρη διακύμανση της επιβαλλόμενης επιτάχυνσης, η οποία συνεπάγεται διαφορετικό αριθμό γεγονότων ολίσθησης για τις δύο φορές της κίνησης, καθώς και τη μη ομοιόμορφη κατανομή της ταχύτητας της φόρτισης.



**Σχήμα 6.18.** Κατανομή της κανονικοποιημένης παραμένουσας σεισμικής μετακίνησης κατά μήκος της κατώτερης διεπιφάνειας της γεωμεμβράνης για διάφορες τιμές του λόγου  $T_{\text{str}}/T$ . Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για: (α) τιμή του λόγου  $\tan\phi \cdot g / \alpha_{\text{max}}$  ίση με 0.5, και (β) τιμή του λόγου  $\tan\phi \cdot g / \alpha_{\text{max}}$  ίση με 2.0.

Οι σημαντικοί κύκλοι για τις τρεις καταγραφές είναι τέσσερις, τρεις και δύο για την καταγραφή του σεισμού της Λευκάδας (2003), την καταγραφή Bolu από τον σεισμό Duzce (1999) και την καταγραφή στα Σεπόλια από τον σεισμό της Αθήνας (1999) αντίστοιχα. Επιπλέον, η τελευταία καταγραφή διαφέρει αρκετά ως προς τις υπόλοιπες καθώς είναι περισσότεροι οι κύκλοι φόρτισης που μπορούν να προκαλέσουν ολίσθηση στη μια εκ των δύο διευθύνσεων, και η διακύμανση της ταχύτητας λαμβάνει κατά κύριο λόγο θετικές τιμές. Τα χαρακτηριστικά αυτά διαπιστώθηκε ότι επηρεάζουν τη συσσώρευση της ολίσθησης, όπως αναπτύχθηκε και στην προηγούμενη ανάλυση του Σχήματος 6.14.

Παρόλα αυτά, στις κατανομές της κανονικοποιημένης ολίσθησης των τριών σεισμικών καταγραφών παρατηρείται ότι, τα γενικά χαρακτηριστικά που προέκυψαν για τους ημιτονοειδείς παλμούς, βρίσκουν εφαρμογή και για τις σεισμικές καταγραφές. Δηλαδή, για τις δύο περιπτώσεις που η τιμή του λόγου  $T_{str}/T$  είναι μικρότερη της μονάδας η κατανομή της κανονικοποιημένης ολίσθησης είναι σχεδόν ομοιόμορφη. Αυτή η εικόνα προκύπτει για την καταγραφή του σεισμού της Λευκάδας και την καταγραφή Bolu από τον σεισμό Duzce (1999), όπου οι τιμές του λόγου  $T_{str}/T$  είναι ίσες με 0.53 και 0.9, αντίστοιχα. Επίσης για τις δύο αυτές περιπτώσεις το μέγεθος της ολίσθησης αυξάνεται, αυξανόμενου του λόγου  $T_{str}/T$ .



**Σχήμα 6.19.** Κατανομή της κανονικοποιημένης παραμένουσας σεισμικής μετακίνησης κατά μήκος της κατώτερης διεπιφάνειας της γεωμεμβράνης για τις τρεις σεισμικές καταγραφές του σεισμού της Λευκάδας (2003), της Αθήνας (Σεπόλια, 1999) και του Duzce (Bolu, 1999). Τα αποτελέσματα αντιστοιχούν σε ιδιοπερίοδο της κατασκευής (0.29sec) και για λόγο  $\tan\phi * g / \alpha_{max}$  ίσο με 0.5, που προκύπτει για μέγιστη επιτάχυνση ίση με 0.4g.



Αντιθέτως, έντονα ανομοιόμορφη είναι η κατανομή της παραμένουσας σεισμικής μετακίνησης που υπολογίστηκε για την καταγραφή στα Σεπόλια από το σεισμό της Αθήνας (1999). Η περίπτωση αυτή αντιστοιχεί σε τιμή του λόγου  $T_{str}/T$  περίπου ίσο με δύο, συνεπώς η συμπεριφορά αυτή βρίσκεται σε αντιστοιχία με τις παρατηρήσεις της αντίστοιχης περίπτωσης επιβολής ημιτονοειδούς παλμού. Το γεγονός ότι δεν αναπτύσσεται μετακίνηση αντίθετης φοράς εκατέρωθεν του άξονα συμμετρίας, αποδίδεται στη μη συμμετρική φόρτιση που επιβάλλεται από τη συγκεκριμένη καταγραφή.

#### 6.4.3 Σύγκριση με τα απλοποιητικά προσομοιώματα

Όπως έχει ήδη αναφερθεί με την λεπτομερή αριθμητική προσομοίωση, επιτυγχάνεται ο συνυπολογισμός της διδιάστατης γεωμετρίας του προσομοιώματος και της κατανομής των στατικών διατμητικών και ορθών τάσεων στη συζευγμένη απόκριση του Χ.Υ.Τ.Α. Προκειμένου να διαπιστωθεί η απόκλιση των απλοποιητικών προσομοιωμάτων από την ακριβέστερη ανάλυση με τη χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων, συγκρίνονται παρακάτω τα αποτελέσματα της αναπτυχθείσας αναλυτικής λύσης του 5<sup>ου</sup> Κεφαλαίου και του προσομοιώματος που προτάθηκε από τους Westermo and Udvardia (1983) (βλ. Σχήμα 5.15) με τις λεπτομερείς αριθμητικές αναλύσεις του παρόντος κεφαλαίου.

Στον Πίνακα 6.1. παρατίθενται οι τιμές της κρίσιμης επιτάχυνσης για την έναρξη της ολίσθησης, όπως προέκυψαν από τις διδιάστατες αριθμητικές αναλύσεις με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων και οι αντίστοιχες από την αναλυτική λύση για τιμή του λόγου  $\tan\phi \cdot g/\alpha_{max}$  ίση με 0.5. Για να είναι εφικτή η σύγκριση, τα αποτελέσματα για τις διδιάστατες αριθμητικές αναλύσεις αντιστοιχούν στη θέση Β, δηλαδή στον άξονα συμμετρίας του προσομοιώματος, όπου δεν υφίσταται η επίδραση των ορθών και διατμητικών τάσεων.

Γενικά, παρατηρείται αρκετά ικανοποιητική σύγκλιση για τη συγκεκριμένη τιμή του λόγου  $\tan\phi \cdot g/\alpha_{max}$  ίση με 0.5 των δύο μεθόδων, όσον αφορά στο εξεταζόμενο μέγεθος του λόγου των επιταχύνσεων. Σημειώνεται όμως ότι, η σύγκριση των τιμών της κρίσιμης επιτάχυνσης για τιμή του λόγου  $\tan\phi \cdot g/\alpha_{max}$  ίση με 2.0 έδειξε ότι για τις περιπτώσεις που είναι δυνατή η ολίσθηση (λόγος  $T_{str}/T$  ίσος με 0.77 και 1.0) τα αποτελέσματα των δύο μεθοδολογιών διαφέρουν αρκετά περισσότερο. Στις περιπτώσεις όπου δεν

προβλέπεται ολίσθηση από την εφαρμογή της αναλυτικής λύσης, η ολίσθηση που υπολογίστηκε κάτω από το κατάρσρωμα του προσομοιώματος είναι μηδενική.

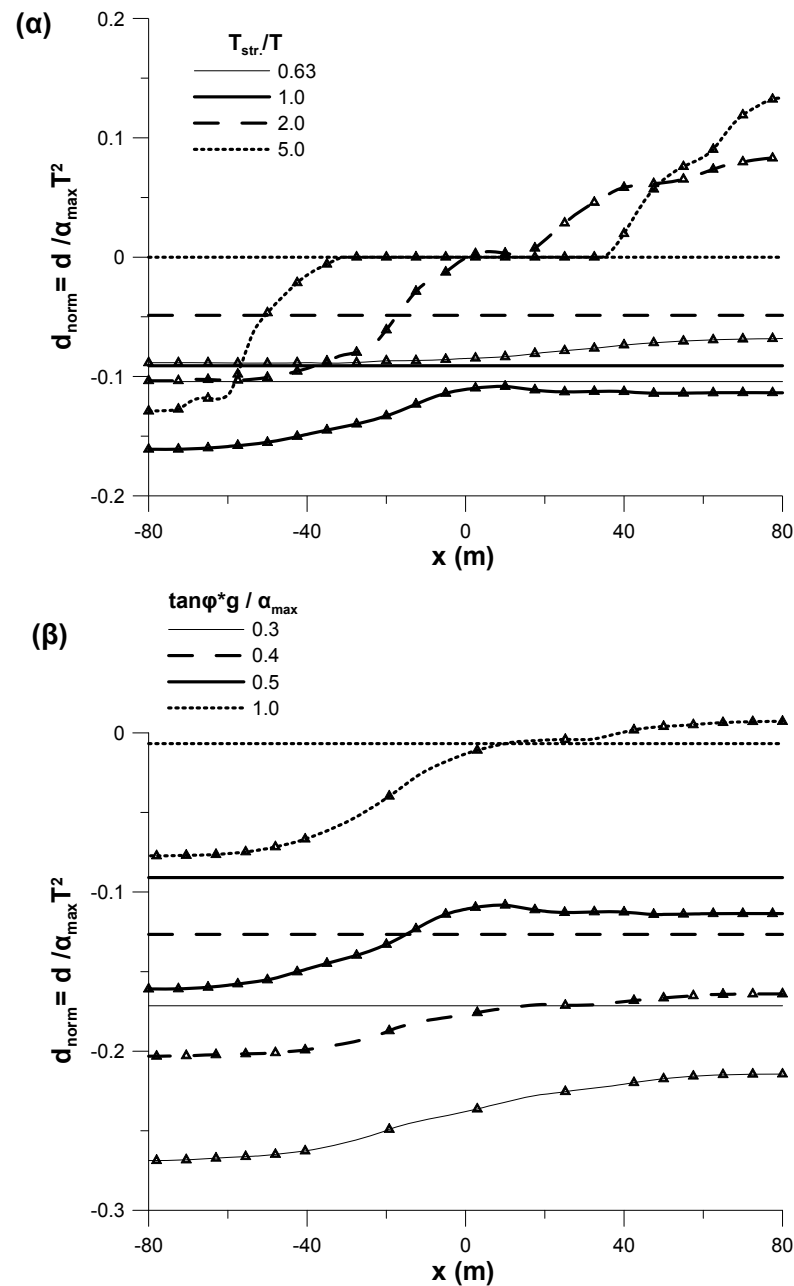
**Πίνακας 6.1.** Τιμές του λόγου της κρίσιμης επιτάχυνσης προς τη μέγιστη επιβαλλόμενη  $\alpha_{crit}/\alpha_{max}$  για κάθε εξεταζόμενη τιμή του λόγου  $T_{str}/T$  και για τιμή του λόγου  $\tan\phi \cdot g/\alpha_{max}$  ίση με 0.5. Τα αποτελέσματα αντιστοιχούν στις διδιάστατες αριθμητικές αναλύσεις (2D FEM) και τις υπολογιζόμενες από την προτεινόμενη αναλυτική λύση.

| $T_{str}/T$ | $\alpha_{crit}/\alpha_{max}$ (2D FEM) | $\alpha_{crit}/\alpha_{max}$ (αναλ.) |
|-------------|---------------------------------------|--------------------------------------|
| 0.20        | 0.58                                  | 0.54                                 |
| 0.63        | 0.90                                  | 0.90                                 |
| 0.77        | 0.95                                  | 0.96                                 |
| 1.00        | 0.98                                  | 1.00                                 |
| 1.33        | 0.98                                  | 0.97                                 |
| 2.00        | 0.78                                  | 0.57                                 |
| 5.00        | -                                     | -                                    |

Για τη σύγκριση σε όρους σεισμικών μετακινήσεων, αναλύθηκε το προσομοίωμα που προτάθηκε αρχικά από τους Westermo and Udwardia (1983) για ιδιοπερίοδο του προσομοιώματος, περίοδο της επιβαλλόμενης φόρτισης, μέγιστη επιβαλλόμενη επιτάχυνση και διατμητική αντοχή, ίσες με τις αντίστοιχες της λεπτομερούς αριθμητικής προσομοίωσης. Οι λεπτομέρειες της αριθμητικής ανάλυσης του απλοποιητικού προσομοιώματος έχουν παρουσιαστεί στο 5<sup>ο</sup> Κεφάλαιο (βλ. ενότητα 5.3.3). Στο Σχήμα 6.20 παρουσιάζεται η κανονικοποιημένη παραμένουσα σχετική μετακίνηση κατά μήκος της κατώτερης διεπιφάνειας της γεωμεμβράνης, όπως προέκυψε για διάφορες τιμές του λόγου  $T_{str}/T$  και για διάφορες τιμές του λόγου  $\tan\phi \cdot g/\alpha_{max}$  από τις διδιάστατες αριθμητικές αναλύσεις (καμπύλες με σύμβολα) και από την επίλυση του απλοποιητικού προσομοιώματος (ευθείες γραμμές).

Σημειώνεται ότι, οι τιμές του λόγου  $T_{str}/T$  μεταβάλλονται θεωρώντας σταθερή τιμή του λόγου  $\tan\phi \cdot g/\alpha_{max}$  ίση με 0.5 (Σχήμα 6.20α) και οι τιμές του λόγου  $\tan\phi \cdot g/\alpha_{max}$  μεταβάλλονται θεωρώντας σταθερή τιμή του λόγου  $T_{str}/T$  ίση με τη μονάδα (Σχήμα 6.20β). Η πιο σημαντική διαφορά των δύο μεθοδολογιών είναι ότι το απλοποιητικό προσομοίωμα δεν δύναται να αποδώσει την κατανομή της ολίσθησης κατά μήκος της κατώτερης επιφάνειας της γεωμεμβράνης. Όσον αφορά στο μέγεθος της υπολογισθείσας ολίσθησης, δεν είναι σημαντική η απόκλιση των δύο μεθοδολογιών για μικρές και μεγάλες τιμές του λόγου  $T_{str}/T$ . Για την περίπτωση του συντονισμού, η απλοποιητική

μεθοδολογία προσεγγίζει ικανοποιητικά την αναπτυσσόμενη ολίσθηση του δεξιού τμήματος της διεπιφάνειας ως προς τον άξονα συμμετρίας. Όμως για την περίπτωση της έντονα αντισυμμετρικής συμπεριφοράς ( $T_{str}/T=2$ ) η απόκλιση των δύο μεθοδολογιών είναι εξαιρετικά σημαντική, με την λεπτομερή αριθμητική προσομοίωση να υπολογίζει σημαντικά μεγαλύτερες τιμές σχετικής μετακίνησης.



**Σχήμα 6.20.** Κατανομή της κανονικοποιημένης παραμένουσας σεισμικής μετακίνησης κατά μήκος της κατώτερης διεπιφάνειας της γεωμεμβράνης. Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για: (α) διάφορες τιμές του λόγου  $T_{str}/T$  και τιμή του λόγου  $\tan\phi^*g / \alpha_{max}$  ίση με 0.5, και (β) διάφορες τιμές του λόγου  $\tan\phi^*g / \alpha_{max}$  και τιμή του λόγου  $T_{str}/T$  ίση με 1.0. Οι καμπύλες με τα σύμβολα αντιστοιχούν στα αποτελέσματα των διδιάστατων αριθμητικών αναλύσεων ενώ οι ευθείες γραμμές στα αποτελέσματα του απλοποιητικού προσομοιώματος.

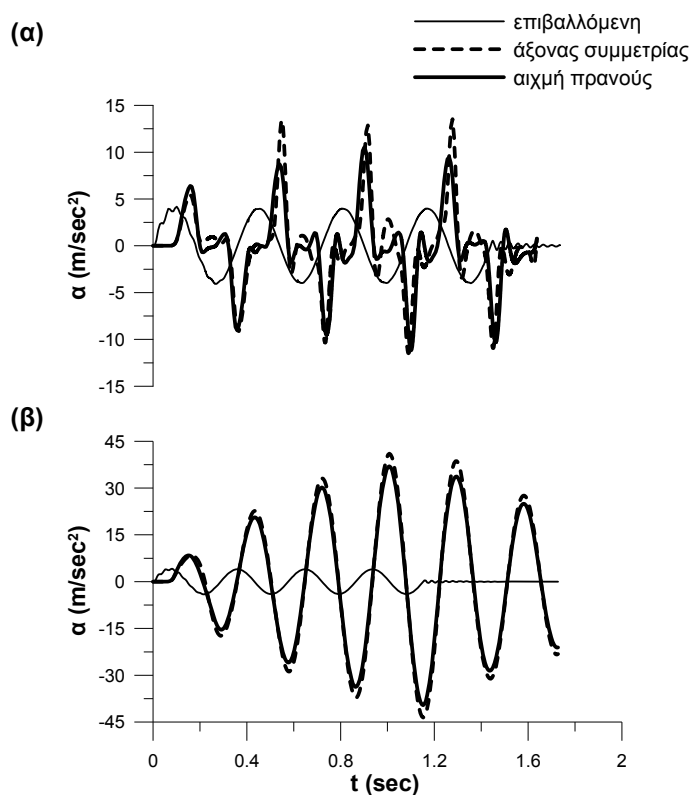
Όσον αφορά στη συσχέτιση των αποτελεσμάτων των δύο μεθόδων συναρτίζει του λόγου  $\tan\phi \cdot g / \alpha_{\max}$ , παρατηρείται ότι η αύξηση του λόγου αυτού μειώνει κάπως την απόκλιση των υπολογισθείσων σεισμικών μετακινήσεων, κυρίως στο δεξιό τμήμα του Χ.Υ.Τ.Α. Όμως, οι παραμένουσες σεισμικές μετακινήσεις του αριστερού τμήματος σε σχέση με τον άξονα συμμετρίας εξακολουθούν να λαμβάνουν μεγαλύτερες τιμές, οι οποίες δεν είναι δυνατό να υπολογιστούν από την εφαρμογή του απλοποιητικού προσομοιώματος. Καταλήγοντας, η αναλυτική λύση μπορεί σε κάθε περίπτωση να προβλέψει με ακρίβεια τόσο την κρίσιμη επιτάχυνση για την έναρξη της ολίσθησης, όσο και τις περιπτώσεις που δεν είναι εφικτή η ανάπτυξη ολίσθησης σε θέσεις όπου η επιφάνεια δεν είναι κεκλιμένη και η στατική διατμητική τάση είναι μηδενική. Το απλοποιητικό προσομοίωμα μπορεί να εκτιμήσει μια σχετικά καλή προσέγγιση των σεισμικών μετακινήσεων σε ορισμένες μόνο περιπτώσεις για μικρές τιμές του λόγου  $T_{str}/T$ , όπου η κατανομή της ολίσθησης κατά μήκος της γεωμεμβράνης μπορεί να είναι σχετικά ομοιόμορφη, και για μεγάλες τιμές του λόγου  $\tan\phi \cdot g / \alpha_{\max}$ , όπου το απόλυτο μέγεθος της ολίσθησης είναι σχετικά μικρό.

## 6.5 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ – ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΕΙΣ

Μία άλλη ενδιαφέρουσα συνιστώσα της συζευγμένης απόκρισης, εκτός από την ευστάθεια του προσομοιώματος, είναι η δυναμική απόκρισή του. Απόρροια της κλασσικής θεώρησης κατά Newmark (1965) είναι το γεγονός ότι η μέγιστη επιτάχυνση ενός ολισθαίνοντος τεμάχους δεν μπορεί να υπερβεί την κρίσιμη επιτάχυνση της διεπιφάνειας ολίσθησης. Όμως κατά την ανάλυση των απλοποιητικών συστημάτων στο 5<sup>ο</sup> Κεφάλαιο διαπιστώθηκε ότι, η απόκριση των μονοβάθμιων συστημάτων δεν ακολουθεί την ίδια συμπεριφορά. Η ενίσχυση της σεισμικής κίνησης σε συζευγμένα συστήματα με δυνατότητα ανάπτυξης ολίσθησης έχει αναφερθεί και σε άλλες δημοσιευμένες εργασίες (π.χ. Westermo and Udawadia, 1983 και Rathje and Bray, 2000).

Προκειμένου να εξεταστούν τα χαρακτηριστικά της δυναμικής απόκρισης ενός προσομοιώματος με δυνατότητα ανάπτυξης ολίσθησης, λαμβάνοντας ταυτόχρονα υπόψη τη διδιάστατη γεωμετρία του, αναλύονται οι προηγηθείσες περιπτώσεις υπό το πρίσμα της αδρανειακής απόκρισης. Στο Σχήμα 6.21 φαίνονται οι χρονοϊστορίες της επιτάχυνσης της επιβαλλόμενης κίνησης, καθώς και των σημείων της επιφάνειας του προσομοιώματος που αντιστοιχούν στον άξονα συμμετρίας και στην αιχμή του πρηνούς.

Παρουσιάζονται τόσο η περίπτωση της ολίσθησης όσο και της μη ολίσθησης, για συνθήκες συντονισμού και τιμή του λόγου  $\tan\phi^*g/\alpha_{\max}$  ίση με 0.5.



**Σχήμα 6.21.** Χρονοϊστορίες της επιτάχυνσης της επιβαλλόμενης διέγερσης στη θέση του άξονα συμμετρίας και στην αιχμή του πρηνούς για την περιπτώσεις: (α) δυνατή ανάπτυξη ολίσθησης και συζευγμένη απόκριση και (β) μη ανάπτυξη ολίσθησης. Τα αποτελέσματα αντιστοιχούν σε λόγο της ιδιοπεριόδου της κατασκευής (0.29sec) προς την περίοδο του ημιτονοειδούς παλμού ίσο με μονάδα και για λόγο  $\tan\phi^*g/\alpha_{\max}$  ίσο με 0.5.

Για την περίπτωση της μη ολίσθησης η ενίσχυση της επιτάχυνσης είναι ιδιαίτερα ισχυρή όπως αναμενόταν, δηλαδή της τάξης του 10. Αλλά και για την περίπτωση της δυνατότητας ανάπτυξης ολίσθησης το υπολογιζόμενο επίπεδο της επιτάχυνσης στην επιφάνεια του προσομοιώματος δείχνει ότι η ενίσχυση είναι σημαντική. Πιο συγκεκριμένα, αν και μειωμένη η ενίσχυση λαμβάνει τιμές της τάξης του 4, οι οποίες για την περίπτωση της συζευγμένης απόκρισης του ολισθαίνοντος προσομοιώματος δεν μπορεί να θεωρηθούν ως αμελητέες. Παρατηρείται επίσης ότι, και στην περίπτωση της ολίσθησης, παρομοίως με την περίπτωση της μη ολίσθησης, οι χρονοϊστορίες της επιτάχυνσης των δύο εξεταζόμενων σημείων της επιφάνειας έχουν παραπλήσιο συχνοτικό περιεχόμενο και μικρή διαφορά μεταξύ τους στη μέγιστη τιμή της επιτάχυνσης.

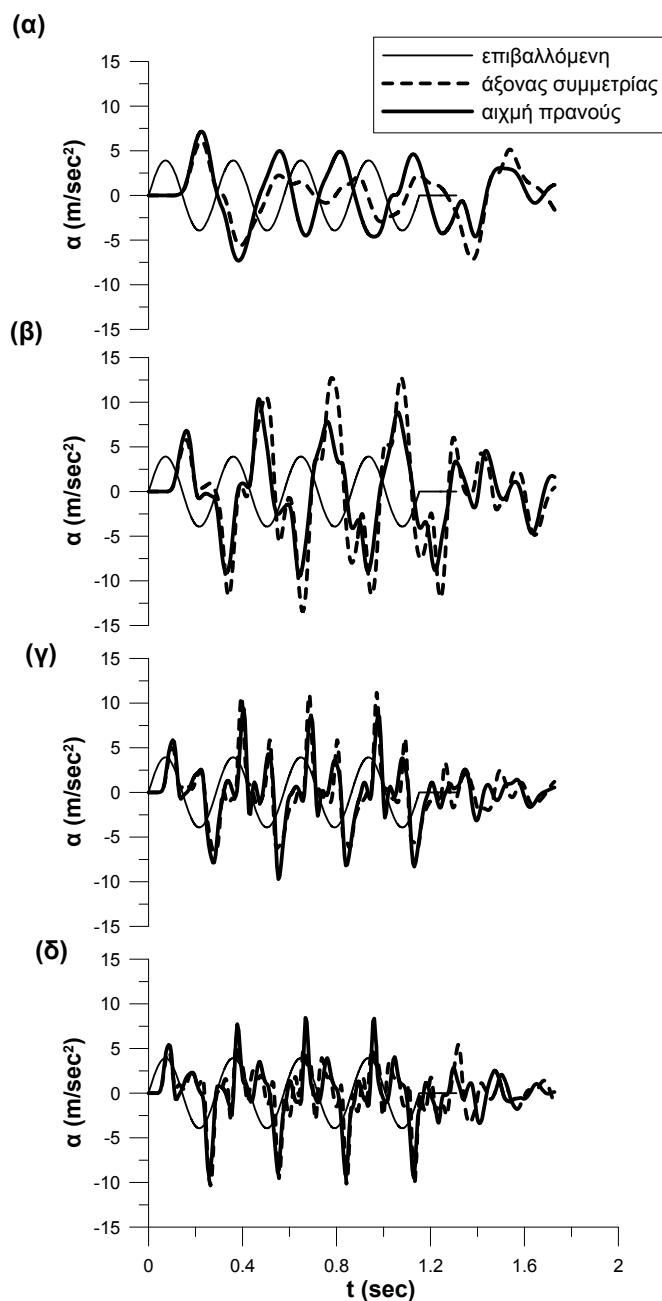
Αντιθέτως με την περίπτωση της μη ολίσθησης, τα αποτελέσματα της ανάλυσης του προσομοιώματος με δυνατότητα ανάπτυξης ολίσθησης δείχνουν ότι το συχνотικό περιεχόμενο της απόκρισης έχει εμπλουτιστεί με πιο υψίσυχνες συνιστώσες της κίνησης. Το φαινόμενο αυτό αποδίδεται στη συζευγμένη απόκριση και πιο συγκεκριμένα στην ανάπτυξη ολίσθησης. Αντίστοιχα συχνотικά χαρακτηριστικά έχει αναφερθεί ότι χαρακτηρίζουν τη δυναμική απόκριση συζευγμένων συστημάτων, έπειτα από πειράματα ολίσθησης εδαφικών στηλών επί κεκλιμένου επιπέδου σε σεισμική τράπεζα (Wartman et al., 2003).

### 6.5.1 Παραμετρική διερεύνηση

Η δυναμική αλληλεπίδραση της αδρανειακής απόκρισης και της ανάπτυξης της ολίσθησης, όπως διαπιστώθηκε στην ανάλυση της ευστάθειας του προσομοιώματος, εξαρτάται από την ιδιοπερίοδο του προσομοιώματος, την περίοδο της επιβαλλόμενης χρονοϊστορίας της επιτάχυνσης και την μέγιστη επιτάχυνση. Σε αντιστοιχία με αυτήν τη συμπεριφορά και τα χαρακτηριστικά της δυναμικής απόκρισης του προσομοιώματος με δυνατότητα ανάπτυξης ολίσθησης θα πρέπει να εξαρτώνται από τις παραμέτρους αυτές. Για τον λόγο αυτό αποτιμάται αρχικά η επίδραση της ιδιοπεριόδου του προσομοιώματος στις αναπτυσσόμενες επιταχύνσεις στην επιφάνεια του προσομοιώματος. Στο Σχήμα 6.22 παρατίθενται οι χρονοϊστορίες της επιβαλλόμενης επιτάχυνσης και της επιτάχυνσης σε δύο θέσεις στην επιφάνεια του προσομοιώματος, δηλαδή επί του άξονα συμμετρίας και στην αιχμή του πρυνός, για τέσσερις διαφορετικές τιμές της ιδιοπεριόδου του προσομοιώματος (0.57sec, 0.38sec, 0.22sec και 0.19sec). Θεωρώντας σταθερή την περίοδο της επιβαλλόμενης διέγερσης και ίση με 0.29sec, η μείωση της ιδιοπεριόδου έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του λόγου της ιδιοπεριόδου του προσομοιώματος προς την περίοδο του παλμού, η οποία προκύπτει ίση με 2, 1.33, 0.77 και 0.63, για τις εξεταζόμενες περιπτώσεις.

Για την περίπτωση του πιο εύκαμπτου προσομοιώματος ( $T_{str}/T=2$ ), δεν παρατηρείται σημαντική υψίσυχη συνιστώσα της απόκρισης σε αντίθεση με όλες τις υπόλοιπες εξεταζόμενες περιπτώσεις. Επιπροσθέτως, η απόκριση στην αιχμή του πρυνός παρουσιάζει μεγαλύτερη ενίσχυση της επιτάχυνσης συγκριτικά με τη θέση που αντιστοιχεί στον άξονα συμμετρίας. Τα δύο αυτά χαρακτηριστικά αποδίδονται στη μειωμένη (σχεδόν μηδενική) ολίσθηση στη θέση του άξονα συμμετρίας και στην αντισυμμετρική ανάπτυξη των παραμενουσών σεισμικών μετακινήσεων. Οι μικρές τιμές

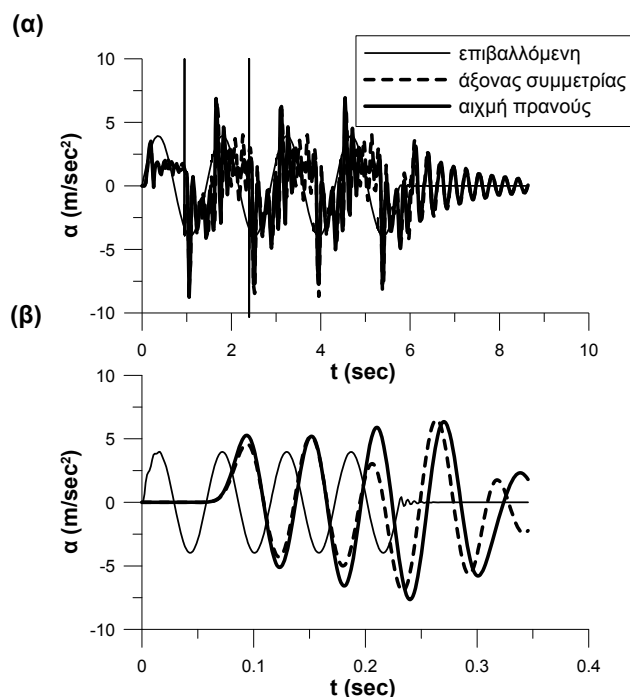
της ενίσχυσης της αδρανειακής απόκρισης αποδίδονται κυρίως στη μεγάλη σχετικά τιμή του λόγου της ιδιοπεριόδου της κατασκευής προς την περίοδο του παλμού. Η μείωση του λόγου της ιδιοπεριόδου του προσομοιώματος προς την περίοδο της επιβαλλόμενης κίνησης, μέσω της αύξησης της δυσκαμψίας, συντελεί τόσο στην αύξηση της ενίσχυσης όσο και στην εμφάνιση πιο υψίσυχνων συνιστωσών στην απόκριση (Σχήμα 6.22β).



**Σχήμα 6.22.** Χρονοϊστορίες της επιτάχυνσης της επιβαλλόμενης διέγερσης στη θέση του άξονα συμμετρίας και στην αιχμή του πρανούς για ιδιοπερίοδο του προσομοιώματος ίση με: (α) 0.57sec, (β) 0.38sec, (γ) 0.22sec, και (δ) 0.19sec. Τα αποτελέσματα αντιστοιχούν σε περίοδο του ημιτονοειδούς παλμού ίση με 0.29sec και για λόγο  $\tan\varphi \cdot g / \alpha_{\max}$  ίσο με 0.5.

Στις περιπτώσεις όπου ο λόγος της ιδιοπερίοδου του προσομοιώματος προς την περίοδο της επιβαλλόμενης κίνησης είναι μικρότερος της μονάδας (Σχήμα 6.22γ και 6.22δ), οι χρονοϊστορίες της επιτάχυνσης των σημείων της επιφανείας εμπλουτίζονται με ιδιαίτερα υψίσυχνη ταλάντωση. Οι υψίσυχνες συνιστώσες της κίνησης αναπτύσσονται κυρίως κατά τη διάρκεια της ολίσθησης, οπότε αυξανόμενη της χρονικής διάρκειας της ολίσθησης αυξάνεται και η συνεισφορά τους στη δυναμική απόκριση. Όμως, η ενίσχυση της επιτάχυνσης μειώνεται εν συγκρίσει με τις περιπτώσεις που ο λόγος  $T_{str}/T$  είναι ίσος με 1.0 και 1.33, πιθανώς λόγω της ομοιόμορφης κατανομής της ολίσθησης κατά μήκος της διεπιφάνειας της γεωμεμβράνης.

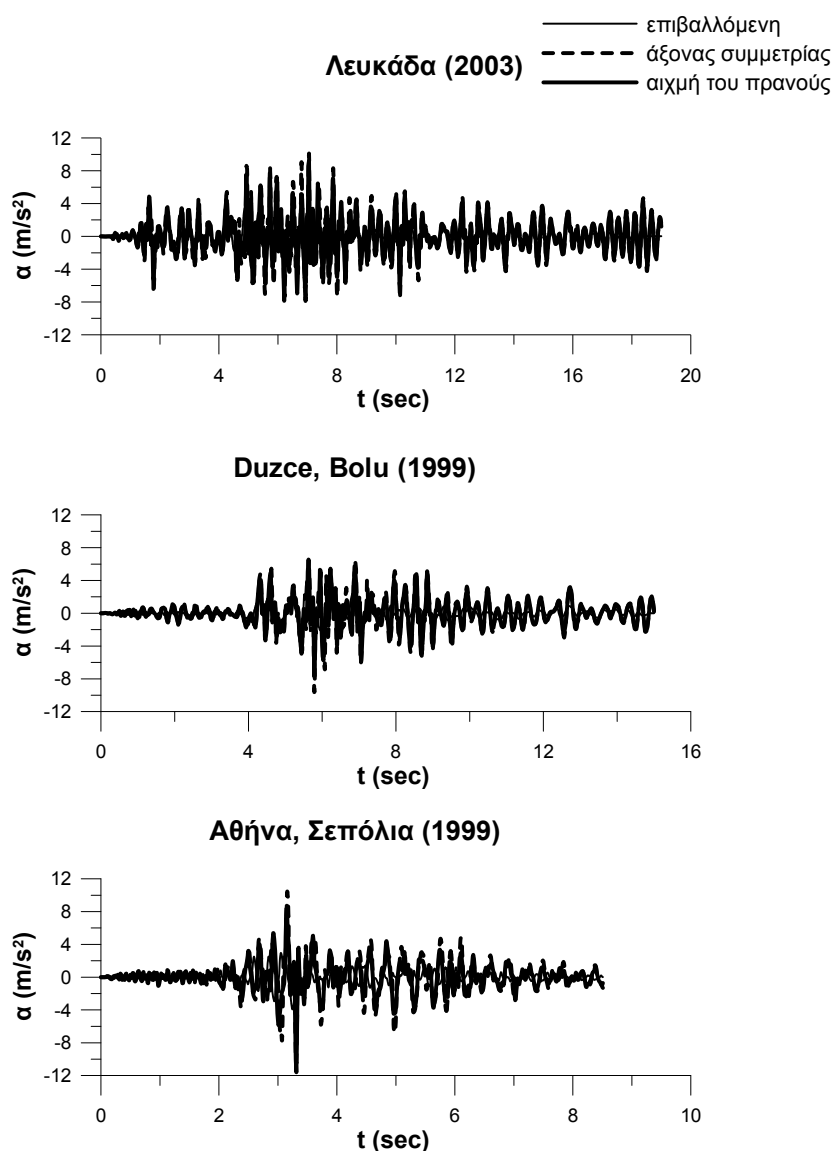
Στη συνέχεια διερευνάται ο ρόλος των συχνοτικών χαρακτηριστικών της επιβαλλόμενης χρονοϊστορίας της επιτάχυνσης στη συζευγμένη δυναμική απόκριση του προσομοιώματος. Για τον σκοπό αυτό αναλύεται το προσομοίωμα με ιδιοπερίοδο ίση με 0.29sec και τιμή του λόγου  $\tan\phi \cdot g/\alpha_{max}$  ίση με 0.5, για ένα ημιτονοειδή παλμό μεγάλης περιόδου και ένα υψίσυχνο παλμό, καθώς και για τις σεισμικές καταγραφές της Λευκάδας (2003), της Αθήνας (Σεπόλια, 1999) και του Duzce (Bolu, 1999).



**Σχήμα 6.23.** Χρονοϊστορίες της επιτάχυνσης της επιβαλλόμενης διέγερσης στη θέση του άξονα συμμετρίας και στην αιχμή του πρηνούς για περίοδο του ημιτονοειδούς παλμού ίση με: (α) 1.44sec, και (β) 0.057sec. Τα αποτελέσματα αντιστοιχούν σε ιδιοπερίοδο του προσομοιώματος ίση με 0.29sec και για λόγο  $\tan\phi \cdot g/\alpha_{max}$  ίσο με 0.5.



Για την περίπτωση του παλμού μεγάλης περιόδου παρατηρείται ότι, η συνεχής ολίσθηση συντελεί στην ιδιαίτερα ηψίσυχνη απόκριση στην επιφάνεια του προσομοιώματος, αλλά και στην απομείωση της ενίσχυσης της αναπτυσσόμενης επιτάχυνσης. Αντιθέτως, στην περίπτωση του υψίσυχνου παλμού η πρακτικά μηδενική ολίσθηση φαίνεται ότι δεν επηρεάζει την τελική απόκριση, ενώ και η ενίσχυση είναι περιορισμένη, όπως άλλωστε αναμενόταν για τόσο μεγάλη τιμή του λόγου της ιδιοπεριόδου του προσομοιώματος προς την περίοδο του παλμού ημιτόνου.



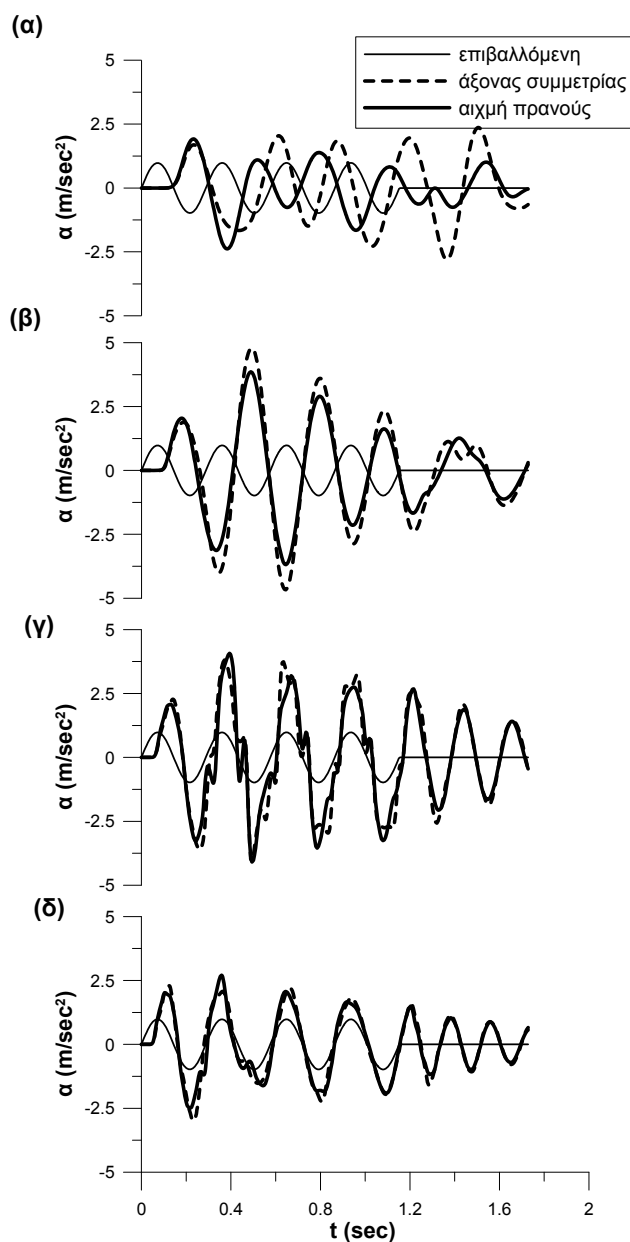
**Σχήμα 6.24.** Χρονοϊστορίες της επιτάχυνσης της επιβαλλόμενης διέγερσης στη θέση του άξονα συμμετρίας και στην αιχμή του πρηνούς για τις τρεις σεισμικές καταγραφές της Λευκάδας (2003), της Αθήνας (Σεπόλια, 1999) και του Duzce (Bolu, 1999). Τα αποτελέσματα αντιστοιχούν σε ιδιοπερίοδο του προσομοιώματος ίση με 0.29sec και για λόγο  $\tan\varphi \cdot g / \alpha_{\max}$  ίσο με 0.5.

Στο Σχήμα 6.24 παρατίθενται οι χρονοϊστορίες επιτάχυνσης για τις τρεις σεισμικές καταγραφές στη στέψη (αιχμή και κέντρο) του προσομοιώματος σε συνδυασμό με την χρονοϊστορία της επιβαλλόμενης επιτάχυνσης. Είναι προφανές ότι το σύνθετο συχνοτικό περιεχόμενο των τριών καταγραφών εμπλουτίζεται με πιο υψίσυχνες συνιστώσες. Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται πιο έντονα για την καταγραφή του σεισμού της Λευκάδας (2003), γεγονός που αποδίδεται στο μεγαλύτερο πλήθος γεγονότων ολίσθησης που λαμβάνουν χώρα σε αυτήν την περίπτωση. Επιπλέον, η μέγιστη τιμή της ενίσχυσης είναι μικρότερη για την καταγραφή του σεισμού της Λευκάδας (2003) σε σχέση με αυτήν του σεισμού Duzce (Bolu, 1999), ενώ η μεγαλύτερη ενίσχυση παρατηρείται για την καταγραφή του σεισμού της Αθήνας (Σεπόλια, 1999). Το φαινόμενο αυτό μπορεί να σχετίζεται με την αύξηση του λόγου της ιδιοπεριόδου της κατασκευής προς τη δεσπόζουσα περίοδο της κάθε καταγραφής από 0.5, σε 0.9 και 2.0, αλλά σίγουρα εξαρτάται και από την αντίστοιχη μείωση των γεγονότων ολίσθησης για κάθε καταγραφή.

Προκειμένου να προσδιοριστεί ο ρόλος της μέγιστης επιβαλλόμενης επιτάχυνσης αναλύεται η συμπεριφορά των τεσσάρων προσομοιωμάτων με τιμή του λόγου της ιδιοπεριόδου του προσομοιώματος προς την περίοδο του παλμού ίση με 2, 1.33, 0.77 και 0.63, που αναφέρθηκαν κατά τη διερεύνηση της επίδρασης της ιδιοπεριόδου του προσομοιώματος. Στο Σχήμα 6.25 παρουσιάζονται οι χρονοϊστορίες της επιβαλλόμενης επιτάχυνσης καθώς και της απόκρισης στις δύο θέσεις στην επιφάνεια του προσομοιώματος, δηλαδή επί του άξονα συμμετρίας και στην αιχμή του πρυνού. Για τις τέσσερις περιπτώσεις που παρατίθενται θεωρείται μέγιστη επιβαλλόμενη επιτάχυνση ίση με  $0.1g$ , η οποία συνεπάγεται τιμή του λόγου  $\tan\phi \cdot g / \alpha_{\max}$  ίση με 2.0.

Στις περισσότερες από τις εξεταζόμενες περιπτώσεις οι αναπτυσσόμενες σεισμικές μετακινήσεις περιορίζονται κάτω από τα πρυνή του προσομοιώματος καταλήγοντας σε αντισυμμετρική κατανομή της παραμένουσας ολίσθησης. Αυτή η συμπεριφορά έχει ως αποτέλεσμα να μην παρατηρείται έντονη επίδραση της ολίσθησης στην αδρανειακή απόκριση όσον αφορά στο συχνοτικό περιεχόμενο της απόκρισης. Πρέπει να σημειωθεί ότι υψίσυχη συνιστώσα της απόκρισης, η οποία σχετίζεται με την ανάπτυξη γεγονότων ολίσθησης, παρατηρείται στις περιπτώσεις που ο λόγος της ιδιοπεριόδου της κατασκευής προς την περίοδο του ημιτονοειδούς παλμού είναι μικρότερος της μονάδας. Επιπλέον, η ενίσχυση της επιτάχυνσης στην επιφάνεια του προσομοιώματος λαμβάνει τιμές που

κυμαίνονται από 2 έως 5, αναλόγως με την τιμή του λόγου της ιδιοπεριόδου του προσομοιώματος προς την περίοδο της επιβαλλόμενης διέγερσης.

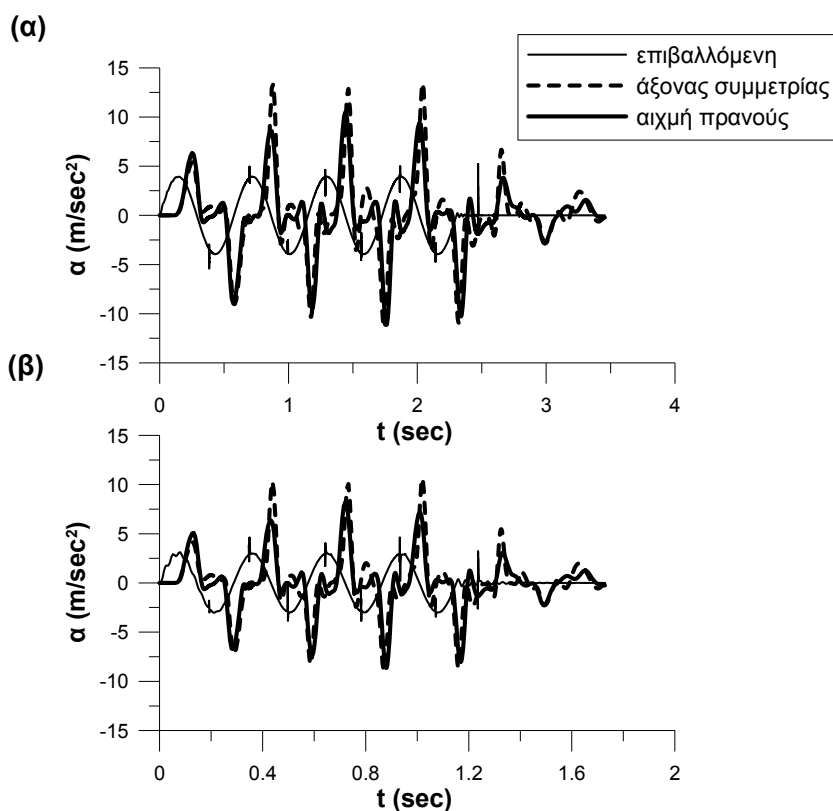


**Σχήμα 6.25.** Χρονοϊστορίες της επιτάχυνσης της επιβαλλόμενης διέγερσης στη θέση του άξονα συμμετρίας και στην αιχμή του πρανούς για ιδιοπερίοδο του προσομοιώματος ίση με: (α) 0.57sec, (β) 0.38sec, (γ) 0.22sec, και (δ) 0.19sec. Τα αποτελέσματα αντιστοιχούν σε περίοδο του παλμού ημιτόνου ίση με 0.29sec και για λόγο  $\tan\phi \cdot g / \alpha_{\max}$  ίσο με 2.0.

### 6.5.2 Κανονικοποίηση της μετακίνησης

Κατά την εξέταση της ευστάθειας διαπιστώθηκε ότι είναι δυνατή η κανονικοποίηση της παραμένουσας σεισμικής μετακίνησης συναρτήσει της μέγιστης επιτάχυνσης και του τετραγώνου της περιόδου. Επιπλέον, αποδείχτηκε ότι η κανονικοποίηση έχει εφαρμογή

εφόσον αναφέρεται στον ίδια τιμή του λόγου της ιδιοπεριόδου του προσομοιώματος προς την περίοδο της επιβαλλόμενης κίνησης και την ίδια τιμή του λόγου της διατμητικής αντοχής της διεπιφάνειας προς τη μέγιστη επιβαλλόμενη επιτάχυνση. Προκειμένου να εξεταστεί η επίδραση της κανονικοποίησης στη δυναμική απόκριση, παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.26 οι χρονοϊστορίες της επιβαλλόμενης επιτάχυνσης, και την επιτάχυνσης στα δύο χαρακτηριστικά σημεία της επιφανείας για τις δύο αναλύσεις που διενεργήθηκαν για τον σκοπό αυτό. Πιο συγκεκριμένα, η πρώτη περίπτωση αναφέρεται σε ιδιοπερίοδο της κατασκευής και περίοδο του παλμού του ημιτόνου ίση με 0.57sec και γωνία τριβής της διεπιφάνειας ίση με  $11^\circ$  και μέγιστη επιβαλλόμενη επιτάχυνση ίση με 0.4g, ενώ η δεύτερη αναφέρεται σε ιδιοπερίοδο της κατασκευής και περίοδο του παλμού του ημιτόνου ίση με 0.29sec και γωνία τριβής της διεπιφάνειας ίση με  $8.5^\circ$  και μέγιστη επιβαλλόμενη επιτάχυνση ίση με 0.3g.



**Σχήμα 6.26.** Χρονοϊστορίες της επιτάχυνσης της επιβαλλόμενης διέγερσης στη θέση του άξονα συμμετρίας και στην αιχμή του πρυνούς για τις περιπτώσεις των προσομοιωμάτων με: (α) ιδιοπερίοδο του προσομοιώματος και περίοδο του ημιτονοειδούς παλμού ίση με 0.57sec, γωνία τριβής ίση με  $11^\circ$  και μέγιστη επιβαλλόμενη επιτάχυνση ίση με 0.4g, και (β) ιδιοπερίοδο του προσομοιώματος και περίοδο του ημιτονοειδούς παλμού ίση με 0.29sec, γωνία τριβής ίση με  $8.5^\circ$  και μέγιστη επιβαλλόμενη επιτάχυνση ίση με 0.3g.

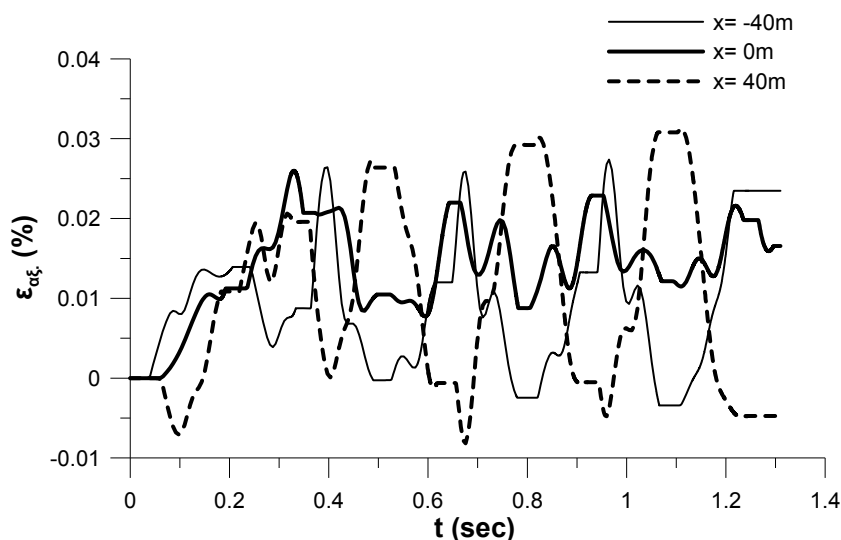
Είναι αξιοσημείωτο το γεγονός ότι και για τις δύο εξεταζόμενες περιπτώσεις διαπιστώνεται ότι, η παρουσία των υψίσυχνων ταλαντώσεων είναι αντίστοιχα έντονη με της χαρακτηριστικής περίπτωσης (βλ. παρουσίαση αποτελεσμάτων Σχήματος 6.21). Παρόλο που όσον αφορά στο συχνотικό περιεχόμενο της απόκρισης, η επίδραση της ολίσθησης είναι αντίστοιχη και για τις δύο περιπτώσεις, υφίστανται κάποιες ουσιώδεις διαφορές. Κατ' αρχάς, για την περίπτωση της κανονικοποίησης σε σχέση με την περίοδο της διέγερσης (Σχήμα 6.26α), η ενίσχυση της επιτάχυνσης είναι λίγο μεγαλύτερη αλλά και η συχνότητα της απόκρισης είναι διαφορετική (βλ. Σχήμα 6.21). Αποτέλεσμα αυτής της εικόνας είναι ότι αν και η κανονικοποίηση των μετακινήσεων συναρτήσει του τετραγώνου της περιόδου του ημιτόνου είναι ικανοποιητική, δεν αναμένεται αντίστοιχα ικανοποιητική σύγκλιση στην αδρανειακή απόκριση των δύο συστημάτων. Επίσης, όσον αφορά στην κανονικοποίηση ως προς τη μέγιστη επιτάχυνση, είναι εμφανές ότι το συχνотικό περιεχόμενο της απόκρισης ταυτίζεται για τις δύο περιπτώσεις, παρομοίως με τη μέγιστη ενίσχυση. Συμπεραίνεται ότι για την περίπτωση της κανονικοποίησης ως προς τη μέγιστη επιτάχυνση και για σταθερές τιμές του λόγου της ιδιοπεριόδου της κατασκευής προς την περίοδο του παλμού και του λόγου της διατμητικής αντοχής προς τη μέγιστη επιτάχυνση, η αδρανειακή απόκριση παρουσιάζει ικανοποιητική σύγκλιση.

## 6.6 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗΣ – ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΙΣ

Όπως αναφέρθηκε, με την λεπτομερή αριθμητική προσομοίωση είναι δυνατός ο υπολογισμός των παραμορφώσεων της γεωμεμβράνης του συστήματος στεγάνωσης του Χ.Υ.Τ.Α. Οι αξονικές παραμορφώσεις στη γεωμεμβράνη προκύπτουν, λόγω των παραδοχών της προσομοίωσης, ως αποτέλεσμα της διαφορικής ολίσθησης μεταξύ δύο διαδοχικών κόμβων της. Η διαπίστωση αυτή έχει προκύψει θεωρώντας ότι η θεμελίωση είναι απολύτως δύσκαμπτος βράχος και δεν είναι δυνατή η ανάπτυξη διπλής ολίσθησης εκατέρωθεν της γεωμεμβράνης. Επίσης, βάσει της προσομοίωσης δεν είναι δυνατό να εκτιμηθεί η φθορά της γεωμεμβράνης που μπορεί να προκύψει ως αποτέλεσμα της ανάπτυξης διαδοχικών κύκλων ολίσθησης κατά τους οποίους αντιστρέφεται η φορά της μετακίνησης.

Προκειμένου να διερευνηθεί ο μηχανισμός ανάπτυξης αξονικών παραμορφώσεων στην χαρακτηριστική περίπτωση για την οποία παρουσιάστηκε αναλυτικά η συσσώρευση της ολίσθησης, παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.27 οι χρονοϊστορίες της αξονικής παραμόρφωσης των τριών υπό εξέταση σημείων επί της γεωμεμβράνης. Εν

γίνει επιβεβαιώνεται η υπόθεση ότι η ένταση της γεωμεμβράνης αναπτύσσεται λόγω της αναπτυσσόμενης ολίσθησης, καθώς κατά τη διάρκεια της μη ολίσθησης η αξονική παραμόρφωση δεν μεταβάλλεται.



**Σχήμα 6.27.** Χρονοϊστορίες της αξονικής παραμόρφωσης τριών χαρακτηριστικών θέσεων κατά μήκος της γεωμεμβράνης. Τα αποτελέσματα αντιστοιχούν σε λόγο της ιδιοπεριόδου της κατασκευής (0.29sec) προς την περίοδο του ημιτονοειδούς παλμού ίσο με μονάδα και για λόγο  $\tan\varphi \cdot g / \alpha_{\max}$  ίσο με 0.5.

Παρόλα αυτά, η αντιπαράβολή με το Σχήμα 6.7 δείχνει ότι η ανάπτυξη των αξονικών παραμορφώσεων δεν ακολουθεί την κυκλική συμπεριφορά της ολίσθησης, εκτός από τους τρεις τελευταίους κύκλους ολίσθησης των σημείων Α και Γ. Επιπροσθέτως, παρατηρείται ότι η παραμένουσα παραμόρφωση δεν ταυτίζεται με τη μέγιστη παραμόρφωση που αναπτύχθηκε κατά τη διάρκεια της επιβαλλόμενης διέγερσης, ενώ και η μέγιστη τιμή δεν αναπτύσσεται κατά την ίδια χρονική στιγμή για κάθε σημείο. Ειδικά για τα σημεία Α και Γ, διαπιστώνεται ότι κατά τους τρεις τελευταίους κύκλους ολίσθησης όταν στο ένα σημείο αναπτύσσεται η μέγιστη αξονική παραμόρφωση, στο αντισυμμετρικό του αναπτύσσεται η ελάχιστη αξονική παραμόρφωση. Τέλος, το μέγεθος της υπολογιζόμενης αξονικής παραμόρφωσης δεν φαίνεται να πλησιάζει την παραμόρφωση που αντιστοιχεί στο όριο διαρροής μίας HDPE γεωμεμβράνης (5%). Όμως, η απόλυτη τιμή του μεγέθους της αξονικής παραμόρφωσης σχετίζεται και με τις επιμέρους παραμέτρους του προβλήματος σε αντιστοιχία με την αθροιστική ολίσθηση. Για τον λόγο αυτό ακολουθεί η παραμετρική διερεύνηση της αναπτυσσόμενης αξονικής παραμόρφωσης, για τις περιπτώσεις που

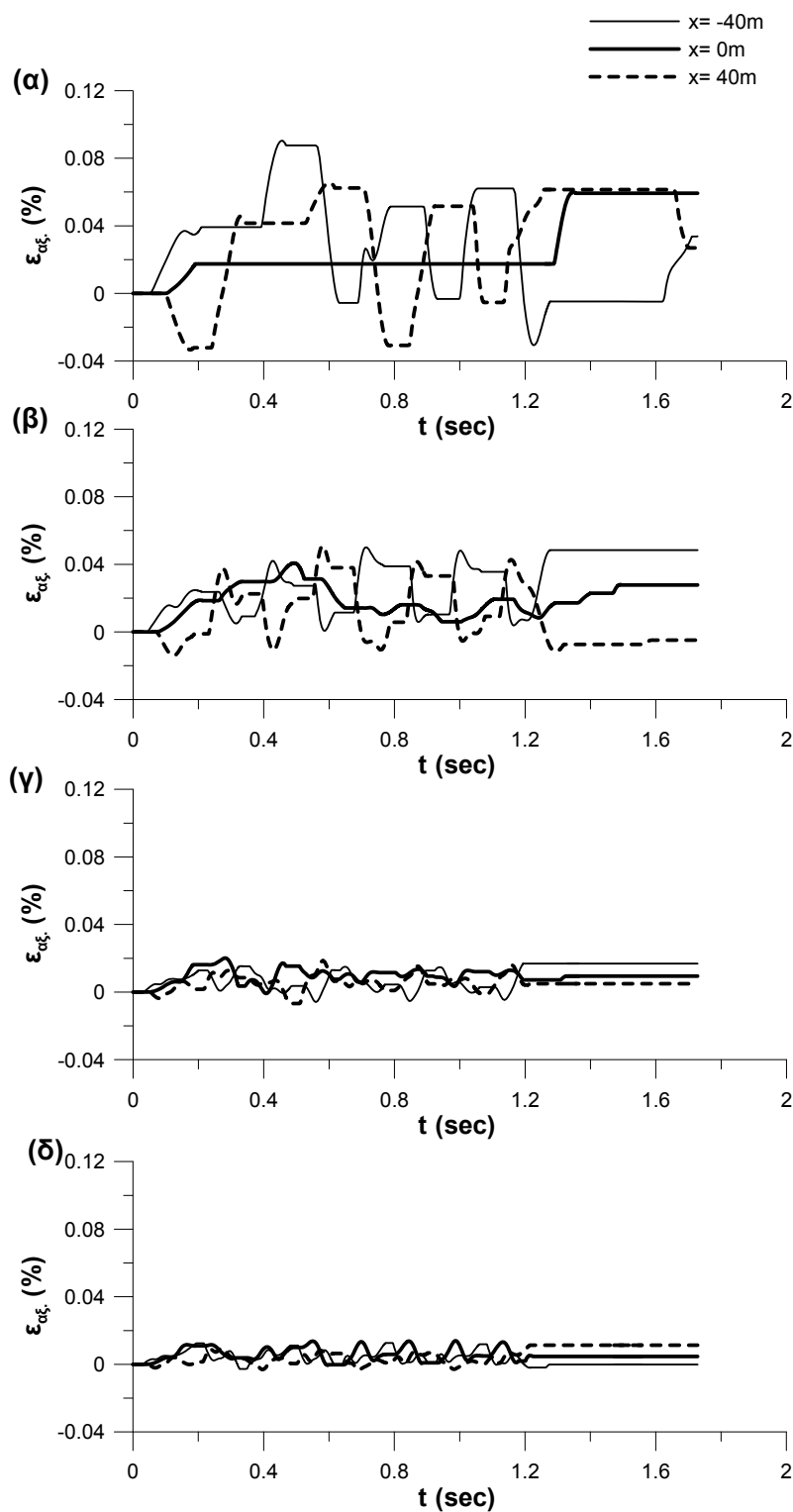
παρατέθηκαν και στη διερεύνηση της ευστάθειας και της δυναμικής απόκρισης του εξεταζόμενου προσομοιώματος.

### 6.6.1 Παραμετρική διερεύνηση

Η σεισμική καταπόνηση της γεωμεμβράνης στεγάνωσης απορρέει από την ανάπτυξη της ολίσθησης κατά μήκος της κατώτερης διεπιφάνειάς της σύμφωνα με την προηγηθείσα ανάλυση. Συνεπώς, αναμένεται ότι η ιδιοπερίοδος του προσομοιώματος, τα συχνотικά χαρακτηριστικά της επιβαλλόμενης διέγερσης και η μέγιστη επιβαλλόμενη επιτάχυνση θα καθορίζουν την αναπτυσσόμενη αξονική παραμόρφωση στη γεωμεμβράνη. Το Σχήμα 6.28 παρουσιάζει την επίδραση της ιδιοπεριόδου του προσομοιώματος. Πιο συγκεκριμένα, παρατίθενται οι χρονοϊστορίες της παραμόρφωσης στα τρία εξεταζόμενα σημεία για λόγο της ιδιοπεριόδου της κατασκευής προς την περίοδο της διέγερσης ίσο με 2.0, 1.33, 0.77 και 0.63 για τα Σχήματα 6.28α έως 6.28δ, αντίστοιχα. Σε όλες τις περιπτώσεις η διέγερση ήταν παλμός ημιτόνου αποτελούμενος από τέσσερις κύκλους, με μέγιστη επιτάχυνση ίση με 0.4g, οδηγώντας σε τιμή του λόγου  $\tan\phi \cdot g / \alpha_{\max}$  ίση με 0.5. Είναι εμφανές ότι η μείωση του λόγου της ιδιοπεριόδου της κατασκευής προς την περίοδο του επιβαλλόμενου παλμού συντελεί σε μείωση των αναπτυσσόμενων παραμορφώσεων. Σημειώνεται ότι η συμπεριφορά αυτή δεν είναι αντίστοιχη με τη συσσώρευση της ολίσθησης. Για παράδειγμα, για την περίπτωση που ο λόγος  $T_{\text{str}}/T$  είναι ίσος με 2, ενώ η παραμένουσα σεισμική μετακίνηση είναι η μικρότερη που υπολογίζεται σε σύγκριση με τις αντίστοιχες για μικρότερες τιμές του λόγου  $T_{\text{str}}/T$ , η αξονική παραμόρφωση λαμβάνει μεγαλύτερες τιμές από τις αντίστοιχες για μικρότερες τιμές του λόγου  $T_{\text{str}}/T$ . Επιπλέον, το μέγεθος της παραμένουσας αξονικής παραμόρφωσης διαφέρει σε κάθε εξεταζόμενη θέση, χωρίς να διαπιστώνεται κάποια συσχέτιση με τη δυσκαμψία της κατασκευής.

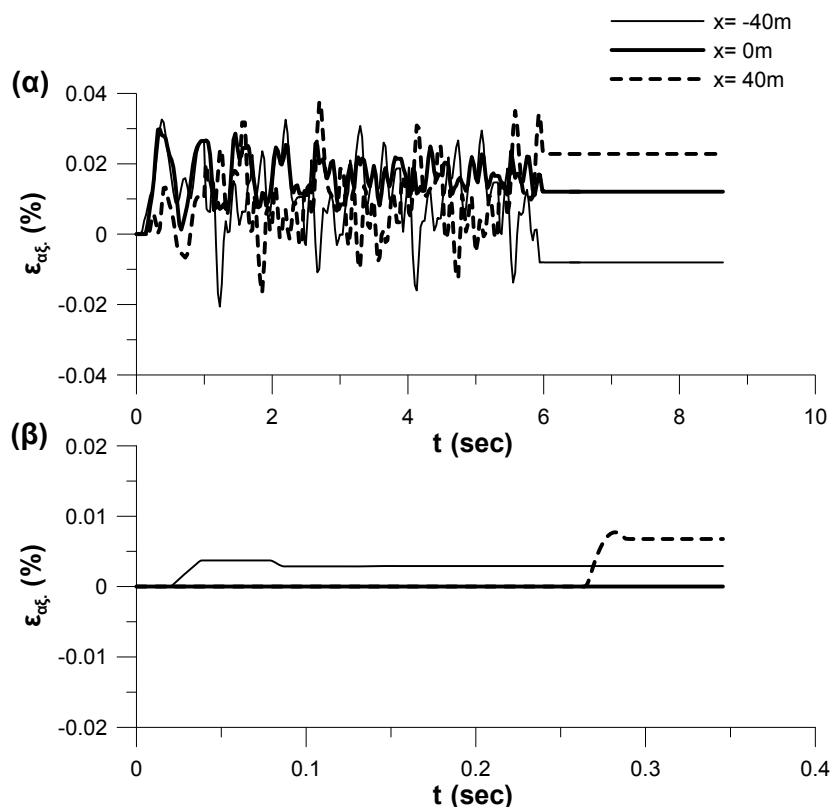
Η επίδραση του συχνотικών χαρακτηριστικών της επιβαλλόμενης διέγερσης εξετάζεται με την ανάλυση ενός ημιτονοειδούς παλμού μεγάλης περιόδου, ενός υψίσυχνου παλμού ημιτόνου και των τριών σεισμικών καταγραφών που έχουν ήδη αναφερθεί. Στο Σχήμα 6.29 παρουσιάζονται οι χρονοϊστορίες της εξέλιξης της αξονικής παραμόρφωσης στα τρία εξεταζόμενα σημεία για τους δύο παλμούς ημιτόνου. Για τον παλμό μεγάλης περιόδου παρατηρείται ότι παρόλο που οι παραμένουσες σεισμικές μετακινήσεις είναι σημαντικές, οι αξονικές παραμορφώσεις διατηρούνται σε χαμηλά

επίπεδα. Αντιθέτως, για τον υψίσυχο παλμό οι αξονικές παραμορφώσεις είναι σχεδόν μηδενικές, σε αντιστοιχία με τη μη ανάπτυξη ολίσθησης στα εξεταζόμενα σημεία.



**Σχήμα 6.28.** Χρονοϊστορίες της αξονικής παραμόρφωσης τριών χαρακτηριστικών θέσεων κατά μήκος της γεωμεμβράνης για ιδιοπερίοδο του προσομοιώματος ίση με: (α) 0.57sec, (β) 0.38sec, (γ) 0.22sec, και (δ) 0.19sec. Τα αποτελέσματα αντιστοιχούν σε περίοδο του παλμού ημιτόνου ίση με 0.29sec και για λόγο  $\tan\phi \cdot g / \alpha_{\max}$  ίσο με 0.5.



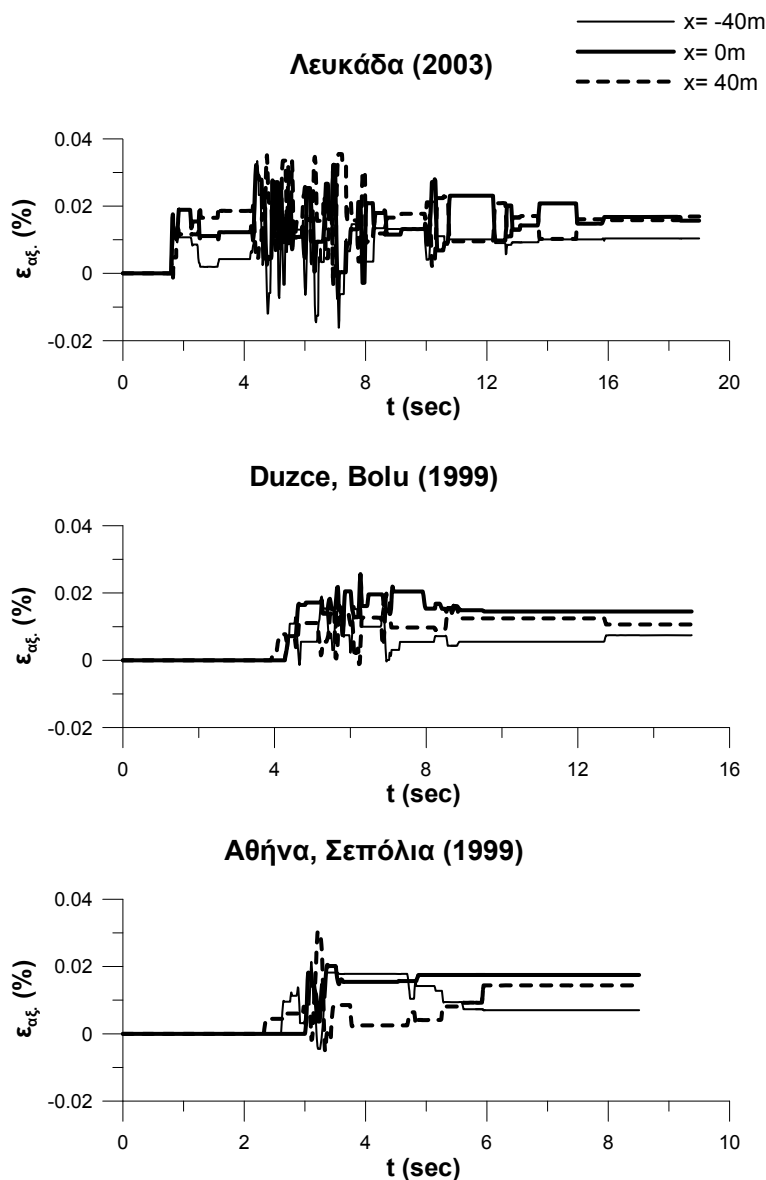


**Σχήμα 6.29.** Χρονοϊστορίες της αξονικής παραμόρφωσης τριών χαρακτηριστικών θέσεων για περίοδο του ημιτονοειδούς παλμού ίση με: (α) 1.44sec, και (β) 0.057sec. Τα αποτελέσματα αντιστοιχούν σε ιδιοπερίοδο του προσομοιώματος ίση με 0.29sec και για λόγο  $\tan\varphi \cdot g/\alpha_{\max}$  ίσο με 0.5

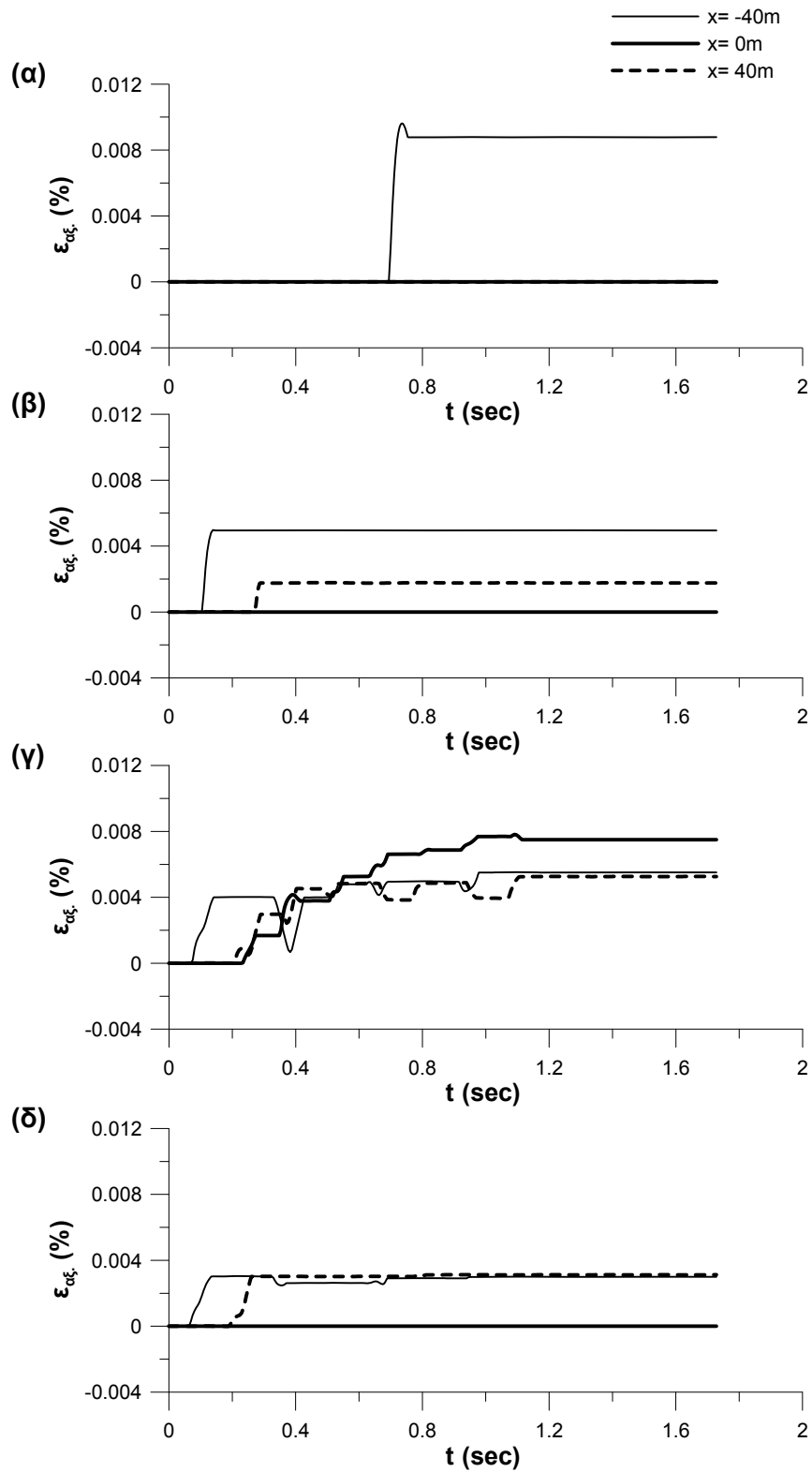
Από το Σχήμα 6.30, όπου παρατίθενται οι χρονοϊστορίες της εξέλιξης της αξονικής παραμόρφωσης στα τρία εξεταζόμενα σημεία για τις τρεις σεισμικές καταγραφές, εξάγεται το συμπέρασμα ότι το σύνθετο συχνοτικό περιεχόμενο των τριών καταγραφών καταλήγει σε μικρό επίπεδο αναπτυσσόμενων αξονικών παραμορφώσεων. Δεν παρατηρείται κάποια ουσιαστική διαφοροποίηση μεταξύ των τριών καταγραφών στις παραμένουσες αξονικές παραμορφώσεις. Μόνο για την περίπτωση της καταγραφής του σεισμού της Λευκάδας (2003) η ανάπτυξη πολλών γεγονότων ολίσθησης πιθανώς συντελεί στην ανάπτυξη μεγαλύτερης αξονικής παραμόρφωσης κατά τη διάρκεια της συσσώρευσης της ολίσθησης.

Η επίδραση της μέγιστης επιτάχυνσης εξετάζεται για μέγιστη επιβαλλόμενη επιτάχυνση ίση με 0.1g, η οποία οδηγεί σε τιμή του λόγου  $\tan\varphi \cdot g/\alpha_{\max}$  ίση με 2.0. Οι υπολογιζόμενες χρονοϊστορίες της αξονικής παραμόρφωσης για τις περιπτώσεις όπου ο λόγος της ιδιοπεριόδου της κατασκευής προς την περίοδο της διέγερσης είναι ίσος με 2.0,

1.33, 0.77 και 0.63 φαίνονται στο Σχήμα 6.31. Γενικά, το επίπεδο των αναπτυσσόμενων παραμορφώσεων είναι σημαντικά μειωμένο σε σύγκριση με τις αντίστοιχες περιπτώσεις όπου η μέγιστη επιτάχυνση ήταν ίση με 0.4g (Σχήμα 6.28). Όμως, δεν διαπιστώνεται αντίστοιχη συμπεριφορά αύξησης της αξονικής παραμόρφωσης με την αύξηση του λόγου της ιδιοπερίοδου της κατασκευής προς την περίοδο της διέγερσης.



**Σχήμα 6.30.** Χρονοϊστορίες της αξονικής παραμόρφωσης τριών χαρακτηριστικών θέσεων για τις τρεις σεισμικές καταγραφές του σεισμού της Λευκάδας (2003), της Αθήνας (Σεπόλια, 1999), και του Duzce (Bolu, 1999). Τα αποτελέσματα αντιστοιχούν σε ιδιοπερίοδο του προσομοιώματος ίση με 0.29sec και για λόγο  $\tan\phi \cdot g / \alpha_{\max}$  ίσο με 0.5.



**Σχήμα 6.31.** Χρονοϊστορίες της αξονικής παραμόρφωσης τριών χαρακτηριστικών θέσεων κατά μήκος της γεωμεμβράνης για ιδιοπερίοδο του προσομοιώματος ίση με: (α) 0.57sec, (β) 0.38sec, (γ) 0.22sec, και (δ) 0.19sec. Τα αποτελέσματα αντιστοιχούν σε περίοδο του παλμού ημιτόνου ίση με 0.29sec και για λόγο  $\tan\phi \cdot g/\alpha_{\max}$  ίσο με 2.0.

### 6.6.2 Κανονικοποίηση της παραμόρφωσης

Ένα από τα βασικά συμπεράσματα που προέκυψε κατά την ανάλυση της ευστάθειας του εξεταζόμενου προσομοιώματος είναι ότι η κατανομή της παραμένουσας σεισμικής μετακίνησης κατά μήκος της γεωμεμβράνης δύναται να κανονικοποιηθεί ως προς τη μέγιστη επιβαλλόμενη επιτάχυνση και ως προς το τετράγωνο της περιόδου της διέγερσης. Επιπλέον, η κανονικοποίηση αυτή βρέθηκε ότι ισχύει υπό την προϋπόθεση ότι αναφέρεται στις ίδιες τιμές του λόγου της ιδιοπεριόδου της κατασκευής προς την περίοδο της διέγερσης και τις ίδιες τιμές του λόγου της διατμητικής αντοχής της διεπιφάνειας προς τη μέγιστη επιβαλλόμενη επιτάχυνση. Είναι ανάγκη να διερευνηθεί όμως και η περίπτωση της κανονικοποίησης της παραμένουσας αξονικής παραμόρφωσης της γεωμεμβράνης υπό τις ίδιες προϋποθέσεις. Για τον λόγο αυτό στο Σχήμα 6.32 παρουσιάζονται οι κανονικοποιημένες κατανομές της αξονικής παραμόρφωσης της γεωμεμβράνης χωριστά ως προς το τετράγωνο της περιόδου και ως προς την μέγιστη επιβαλλόμενη επιτάχυνση, θεωρώντας συνθήκες συντονισμού και τιμή του λόγου  $\tan\phi \cdot g / \alpha_{\max}$  ίση με 0.5.

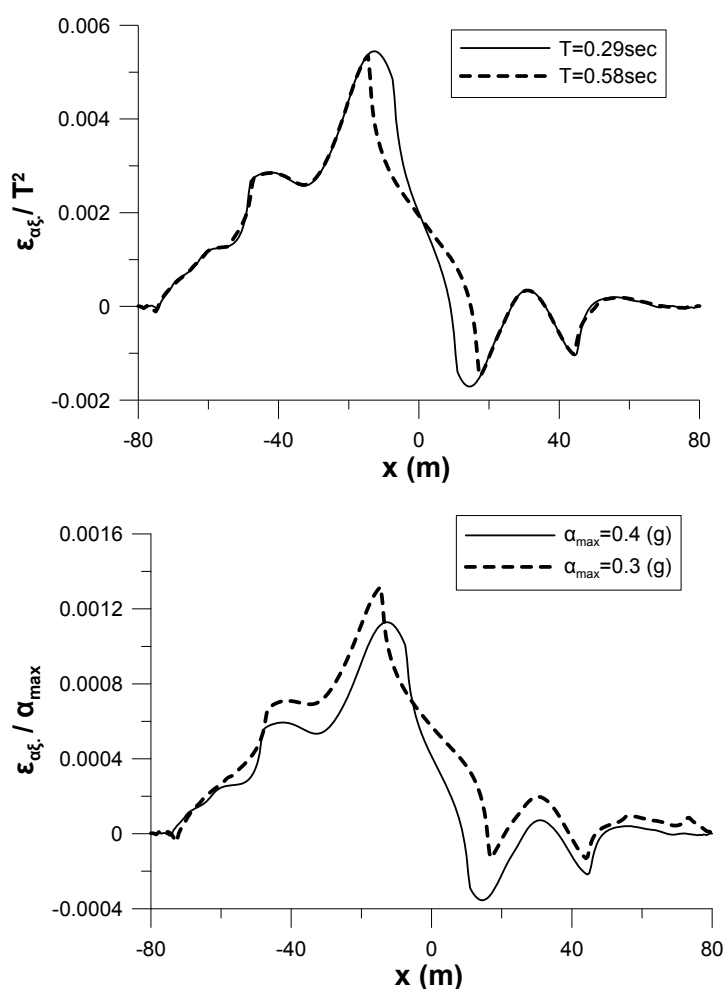
Πιο συγκεκριμένα, συγκρίνονται ανά δύο οι ακόλουθες περιπτώσεις αριθμητικής προσομοίωσης:

- ιδιοπερίοδος του προσομοιώματος και περίοδος του παλμού ημιτόνου ίση με 0.29sec, γωνία τριβής ίση με  $11^\circ$  και μέγιστη επιβαλλόμενη επιτάχυνση ίση με 0.4g,
- ιδιοπερίοδος του προσομοιώματος και περίοδος του παλμού ημιτόνου ίση με 0.57sec, γωνία τριβής ίση με  $11^\circ$  και μέγιστη επιβαλλόμενη επιτάχυνση ίση με 0.4g, και
- ιδιοπερίοδος του προσομοιώματος και περίοδος του παλμού ημιτόνου ίση με 0.29sec, γωνία τριβής ίση με  $8.5^\circ$  και μέγιστη επιβαλλόμενη επιτάχυνση ίση με 0.3g.

Η σύγκλιση των υπολογιζόμενων αξονικών παραμορφώσεων στη γεωμεμβράνη για καθεμία από τις εξεταζόμενες περιπτώσεις θεωρείται επαρκώς ικανοποιητική. Μικρή απόκλιση παρατηρείται κυρίως στην κανονικοποίηση ως προς τη μέγιστη επιβαλλόμενη επιτάχυνση, η απόκλιση όμως αυτή εντοπίζεται κυρίως σε χαμηλά επίπεδα παραμορφώσεων. Συνεπώς, θεωρείται ότι η κανονικοποίηση της παραμένουσας αξονικής παραμόρφωσης της γεωμεμβράνης ως προς το τετράγωνο της περιόδου του

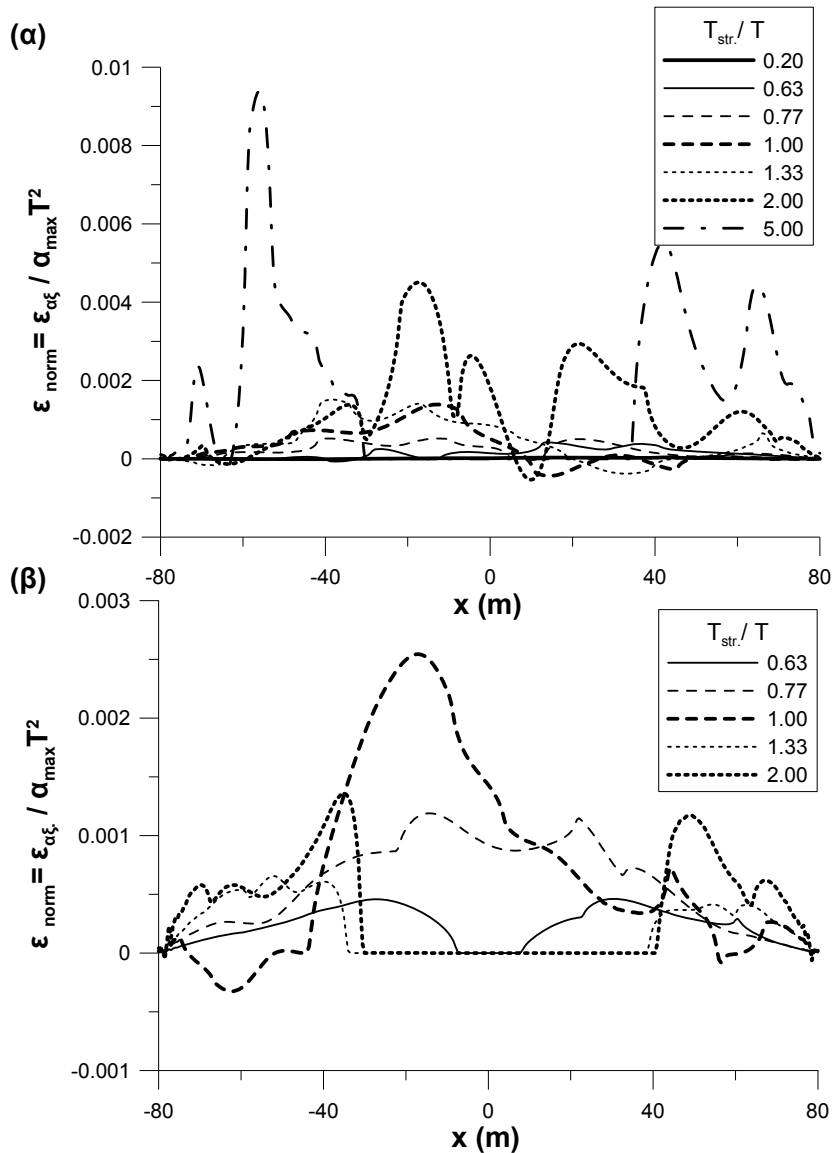
παλμού και ως προς τη μέγιστη επιβαλλόμενη επιτάχυνση είναι αξιόπιστη και αποτελεσματική.

Στο Σχήμα 6.33 παρουσιάζονται οι κατανομές της κανονικοποιημένης παραμένουσας αξονικής παραμόρφωσης κατά μήκος της γεωμεμβράνης για διάφορες τιμές του λόγου της ιδιοπεριόδου της κατασκευής προς την περίοδο της διέγερσης, και ομαδοποιημένες σε δύο τιμές του λόγου της διατημητικής αντοχής της διεπιφάνειας προς τη μέγιστη επιβαλλόμενη επιτάχυνση ίσες με 0.5 και 2.0.



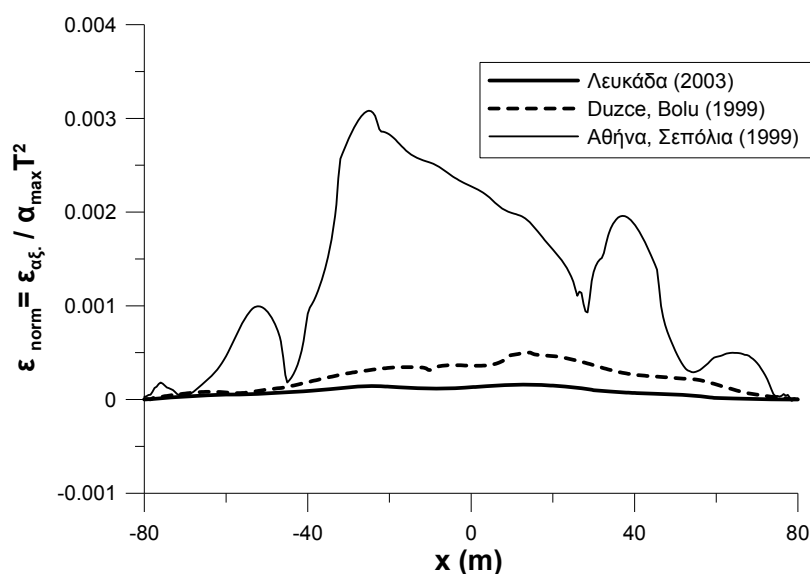
**Σχήμα 6.32.** Κανονικοποίηση της παραμένουσας αξονικής παραμόρφωσης της γεωμεμβράνης ως προς το τετράγωνο της περιόδου του παλμού ημιτόνου και ως προς τη μέγιστη επιβαλλόμενη επιτάχυνση. Συγκρίνονται τα αποτελέσματα της περίπτωσης όπου η ιδιοπερίοδος του προσομοιώματος και η περίοδος του παλμού ημιτόνου είναι ίση με 0.57sec, με τα αντίστοιχα όπου η ιδιοπερίοδος του προσομοιώματος και η περίοδος του παλμού ημιτόνου ίση με 0.29sec. Και για τις δύο περιπτώσεις η γωνία τριβής είναι ίση με  $11^\circ$ , και η μέγιστη επιβαλλόμενη επιτάχυνση ίση με 0.4g. Επίσης συγκρίνονται τα αποτελέσματα της τελευταίας περίπτωσης μεταβάλλοντας τη γωνία τριβής ( $8.5^\circ$ ) και τη μέγιστη επιβαλλόμενη επιτάχυνση σε 0.3g.

Παρατηρείται ότι, όταν η τιμή του λόγου  $\tan\phi \cdot g / \alpha_{\max}$  είναι ίση με 0.5 η μέγιστη αξονική παραμόρφωση κατά μήκος της γεωμεμβράνης αυξάνεται καθώς μεγαλώνει η τιμή του λόγου της ιδιοπεριόδου της κατασκευής προς την περίοδο της διέγερσης. Επίσης, για τιμές του λόγου  $T_{\text{str}}/T$  μικρότερες του 5, η μέγιστη αξονική παραμόρφωση εντοπίζεται στο τμήμα της γεωμεμβράνης που αντιστοιχεί στην προβολή του καταστρώματος. Αντιθέτως, όταν ο λόγος  $T_{\text{str}}/T$  γίνεται ίσος με 5 παρατηρείται ότι η μέγιστη κανονικοποιημένη αξονική παραμόρφωση εντοπίζεται στο τμήμα της γεωμεμβράνης κάτω από τα πρηνή του προσομοιώματος.



**Σχήμα 6.33.** Κατανομή της κανονικοποιημένης παραμένουσας αξονικής παραμόρφωσης κατά μήκος της γεωμεμβράνης για διάφορες τιμές του λόγου  $T_{\text{str}}/T$ . Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για: (α) τιμή του λόγου  $\tan\phi \cdot g / \alpha_{\max}$  ίση με 0.5, και (β) τιμή του λόγου  $\tan\phi \cdot g / \alpha_{\max}$  ίση με 2.0.

Η αύξηση του λόγου  $\tan\phi \cdot g / \alpha_{\max}$  έχει ως αποτέλεσμα, όπως άλλωστε αναμενόταν, τη μείωση των κανονικοποιημένων αξονικών παραμορφώσεων κατά μήκος της γεωμεμβράνης (βλ. Σχήμα 6.33β). Για αυτήν την περίπτωση όσο ο λόγος  $T_{\text{str}}/T$  λαμβάνει τιμές μικρότερες της μονάδας, οι αξονικές παραμορφώσεις αυξάνονται καθώς μεγαλώνει και η τιμή του λόγου  $T_{\text{str}}/T$ , με τη μέγιστη τιμή να παρατηρείται για συνθήκες συντονισμού. Για τιμές του λόγου της ιδιοπεριόδου της κατασκευής προς την περίοδο της διέγερσης μεγαλύτερες της μονάδας, η επίδραση αυτή αντιστρέφεται με τις μεγαλύτερες τιμές να αναπτύσσονται όταν ο λόγος  $T_{\text{str}}/T$  γίνει ίσος με 2. Η μέγιστη τιμή της παραμένουσας αξονικής παραμόρφωσης εντοπίζεται στο τμήμα της γεωμεμβράνης κάτω από τα πρηνή του προσομοιώματος για τις περιπτώσεις του λόγου  $T_{\text{str}}/T$  (0.63, 1.33 και 2.0), στις οποίες δεν αναπτύσσεται ολίσθηση κατά μήκος του τμήματος της διεπιφάνειας το οποίο κείται υπό του καταστρώματος του Χ.Υ.Τ.Α.



**Σχήμα 6.34.** Κατανομή της κανονικοποιημένης παραμένουσας αξονικής παραμόρφωσης κατά μήκος της γεωμεμβράνης για τις τρεις σεισμικές καταγραφές της Λευκάδας (2003), της Αθήνας (Σεπόλια, 1999) και του Duzce (Bolu, 1999). Τα αποτελέσματα αντιστοιχούν σε ιδιοπερίοδο της κατασκευής 0.29sec και σε λόγο  $\tan\phi \cdot g / \alpha_{\max}$  ίσο με 0.5, με μέγιστη επιτάχυνση ίση με 0.4g.

Τέλος, οι αντίστοιχες κατανομές της κανονικοποιημένης αξονικής παραμόρφωσης κατά μήκος της γεωμεμβράνης παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.34 για τις τρεις εξεταζόμενες σεισμικές καταγραφές. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η κανονικοποιημένη αξονική παραμόρφωση για την καταγραφή του σεισμού της Λευκάδας και την καταγραφή Bolu από τον σεισμό Duzce (1999), για τις οποίες η κατανομή της κανονικοποιημένης ολίσθησης είναι σχεδόν ομοιόμορφη (βλ. Σχήμα 6.19),

έχει μικρό μέγεθος. Αντιθέτως, για την καταγραφή στα Σεπόλια από το σεισμό της Αθήνας (1999), όπου η κατανομή της κανονικοποιημένης ολίσθησης είναι έντονα ανομοιόμορφη, υπολογίζεται και η μεγαλύτερη κανονικοποιημένη αξονική παραμόρφωση.

## 6.7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο κεφάλαιο αυτό διεξήχθη μια εκτενής παραμετρική διερεύνηση ενός λεπτομερούς προσομοιώματος με την εφαρμογή της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων. Η διερεύνηση της συζευγμένης απόκρισης ενός διδιάστατου υπέργειου Χ.Υ.Τ.Α. με την ανάπτυξη ολίσθησης κατά μήκος της κατώτερης διεπιφάνειας του συστήματος στεγάνωσης του έδειξε ότι υφίστανται δύο πρωτεύοντες μηχανισμοί αστοχίας.

Ο πρώτος μηχανισμός αστοχίας σχετίζεται με την ανάπτυξη παραμενουσών σεισμικών μετακινήσεων κατά μήκος του συνόλου της κατώτερης διεπιφάνειας της γεωμεμβράνης στεγάνωσης. Μεγαλύτερου μεγέθους σεισμικές μετακινήσεις εντοπίζονται στο τμήμα της γεωμεμβράνης με αρχική στατική διατμητική τάση που συμπίπτει με την φορά των επιβαλλόμενων διατμητικών τάσεων. Το μέγεθος της κανονικοποιημένης παραμένουσας ολίσθησης αυξάνεται καθώς μεγαλώνει ο λόγος της ιδιοπεριόδου της κατασκευής προς την περίοδο της διέγερσης. Η μέγιστη κανονικοποιημένη αξονική παραμόρφωση για αυτήν τη μορφή αστοχίας εντοπίζεται στο τμήμα της γεωμεμβράνης που βρίσκεται κάτω από το κατάστρωμα του προσομοιώματος. Η δεδομένη μορφή αστοχίας σχετίζεται με τιμές του λόγου της διατμητικής αντοχής της διεπιφάνειας προς τη μέγιστη επιβαλλόμενη επιτάχυνση μικρότερες της μονάδας και τιμές του λόγου της ιδιοπεριόδου της κατασκευής προς την περίοδο της διέγερσης μικρότερες από δύο. Το απλοποιητικό προσομοίωμα μπορεί να αποδώσει με αποδεκτή ακρίβεια την παραμένουσα ολίσθηση για σχετικά μεγάλες τιμές του λόγου της διατμητικής αντοχής της διεπιφάνειας προς τη μέγιστη επιβαλλόμενη επιτάχυνση.

Ο δεύτερος μηχανισμός αστοχίας χαρακτηρίζεται από παραμένουσες σεισμικές μετακινήσεις αντίθετης φοράς ως προς τον άξονα συμμετρίας της κατασκευής, οδηγώντας σε διπλή αστάθεια κάτω από κάθε πρυνές του προσομοιώματος. Σε αυτήν τη μορφή αστοχίας η μέγιστη κανονικοποιημένη αξονική παραμόρφωση εντοπίζεται στο τμήμα της γεωμεμβράνης που βρίσκεται κάτω από τα πρυνή. Επιπλέον, αυτή η μορφή



αστοχίας αναπτύσσεται όταν δεν είναι δυνατή η έναρξη και συσσώρευση της ολίσθησης στο τμήμα της διεπιφάνειας που εντοπίζεται κάτω από το κατάστρωμα του προσομοιώματος.

Όπως διαπιστώθηκε από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων της λεπτομερούς αριθμητικής προσομοίωσης με την αναλυτική λύση, που διατυπώθηκε στο 5<sup>ο</sup> κεφάλαιο για τον υπολογισμό της κρίσιμης επιτάχυνσης, η αναλυτική λύση προβλέπει με ικανοποιητική ακρίβεια τόσο την κρίσιμη επιτάχυνση για την έναρξη της ολίσθησης στη θέση του άξονα συμμετρίας όσο και τις περιπτώσεις όπου δεν είναι εφικτή η ανάπτυξη της ολίσθησης. Συνεπώς, τα όρια ανάπτυξης του κάθε μηχανισμού καθορίζονται από τα ζεύγη των τιμών των λόγων  $T_{str}/T$  και  $\tan\phi^*g/\alpha_{max}$  τα οποία δίνουν την οριακή συνθήκη ολίσθησης (βλ. Πίνακα 5.1).

Τέλος, προέκυψε ότι για την περίπτωση εκδήλωσης του πρώτου μηχανισμού αστοχίας, η δυναμική απόκριση του προσομοιώματος επηρεάζεται κυρίως από τη διαδικασία συσσώρευσης της ολίσθησης. Για αυτές τις περιπτώσεις, διαπιστώθηκε ότι το συχνотικό περιεχόμενο της απόκρισης εμπλουτίζεται με πιο υψίσυχνες συνιστώσες και ότι η ενίσχυση της επιτάχυνσης μπορεί να είναι της τάξης του 4. Συνεπώς, δεν πρέπει να αμελείται η ενίσχυση της σεισμικής κίνησης σε συστήματα με προδιαγεγραμμένες επιφάνειες ολίσθησης όπως είναι οι Χ.Υ.Τ.Α.

## 6.8 ΑΝΑΦΟΡΕΣ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

ABAQUS, (2004) "Analysis User's Manual Version 6.4", ABAQUS Inc., USA.

EC, (1999) "On the landfill of waste-Council Directive 1999/31/EC", Official Journal of the European Communities L 182, 0001 – 0019.

EPA, (1993) "MSW landfill criteria technical manual", Environmental Protection Agency, USA.

Kavazanjian, E.Jr., and Matasovic N., (2001) "Seismic design of mixed and hazardous waste landfills," in Proceedings of Fourth International conference on recent advances in geotechnical earthquake engineering and soil dynamics and symposium in honor of professor W.D. Liam Finn.

ΚΥΑ Η.Π. 29407/3508, (2002) "Μέτρα και όροι για την υγειονομική ταφή αποβλήτων", Φ.Ε.Κ. 1572B/16-12-02.

Newmark, N.M., (1965) "Effect of earthquakes on dams and embankments," Geotechnique, 15 (2), 139-160.

Rathje, E.M., and Bray, J.D., (2000) "Nonlinear coupled seismic sliding analysis of earth structures", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 126 (11), 1002-1013.

- Thusyanthan, N.I., Madabhushi, S.P.G., and Singh, S., (2007) "Tension in geomembranes on landfill slopes under static and earthquake loading-Centrifuge study," *Geotextiles and Geomembranes*, 25, 78-95.
- Uddin, N., (1997) "A single step procedure for estimating seismically induced displacements in earth structures", *Computers and structures*, 64 (5/6), 1175-1182.
- Wartman, J., Bray, J.D., and Seed, R.B., (2003) "Inclined plane studies of the Newmark sliding block procedure", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 129 (8), 673-684.
- Westermo, B., and Udwadia, F., (1983) "Periodic response of a sliding oscillator system to harmonic excitation" *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 11, 135-146.

### Συμπεράσματα - Προτάσεις

#### 7.1 ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Οι λόγοι που καθιστούν το σχεδιασμό των Χώρων Υγειονομικής Ταφής Απορριμμάτων (Χ.Υ.Τ.Α.) θέμα μείζονος σημασίας είναι αρκετοί και σχετίζονται τόσο με τεχνικά όσο και με κοινωνικό-περιβαλλοντικά θέματα. Επίσης, είναι προφανείς οι δυσμενείς συνέπειες που θα προκύψουν από την ενδεχόμενη εκδήλωση μίας αστοχίας. Την τελευταία δεκαετία παρατηρείται ραγδαία αύξηση της κατασκευής των Χ.Υ.Τ.Α. ως αποτέλεσμα της ορθότερης πολιτικής διαχείρισης των αποβλήτων στην Ελλάδα, αλλά και της απαίτησης αποκατάστασης των υφιστάμενων Χώρων Ανεξέλεγκτης Διάθεσης Αποβλήτων (Χ.Α.Δ.Α.). Εξίσου σημαντικό είναι και το θέμα της κοινωνικής αποδοχής των κατασκευών αυτών, γεγονός που σχετίζεται με την αξιόπιστη και ασφαλή λειτουργία τους, καθώς και με το ελλιπές κανονιστικό υπόβαθρο στο γεωτεχνικό και αντισεισμικό σχεδιασμό τους. Η έντονη σεισμική δραστηριότητα του ελληνικού χώρου καθιστά επιτακτική την ανάγκη βελτίωσης του αντισεισμικού σχεδιασμού των Χ.Υ.Τ.Α.

Στην παρούσα διδακτορική διατριβή αρχικά εντοπίστηκαν με μία εκτενή βιβλιογραφική ανασκόπηση τα βασικά χαρακτηριστικά που διέπουν τον σχεδιασμό των Χ.Υ.Τ.Α., οι αδυναμίες του υφιστάμενου κανονιστικού πλαισίου, καθώς και οι ελλείψεις της κοινής πρακτικής του αντισεισμικού σχεδιασμού τους. Η επισκόπηση των διεθνών και ελληνικών κανονιστικών διατάξεων κατέστησε σαφές ότι απαιτείται η κατασκευή ενός συστήματος στεγάνωσης στη βάση του Χ.Υ.Τ.Α., το οποίο αποτελείται από ένα σύνολο εδαφικών και γεωσυνθετικών στρώσεων, η εναλλαγή των οποίων οδηγεί στη διαμόρφωση αρκετών διεπιφανειών εδάφους – γεωσυνθετικών, αλλά και γεωσυνθετικών μεταξύ τους. Η ύπαρξη του συστήματος στεγάνωσης αποτελεί καθοριστικό στοιχείο του σχεδιασμού των Χ.Υ.Τ.Α., καθώς λόγω της μειωμένης διατμητικής αντοχής κατά μήκος των διαμορφούμενων διεπιφανειών του, είναι δυνατή η ανάπτυξη μετακινήσεων κατά

μήκος τους, και συνεπώς η εκδήλωση αστοχίας, είτε υπό στατικές, είτε υπό σεισμικές συνθήκες. Η εκτενής βιβλιογραφική ανασκόπηση πειραματικών διαδικασιών προσδιορισμού των παραμέτρων διατμητικής αντοχής των διεπιφανειών αυτών έδειξε ότι το εύρος διακύμανσης των προτεινόμενων τιμών είναι μεγάλο. Αυτό οφείλεται κυρίως στο πλήθος των παραμέτρων που υπεισέρχονται κατά τον προσδιορισμό της διατμητικής αντοχής και αφορούν τόσο την πειραματική διαδικασία (π.χ. για την περίπτωση αργίλου με γεωμεμβράνη οι αστράγγιστες ή οι στραγγιζόμενες συνθήκες), όσο και τις μηχανικές ιδιότητες των δύο διαφορετικών υλικών (π.χ. η διατμητική αντοχή του εδάφους, η τραχύτητα της επιφάνειας της γεωμεμβράνης, ο τύπος τους πολυμερούς και το βάρος του γεωυφάσματος). Για τον λόγο αυτό, ο προσδιορισμός των παραμέτρων διατμητικής αντοχής των σχηματιζόμενων διεπιφανειών πρέπει να γίνεται σε πλήρη συμφωνία με τα χαρακτηριστικά του έργου και των χρησιμοποιούμενων υλικών. Δηλαδή θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη τόσο οι επιτόπου συνθήκες (π.χ. ορθή τάση), όσο και οι μηχανικές ιδιότητες των επιτόπου εδαφικών και γεωσυνθετικών υλικών.

Οι μηχανικές ιδιότητες του απορριμματικού υλικού αποτελούν ένα εξίσου σημαντικό θέμα για τον ασφαλή σχεδιασμό των Χ.Υ.Τ.Α. Το απορριμματικό υλικό όμως χαρακτηρίζεται από ένα πλήθος αβεβαιοτήτων, οι οποίες προέρχονται από τη φύση, την προέλευση, και τον τρόπο διαχείρισης των απορριμμάτων. Η σύσταση του απορριμματικού υλικού, η συμπίκνωση των απορριμμάτων, η καθημερινή κάλυψη και η ποσότητα του εδάφους, σε συνδυασμό με τις μεθόδους δειγματοληψίας και εκτέλεσης των δοκιμών είναι μερικοί μόνο από τους παράγοντες που συντελούν στη μεγάλη διασπορά των παραμέτρων της μηχανικής συμπεριφοράς του απορριμματικού υλικού. Για τις βασικότερες ιδιότητες του απορριμματικού υλικού, οι οποίες σχετίζονται με την εκτίμηση της σεισμικής συμπεριφοράς τους (δηλαδή την πυκνότητα, τη διατμητική αντοχή, την ταχύτητα διάδοσης του διατμητικού κύματος και τις σχέσεις απομείωσης του μέτρου διάτμησης-αύξησης του λόγου απόσβεσης) συλλέχθηκαν βιβλιογραφικά δεδομένα και διεξήχθησαν παραμετρικές αναλύσεις, ώστε να προσδιοριστεί η επίδρασή τους στην εκτιμώμενη δυναμική απόκριση και ευστάθεια των Χ.Υ.Τ.Α.

Αν και η καταπόνηση ενός Χ.Υ.Τ.Α. λόγω τεκτονικής διάρρηξης αποτελεί μία βασική συνιστώσα της σεισμικής καταπόνησης, οι κανονισμοί παρέχουν διατάξεις που περιορίζονται στον καθορισμό αποστάσεων ασφαλείας. Επιπλέον, ορίζεται ότι θα πρέπει να διασφαλίζεται η λειτουργία και επάρκεια του συστήματος στεγάνωσης χωρίς να προδιαγράφονται μέθοδοι υπολογισμού. Όμως, κατά τον σεισμό του Chi-Chi (1999)

στην Ταϊβάν διαπιστώθηκε μετακίνηση σεισμικού ρήγματος σε κοντινή θέση ενός Χ.Υ.Τ.Α. με συνεπαγόμενη ανάπτυξη ικανού μεγέθους μετακινήσεων στα πρηνή. Προκειμένου να διερευνηθεί ο μηχανισμός της διάδοσης ενεργών ρηγμάτων στην βάση των Χ.Υ.Τ.Α., αλλά και να προσδιοριστούν οι ενδεχόμενες δυσμενείς επιπτώσεις, διεξήχθη μία εκτενής παραμετρική διερεύνηση με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.

Το πρώτο μέρος των παραμετρικών αναλύσεων αφορούσε στη διάδοση του ρήγματος εντός του απορριμματικού όγκου και εξετάστηκε η επίδραση του τύπου του ρήγματος, της γωνίας βύθισής του και της θέσης του ρήγματος. Στο δεύτερο μέρος προσδιορίστηκε η καταπόνηση του συστήματος στεγάνωσης λόγω επιβαλλόμενης μετακίνησης στη βάση του. Εξετάστηκαν, τόσο οι παραδοχές προσομοίωσης (πυκνότητα του καννάβου και αρχικές γεωστατικές τάσεις), όσο και οι ιδιότητες του συστήματος στεγάνωσης (η σφιγρότητα της αργίλου, οι παράμετροι της μηχανικής συμπεριφοράς της γεωμεμβράνης, και η δυνατότητα ανάπτυξης ολίσθησης εκατέρωθεν της γεωμεμβράνης). Ακολούθησε μια εκτενής παραμετρική διερεύνηση μέτρων ενίσχυσης και προστασίας έναντι της τεκτονικής διάρρηξης. Προτάθηκαν και αναλύθηκαν δύο τύποι μέτρων προστασίας:

- ενίσχυση του υφιστάμενου συστήματος στεγάνωσης, με την αύξηση του πάχους της αργλικής στρώσης ή/και την προσθήκη γεωμεμβράνης στεγάνωσης, και
- κατασκευή οπλισμένου αναχώματος πάνω από την αναμενόμενη επιφανειακή εκδήλωση του ρήγματος.

Η δεύτερη συνιστώσα της σεισμικής καταπόνησης που εξετάστηκε, είναι αυτή που προκύπτει κατά τη διέλευση των σεισμικών κυμάτων, για την οποία οι κανονιστικές διατάξεις αναφέρονται στην εκτίμηση της ευστάθειας πρηνών κυρίως με την εφαρμογή της ψευδοστατικής μεθόδου. Κατ' αυτόν τον τρόπο επιδιώκονται συγκεκριμένοι συντελεστές ασφαλείας, οι οποίοι όμως αφενός δεν είναι ξεκάθαρο ότι αφορούν απορριμματικά πρηνή, αφετέρου εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την αβεβαιότητα των παραμέτρων διατμητικής αντοχής. Σύμφωνα με την κοινή πρακτική, το πρώτο βήμα στη διαδικασία αντισεισμικού σχεδιασμού ενός Χ.Υ.Τ.Α. θα πρέπει να αποτελείται από τον προσδιορισμό της δυναμικής απόκρισης, και πιο συγκεκριμένα από τη διενέργεια μονοδιάστατων αριθμητικών αναλύσεων. Είναι γεγονός ότι οι τελευταίες δεν είναι ικανές να προσομοιώσουν επαρκώς σύνθετα φαινόμενα κυματικής διάδοσης. Για τον λόγο αυτό προσδιορίστηκαν τα κύρια χαρακτηριστικά της δυναμικής απόκρισης

διάφορων τυπικών διατομών υπέργειων Χ.Υ.Τ.Α. με τη διεξαγωγή μίας εκτεταμένης παραμετρικής διερεύνησης με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Οι παράμετροι που εξετάστηκαν συμπεριελάμβαναν: την ταχύτητα διάδοσης του διατμητικού κύματος και την συσχέτιση της απομείωσης του λόγου διάτμησης και αύξησης του λόγου απόσβεσης του απορριμματικού υλικού, τα συχνотικά χαρακτηριστικά και τη μέγιστη επιτάχυνση της επιβαλλόμενης διέγερσης. Εξετάστηκε ταυτόχρονα και η δυνατότητα ή μη των μονοδιάστατων αναλύσεων να παρέχουν αποτελέσματα με ικανοποιητική ακρίβεια, καθώς και η δυναμική αλληλεπίδραση εδάφους-κατασκευής.

Εν συνεχεία συνυπολογίστηκε η επίδραση των ανωτέρω παραμέτρων και στην εκτίμηση της ευστάθειας των Χ.Υ.Τ.Α. με την εφαρμογή μίας ασύζευκτης μεθόδου ανάλυσης. Αν και, εν γένει, στην κοινή πρακτική θεωρείται ότι η ολίσθηση κατά μήκος των διεπιφανειών του συστήματος στεγάνωσης είναι η πιο κρίσιμη, εξετάστηκαν επιπλέον και κυκλικές επιφάνειες αστοχίας, σύμφωνα με τις αρχές των μεθόδων οριακής ισορροπίας. Αναπτύχθηκε ένα νέο προσομοίωμα, το οποίο βασίστηκε στις βασικές αρχές της μεθόδου των μονίμων παραμορφώσεων, και με το οποίο είναι δυνατός ο υπολογισμός σεισμικών μετακινήσεων όταν είναι δυνατή η ολίσθηση κατά μήκος δύο επιφανειών αστοχίας. Για την περίπτωση αστάθειας κατά μήκος διεπιφάνειας του συστήματος στεγάνωσης ερευνήθηκε επιπροσθέτως και η συζευγμένη δυναμική απόκριση, με: (α) την κατάστρωση μίας αναλυτικής λύσης για τον προσδιορισμό της κρίσιμης επιτάχυνσης, (β) την επίλυση απλών αριθμητικών προσομοιωμάτων, και (γ) τη διενέργεια λεπτομερών αριθμητικών αναλύσεων με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Και στις τρεις μεθόδους συνεκτιμήθηκε ο ρόλος των κυριότερων παραμέτρων, δηλαδή της ιδιοπεριόδου της κατασκευής, της περιόδου και της μέγιστης επιτάχυνσης της διέγερσης, καθώς και της διατμητικής αντοχής της διεπιφάνειας.

Τέλος, αν και από τις κανονιστικές διατάξεις απαιτείται ο ασφαλής σχεδιασμός του συστήματος στεγάνωσης, δεν προσδιορίζεται ούτε κάποια συγκεκριμένη μεθοδολογία σχεδιασμού ούτε κάποια ανεκτά όρια αναπτυσσόμενων παραμορφώσεων. Επιπροσθέτως, στην κοινή πρακτική δεν υφίσταται μέθοδος εκτίμησης παραμορφώσεων της γεωμεμβράνης, καθώς θεωρείται εκ προοιμίου ότι ο περιορισμός της ολίσθησης κατά μήκος των διεπιφανειών του συστήματος στεγάνωσης εξασφαλίζει και την επάρκεια της γεωμεμβράνης. Παρόλα αυτά, από τα λιγοστά διαθέσιμα στοιχεία βλαβών σε Χ.Υ.Τ.Α., που διέθεταν σύστημα στεγάνωσης, προέκυψε ότι η σεισμική τρωτότητα του συστήματος στεγάνωσης είναι υπαρκτή. Επιπλέον, οι απλοποιητικές μέθοδοι υπολογισμού της

ευστάθειας δεν είναι ικανές να προσδιορίσουν το μέγεθος της αξονικής παραμόρφωσης της γεωμεμβράνης. Για τον σκοπό αυτό διεξήχθη μία εκτενής παραμετρική διερεύνηση, χρησιμοποιώντας μία λεπτομερή αριθμητική προσομοίωση με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Οι παράμετροι που εξετάστηκαν είναι οι αντίστοιχες αυτών που σχετίζονται και με τη συζευγμένη ευστάθεια κατά μήκος της διεπιφάνειας του συστήματος στεγάνωσης.

## 7.2 ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗ ΛΟΓΩ ΤΕΚΤΟΝΙΚΗΣ ΔΙΑΡΡΗΞΗΣ

Η διερεύνηση της καταπόνησης Χ.Υ.Τ.Α. κατά την ενδεχόμενη διάρρηξη ενός τεκτονικού ρήγματος έδειξε ότι οι βασικοί τύποι βλαβών που ενδέχεται να αναπτυχθούν κατηγοριοποιούνται σε:

- αστοχία του αργλικού γεωλογικού φραγμού [1<sup>η</sup> στάθμη βλάβης],
- αστοχία της γεωμεμβράνης στεγάνωσης (μέγιστη τάση ίση με το όριο διαρροής) [2<sup>η</sup> στάθμη βλάβης],
- αστοχία της απορριμματικής μάζας (επιφανειακή εκδήλωση του ρήγματος) [3<sup>η</sup> στάθμη βλάβης].

Συγκεκριμένα, προέκυψε ότι για κανονικό ρήγμα 45° η κατακόρυφη συνιστώσα της μετακίνησης του ρήγματος για την πλήρη διάρρηξη του αργλικού φραγμού ισούται με 2.4cm και για την ανάπτυξη μέγιστης αξονικής τάσης στη γεωμεμβράνη ίσης με το όριο διαρροής ίση με 6.4cm. Όμως, διαπιστώθηκε ότι η αύξηση της στιφρότητας του αργλικού φραγμού και του μέτρου ελαστικότητας της γεωμεμβράνης στεγάνωσης επιδρούν δυσμενώς στην καταπόνηση του συστήματος στεγάνωσης, λόγω τεκτονικής διάρρηξης, μειώνοντας τα αντίστοιχα απαιτούμενα μεγέθη μετακίνησης για την εκδήλωση των δύο βασικών σταθμών βλάβης. Επιπροσθέτως, η παραμετρική διερεύνηση απέδειξε ότι η διάδοση των μόνιμων παραμορφώσεων που αναπτύσσονται λόγω της τεκτονικής διάρρηξης εντός της απορριμματικής μάζας, εξαρτώνται από τον τύπο του ρήγματος, τη γωνία βύθισής του και τη θέση του. Παράλληλα, συνιστάται ιδιαίτερη προσοχή στην εφαρμογή των αριθμητικών μεθόδων καθώς διαπιστώθηκε ότι η ακρίβεια των αποτελεσμάτων εξαρτάται από την πυκνότητα του καννάβου των πεπερασμένων στοιχείων.

Για τη διασφάλιση της επάρκειας του σύνθετου συστήματος στεγάνωσης στην περίπτωση ανάπτυξης σημαντικών μετακινήσεων κατά την εκδήλωση μιας τεκτονικής

διάρρηξης, εξετάστηκαν αρχικά μέτρα προστασίας που βασίζονται στην ενίσχυση του συστήματος στεγάνωσης. Η αποτελεσματικότητα των εξεταζόμενων περιπτώσεων αποδείχτηκε ικανοποιητική, ειδικά στον περιορισμό των αναπτυσσόμενων αξονικών τάσεων της γεωμεμβράνης. Συγκεκριμένα, κατά τη διερεύνηση εφαρμογής μέτρων προστασίας του συστήματος στεγάνωσης έναντι τεκτονικής διάρρηξης προτείνεται να ακολουθείται η εξής επαναληπτική διαδικασία: (α) αύξηση του πάχους της αργίλου, (β) προσθήκη επιπρόσθετης γεωμεμβράνης, και (γ) αύξηση του πάχους της γεωμεμβράνης. Η διαδικασία αυτή, βάσει και των οικονομικών στοιχείων της κάθε λύσης, θα αποδώσει τη βέλτιστη τεχνικο-οικονομική λύση.

Επιπλέον, εξετάστηκε η ικανότητα ενός υπόγειου γεωσυνθετικά οπλισμένου αναχώματος να χρησιμοποιηθεί ως μέτρο προστασίας έναντι τεκτονικής διάρρηξης. Η αποτελεσματικότητα των διατάξεων των οπλισμένων αναχωμάτων αποδείχτηκε ιδιαίτερα σημαντική, ακόμη και στον περιορισμό των μόνιμων παραμορφώσεων του αργιλικού φραγμού. Πιο συγκεκριμένα, ιδιαίτερα ευνοϊκή είναι η επίδραση της αύξησης του ύψους του αναχώματος, αλλά και η πυκνωση της απόστασης μεταξύ των οπλισμών. Πάντως, απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή στην περίπτωση οπλισμών μεγάλης ακαμψίας, καθώς η τοποθέτησή τους σε πυκνή διάταξη μπορεί να προκαλέσει λιγότερο ευμενή αποτελέσματα. Τέλος, αποδείχτηκε ότι είναι εφικτός ο επαρκής και ασφαλής σχεδιασμός ενός τέτοιου συστήματος, δεδομένης της πληθώρας των γεωπλεγμάτων με διάφορα τεχνικά χαρακτηριστικά που είναι διαθέσιμα στο εμπόριο.

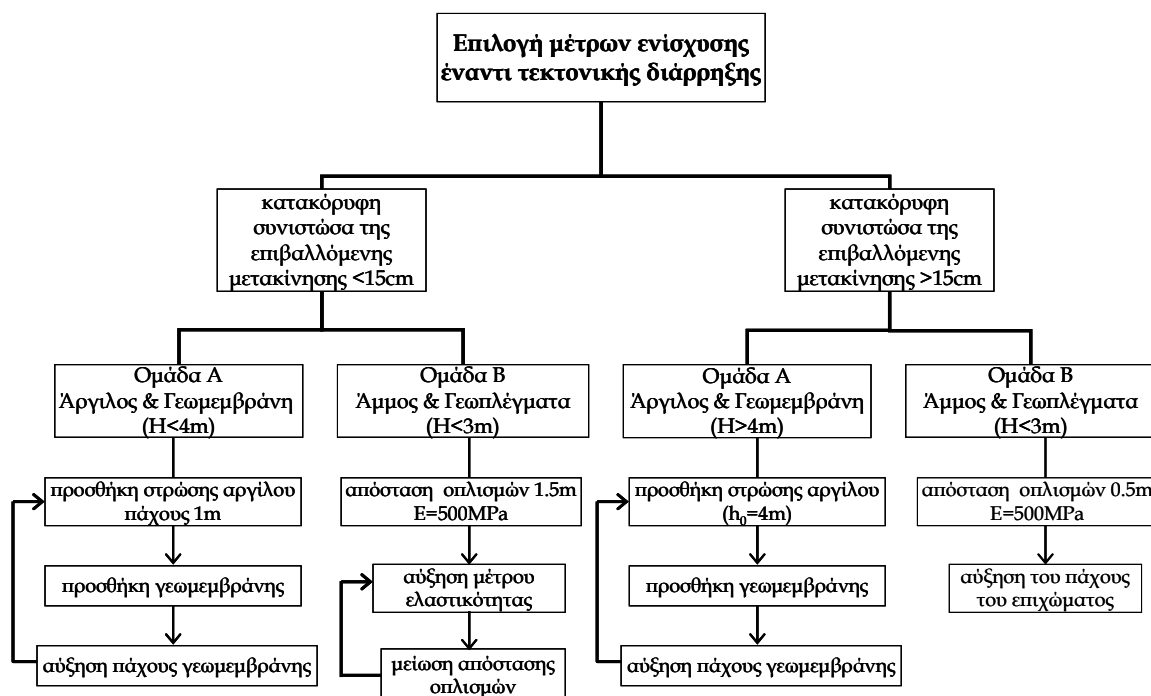
Μια σχηματική απεικόνιση της προτεινόμενης διαδικασίας επιλογής μέτρων προστασίας έναντι τεκτονικής διάρρηξης η οποία βασίστηκε στα αποτελέσματα της παρούσας διερεύνησης παρουσιάζεται στο Σχήμα 7.1.

### 7.3 ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗ

Από την εκτίμηση της δυναμικής απόκρισης τριών προσομοιωμάτων, δύο υπέργειων Χ.Υ.Τ.Α. τραπεζοειδούς διατομής και ενός Χ.Υ.Τ.Α. πλευρικής απόθεσης, επιβεβαιώνεται το συμπέρασμα ότι η ενίσχυση της σεισμικής κίνησης καθορίζεται από τα επιμέρους γεωμετρικά χαρακτηριστικά της κάθε περίπτωσης. Παρόλα αυτά, παρατηρήθηκε ότι η ισοδύναμη γραμμική ιδιοπερίοδος του προσομοιώματος αποτελεί παράμετρο που δύναται να ενσωματώσει τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά, όσον αφορά τη μέγιστη αναπτυσσόμενη επιτάχυνση στην επιφάνεια. Αποτέλεσμα αυτής της διαπίστωσης είναι η



κατανομή της κανονικοποιημένης μέγιστης επιτάχυνσης ως προς τη μέγιστη επιβαλλόμενη επιτάχυνση (δηλαδή η ενίσχυση του σεισμικού κραδασμού), να συσχετίζεται με τον λόγο της ισοδύναμα γραμμικής περιόδου της κατασκευής προς τη περίοδο της διέγερσης. Η συγκεκριμένη συσχέτιση μάλιστα διατηρεί τα χαρακτηριστικά ενός φάσματος απόκρισης. Αντιθέτως, ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο στις υπολογισθείσες τιμές της οριζόντιας επιτάχυνσης φαίνεται ότι διαδραματίζει η επιλογή της μη γραμμικής συσχέτισης που χαρακτηρίζει το απορριμματικό υλικό. Διαπιστώθηκε ότι η λιγότερο έντονη απομείωση του μέτρου διάτμησης-αύξηση του λόγου απόσβεσης μπορεί να σχετίζεται με ενίσχυση αντίστοιχης τάξης μεγέθους με αυτήν που προκύπτει για ελαστική απόκριση.



**Σχήμα 7.1.** Προτεινόμενη διαδικασία επιλογής μέτρων προστασίας έναντι τεκτονικής διάρρηξης.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της παρούσας διερεύνησης προέκυψε ότι η ικανότητα των μονοδιάστατων αναλύσεων να εκτιμήσουν με επαρκή ακρίβεια την επιφανειακή απόκριση των Χ.Υ.Τ.Α., εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το συχνотικό περιεχόμενο της σεισμικής κίνησης, αλλά και από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της τυπικής διατομής. Απόρροια αυτής της έντονης επίδρασης είναι η μεγάλη διασπορά του συντελεστή τοπογραφικής επιδείνωσης, ο οποίος αποτελεί το λόγο της μέγιστης επιτάχυνσης όπως προέκυψε από διδιάστατες αναλύσεις προς την αντίστοιχη από μονοδιάστατες

αναλύσεις. Ο συντελεστής τοπογραφικής επιδείνωσης μπορεί να λαμβάνει τιμές που κυμαίνονται από 0.8 έως 2.0, χωρίς κάποια προφανή συσχέτιση με τον λόγο της ισοδύναμα γραμμικής ιδιοπεριόδου της κατασκευής προς την περίοδο της διέγερσης.

Μία επιπρόσθετη συνέπεια των επιφανειακών ή μη ανωμαλιών που μπορεί να σχετίζονται με τη διαμόρφωση της απόθεσης του απορριμματικού όγκου, είναι η ανάπτυξη κατακόρυφης «παρασιτικής» συνιστώσας της επιτάχυνσης. Ιδιαίτερα ισχυρή αποδείχτηκε αυτή η συνιστώσα της σεισμικής κίνησης για την περίπτωση των Χ.Υ.Τ.Α. πλευρικής απόθεσης, λαμβάνοντας τιμές έως και ίσες της μέγιστης επιβαλλόμενης επιτάχυνσης. Αντιθέτως, για τους τραπεζοειδείς υπέργειους Χ.Υ.Τ.Α. η κατακόρυφη επιτάχυνση φτάνει μόλις κατά μέγιστο σε ποσοστό 40% της μέγιστης επιβαλλόμενης επιτάχυνσης. Λόγω της έντονης συσχέτισης της παραμέτρου με τα σύνθετα φαινόμενα κυματικής διάδοσης, τα οποία δεσπόζουν στη δυναμική απόκριση των Χ.Υ.Τ.Α., δεν κατέστη εφικτή η ικανοποιητική συσχέτισή της με τον λόγο της ισοδύναμα γραμμικής περιόδου της κατασκευής προς την περίοδο της διέγερσης. Λόγω της σημαντικής επίδρασης τόσο του υποβάθρου, όσο και της επιφανειακής διαμόρφωσης ενός Χ.Υ.Τ.Α. στην δυναμική απόκρισή του, συνιστάται η δυναμική απόκριση να υπολογίζεται κατά περίπτωση και όχι από προσεγγιστικές μεθόδους όταν η θεμελίωση των Χ.Υ.Τ.Α. γίνεται σε περιοχές με έντονο τοπογραφικό ανάγλυφο.

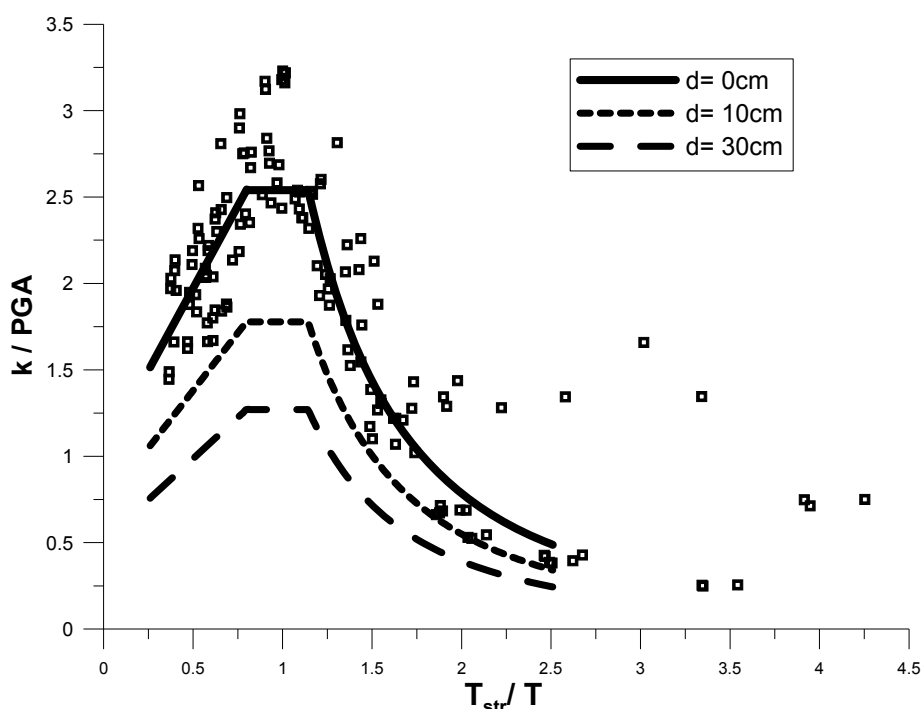
Τέλος, η δυναμική αλληλεπίδραση εδάφους-κατασκευής αποδείχτηκε αρκετά σύνθετο φαινόμενο, το οποίο εξαρτάται από τις τοπικές εδαφικές συνθήκες και ειδικά από την ιδιοσυχνότητα των υποκείμενων εδαφικών στρώσεων. Για τον λόγο αυτό δεν θα πρέπει να λαμβάνεται εκ προοιμίου απλουστευτικά υπόψη, καθώς η ευεργετική ή μη δράση της δεν μπορεί να κριθεί εκ των προτέρων αλλά κατά περίπτωση.

#### **7.4 ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΚΑΙ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΣΤΕΓΑΝΩΣΗΣ**

Η εκτίμηση της σεισμικής ευστάθειας των Χ.Υ.Τ.Α. αφορά τόσο κυκλικές επιφάνειες αστοχίας, οι οποίες αναπτύσσονται εξ ολοκλήρου εντός του απορριμματικού υλικού, όσο και επίπεδες επιφάνειες αστοχίας, οι οποίες αναπτύσσονται κατά μήκος διεπιφανειών του συστήματος στεγάνωσης. Η παραμετρική διερεύνηση για τις κυκλικές επιφάνειες αστοχίας απέδειξε ότι η κατανομή της οριζόντιας και κατακόρυφης συνιστώσας της μέγιστης ισοδύναμης επιτάχυνσης κανονικοποιημένης ως προς τη μέγιστη επιβαλλόμενη επιτάχυνση συσχετίζεται με τον λόγο της ιδιοπεριόδου της

κατασκευής προς τη δεσποζουσα περίοδο της διέγερσης. Αποτέλεσμα αυτής της συσχέτισης είναι η κατανομή να λαμβάνει τη μορφή ενός φάσματος. Επιπλέον, η μέγιστη τιμή της οριζόντιας συνιστώσας της ισοδύναμης επιτάχυνσης μπορεί να αποτελέσει τον σεισμικό συντελεστή για την ψευδοστατική ανάλυση, με σκοπό την επίτευξη συντελεστή ασφαλείας ίσου με τη μονάδα.

Με την παραδοχή αυτή μορφώθηκε το φάσμα του Σχήματος 7.2, το οποίο μπορεί να εφαρμοστεί για τον προσεγγιστικό υπολογισμό των σεισμικών συντελεστών. Επιπροσθέτως, οι υπολογιζόμενες παραμορφώσεις για αυτή τη μορφή αστοχίας, λαμβάνοντας υπόψη και την επίδραση της αύξησης λόγω εφαρμογής της κατακόρυφης συνιστώσας της ισοδύναμης επιτάχυνσης, είναι μικρότερες από 10cm και 30cm για κρίσιμη επιτάχυνση περίπου ίση με το 70% και 50% της μέγιστης ισοδύναμης επιτάχυνσης, αντίστοιχα. Οπότε, προέκυψαν τα αντίστοιχα φάσματα βάσει επίδοσης από τον πολλαπλασιασμό του φάσματος επί 70% και 50%, αντίστοιχα.



**Σχήμα 7.2.** Προτεινόμενο φάσμα προσεγγιστικής εκτίμησης των σεισμικών συντελεστών κατά την ψευδοστατική ανάλυση κυκλικών επιφανειών αστοχίας των απορριμματικών πρυνών.

Για την εκτίμηση της ευστάθειας κατά μήκος διεπιφάνειας εντός του συστήματος στεγάνωσης οι συζευγμένες μέθοδοι θεωρούνται πιο ακριβείς. Η κρίσιμη επιτάχυνση για

την έναρξη της ολίσθησης υπολογίστηκε έπειτα από την επίλυση των διαφορικών εξισώσεων κίνησης ενός μονοβάθμιου ταλαντωτή με τη δυνατότητα ανάπτυξης ολίσθησης στη βάση του. Αποδείχτηκε ότι το ενδεχόμενο ανάπτυξης ολίσθησης κατά μήκος μίας εκ των διεπιφανειών του συστήματος στεγάνωσης, αποτελεί συνάρτηση τόσο του λόγου της ιδιοπεριόδου της κατασκευής προς την περίοδο της διέγερσης, όσο και του λόγου της διατμητικής αντοχής της διεπιφάνειας προς τη μέγιστη επιβαλλόμενη επιτάχυνση. Διαπιστώθηκε επίσης ότι, υφίσταται μία οριακή τιμή του λόγου της διατμητικής αντοχής της διεπιφάνειας προς τη μέγιστη επιβαλλόμενη επιτάχυνση πέραν της οποίας δεν είναι εφικτή η ανάπτυξη ολίσθησης (οριακή συνθήκη ολίσθησης).

Από τα αποτελέσματα της λεπτομερούς αριθμητικής προσομοίωσης εξάγονται αρχικά τα εξής βασικά συμπεράσματα:

- το αρχικό γεωστατικό πεδίο διατμητικών και ορθών τάσεων επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την ολίσθηση για τις περισσότερες από τις εξεταζόμενες περιπτώσεις,
- ακόμη και για απολύτως συμμετρικές φορτίσεις, όπως είναι οι παλμοί ημιτόνου υφίσταται παραμένουσα ολίσθηση, η οποία αποδίδεται στην αδρανειακή απόκριση του συστήματος και στη μη μηδενική στατική διατμητική τάση,
- η κατανομή των σεισμικών μετακινήσεων κατά μήκος της διεπιφάνειας της γεωμεμβράνης και των αξονικών παραμορφώσεων κατά μήκος της γεωμεμβράνης είναι εν γένει ανομοιόμορφη,
- τόσο οι σεισμικές μετακινήσεις όσο και οι αξονικές παραμορφώσεις κατά μήκος της γεωμεμβράνης είναι δυνατό να κανονικοποιηθούν ως προς τη μέγιστη επιβαλλόμενη επιτάχυνση και ως προς το τετράγωνο της περιόδου του παλμού,
- η συζευγμένη απόκριση του συστήματος μπορεί να καταλήξει σε ενίσχυση της επιτάχυνσης στην επιφάνεια, αλλά ταυτόχρονα μεταβάλλει και το συχνотικό περιεχόμενο της απόκρισης.

Εν συνεχεία, βάσει των κατανομών των κανονικοποιημένων σεισμικών μετακινήσεων και των κανονικοποιημένων αξονικών παραμορφώσεων κατά μήκος της γεωμεμβράνης, διαπιστώθηκε ότι η συμπεριφορά του συζευγμένου συστήματος μπορεί να κατηγοριοποιηθεί σε δύο μηχανισμούς αστοχίας.

Ο πρώτος μηχανισμός αστοχίας σχετίζεται με την ανάπτυξη παραμενουσών σεισμικών μετακινήσεων κατά μήκος του συνόλου της κατώτερης διεπιφάνειας της γεωμεμβράνης στεγάνωσης. Μεγαλύτερου μεγέθους σεισμικές μετακινήσεις

εντοπίζονται στο τμήμα της γεωμεμβράνης με αρχική στατική διατμητική τάση που συμπίπτει με τη φορά των επιβαλλόμενων διατμητικών τάσεων. Το μέγεθος της κανονικοποιημένης παραμένουσας ολίσθησης αυξάνει, καθώς αυξάνει ο λόγος της ιδιοπεριόδου της κατασκευής προς την περίοδο της διέγερσης. Η μέγιστη κανονικοποιημένη αξονική παραμόρφωση για αυτήν τη μορφή αστοχίας εντοπίζεται στο τμήμα της γεωμεμβράνης που βρίσκεται κάτω από το κατάστρωμα του προσομοιώματος.

Ο δεύτερος μηχανισμός αστοχίας χαρακτηρίζεται από παραμένουσες σεισμικές μετακινήσεις αντίθετης φοράς ως προς τον άξονα συμμετρίας της κατασκευής, υπονοώντας διπλή αστάθεια κάτω από κάθε πρηνές του προσομοιώματος. Σε αυτήν τη μορφή αστοχίας η μέγιστη κανονικοποιημένη αξονική παραμόρφωση εντοπίζεται στο τμήμα της γεωμεμβράνης που κείται υπό των πρηνών. Επιπλέον, αυτή η μορφή αστοχίας αναπτύσσεται όταν δεν είναι δυνατή η έναρξη και συσσώρευση της ολίσθησης στο τμήμα της διεπιφάνειας που εντοπίζεται κάτω από το κατάστρωμα του προσομοιώματος. Από τα χαρακτηριστικά της δεύτερης μορφής αστοχίας εξάγεται το συμπέρασμα ότι, τα όρια ανάπτυξης του κάθε μηχανισμού καθορίζονται από τα ζεύγη των τιμών των λόγων της ιδιοπεριόδου της κατασκευής προς την περίοδο της διέγερσης και της διατμητικής αντοχής της διεπιφάνειας προς τη μέγιστη επιβαλλόμενη επιτάχυνση, τα οποία δίνουν την οριακή συνθήκη ολίσθησης.

Τέλος, εξετάστηκε και η συσχέτιση μεταξύ της αστοχίας κυκλικής επιφάνειας και της αστοχίας κατά μήκος του συστήματος στεγάνωσης. Θεωρώντας την ίδια μέθοδο ανάλυσης ευστάθειας, την ασύζευκτη, προέκυψε ότι, όσο αυξάνει η διαφορά μεταξύ της διατμητικής αντοχής του απορριμματικού υλικού και της διεπιφάνειας του συστήματος στεγάνωσης, τόσο γίνεται πιο κρίσιμη η ολίσθηση κατά μήκος του συστήματος στεγάνωσης. Πάντως για κάθε περίπτωση που εξετάστηκε, η κρίσιμη επιτάχυνση της κυκλικής επιφάνειας αστοχίας ήταν μεγαλύτερη της αντίστοιχης για αστάθεια κατά μήκος τους συστήματος στεγάνωσης.

Στην αντίθετη περίπτωση, δηλαδή όταν η κρίσιμη επιτάχυνση της κυκλικής επιφάνειας αστοχίας είναι η μικρότερη, υπάρχει το ενδεχόμενο ταυτόχρονης ανάπτυξης ολίσθησης κατά μήκος δύο διεπιφανειών. Από τις αναλύσεις του νέου προσομοιώματος που διατυπώθηκε, φάνηκε ότι η επίδραση του φαινομένου της διπλής ολίσθησης εξαρτάται από το λόγο των μαζών των δυο επιφανειών αστοχίας, το λόγο των κρίσιμων

επιταχύνσεων τους και την κλίση του άνω επιπέδου αστοχίας. Η θεώρηση επίπεδης επιφάνειας αστοχίας στα απορριμματικά πρανή μπορεί εύκολα να απαλειφθεί, εφαρμόζοντας για την κρίσιμη επιτάχυνση των κυκλικών επιφανειών ανάστροφο υπολογισμό της γωνίας κλίσης του επιπέδου. Συμπεραίνεται ότι, το προσομοίωμα της διπλής ολίσθησης μπορεί να χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της σημασίας του συγκεκριμένου φαινομένου κατά τον αντισεισμικό σχεδιασμό των Χ.Υ.Τ.Α.

## 7.5 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ

Είναι δεδομένο ότι η οποιαδήποτε ερευνητική προσπάθεια είναι αδύνατο να καλύψει πλήρως ένα εξεταζόμενο αντικείμενο. Μία διδακτορική διατριβή μπορεί να συμβάλλει στη κατανόηση μερικών επιστημονικών θεμάτων αλλά ταυτόχρονα να αποτελέσει το έναυσμα για την περαιτέρω εξέλιξη στο συγκεκριμένο ερευνητικό πεδίο. Με βάση τα προαναφερθέντα ευρήματα της παρούσας εργασίας οι μελλοντικές προεκτάσεις θα μπορούσαν να περιλαμβάνουν ενδεικτικά:

- διερεύνηση της αποτελεσματικότητας των προτεινόμενων μέτρων προστασίας Χ.Υ.Τ.Α. για διαφορετικές γωνίες διάδοσης ρήγματος και διαφορετικούς τύπους ρήγματος, και επαλήθευση της ευεγερτικής δράσης τους μέσω πειραμάτων,
- επέκταση των φασμάτων προσεγγιστικής εκτίμησης του σεισμικού συντελεστή της ευστάθειας κυκλικών επιφανειών αστοχίας για περιπτώσεις που ο Χ.Υ.Τ.Α. δεν εδράζεται επί δύσκαμπτου βράχου αλλά σε διάφορες κατηγορίες εδάφους,
- διερεύνηση της αλληλεπίδρασης της ανάπτυξης δύο μηχανισμών αστοχίας, λαμβάνοντας υπόψη και την ευκαμψία της μάζας που εμπεριέχεται μεταξύ των δύο διεπιφανειών ολίσθησης, είτε με την κατάστροψη απλών ημι-αναλυτικών λύσεων είτε με την αριθμητική προσομοίωση μέσω πεπερασμένων στοιχείων,
- διερεύνηση της καταπόνησης της γεωμεμβράνης υπέργειων Χ.Υ.Τ.Α. με την εκτέλεση πειραμάτων σε σεισμική τράπεζα ή σε φυγοκεντριστή και επαλήθευση του φαινομένου της ασύμμετρης ολίσθησης,
- εκτίμηση της σεισμικής καταπόνησης και ευστάθειας του συστήματος τελικής κάλυψης,
- διερεύνηση της ανάγκης για την διενέργεια τριδιάστατων δυναμικών αριθμητικών αναλύσεων σε πιο πολύπλοκες γεωμετρίες.

Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι αρκετά από τα ευρήματα της παρούσας διδακτορικής διατριβής, αν και έχουν διατυπωθεί με σκοπό τον αντισεισμικό σχεδιασμό Χ.Υ.Τ.Α., μπορούν να βρουν εφαρμογή και σε άλλες κατασκευές.

## 7.6 ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ

Στο πλαίσιο της ερευνητικής προσπάθειας κατά την εκπόνηση της παρούσας διατριβής προέκυψαν οι ακόλουθες επιστημονικές δημοσιεύσεις:

- Zania V., Tsompanakis Y., Psarropoulos P.N., (2009) "Seismic displacements of landfills and deformation of geosynthetics due to base sliding", (under review) in Geotextiles and Geomembranes.
- Zania V., Tsompanakis Y., Psarropoulos P.N., (2009) "Base sliding and dynamic response of landfills", Advances in Engineering Software.
- Zania V., Tsompanakis Y., Psarropoulos P.N., (2008) "Seismic distress and slope instability of municipal solid waste landfills", Journal of Earthquake Engineering, 12(2), 312-340.
- Zania V., Psarropoulos P.N., Karabatsos Y., and Tsompanakis Y., (2008) "Inertial distress of waste landfills", Journal of Computers & Structures, 86(7-8), 642-651.
- Zania V., Tsompanakis Y., and Psarropoulos P.N., (2009) "The effect of soil structure interaction and site effects on dynamic response and stability of earth structures", in Coupled site and soil-structure interaction effects with application to seismic risk mitigation, eds. T. Schanz and R. Iankov, Springer, 127-138.
- Zania V., Tsompanakis Y., and Psarropoulos P.N., (2009) "Advances in seismic slope stability analysis of earth structures", in New trends in seismic design of structures, eds. N.D. Lagaros, Y. Tsompanakis and M. Papadrakakis, Saxe&Coburg Publications.
- Zania V., Tzavara I., Tsompanakis Y., and Psarropoulos P.N., (2009) "Geosynthetics as mitigation measure for seismic hazards on geostructures", Earthquake Geotechnical Engineering Satellite Conference, Alexandria, Egypt, (to appear)
- Zania V., Tsompanakis Y., and Psarropoulos P.N., (2009) "Mitigating the effects of fault rupture", 2nd International Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering (COMPDYN 2009), Rhodes, Greece.
- Zania V., Tsompanakis Y., and Psarropoulos P.N., (2009) "Seismic response of sliding structures", 2nd International Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering (COMPDYN 2009), Rhodes, Greece.
- Zania V., Tsompanakis Y., and Psarropoulos P.N., (2008) "The role of composite base liners in the seismic behavior of solid waste landfills", 3rd Hellenic Conference on Earthquake Engineering and Engineering Seismology, Athens, Greece.
- Zania V., Tsompanakis Y., and Psarropoulos P.N., (2008) "Distress of solid waste landfills due to permanent deformations induced during a fault rupture", 3rd Hellenic Conference on Earthquake Engineering and Engineering Seismology, Athens, Greece.
- Zania V., Tsompanakis Y., and Psarropoulos P.N., (2008) "Fault rupture and kinematic distress of earth filled embankments", Proceedings of 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China.

- Zania V., Tsompanakis Y., and Psarropoulos P.N., (2008) "Dynamic behavior of geosynthetic lined waste impoundments", Proceedings of 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China.
- Zania V., Tsompanakis Y., and Psarropoulos P.N., (2008) "Effects of fault rupture propagation on earth structures", Proceedings of 6th International Conference on Engineering Computational Technology, Papadrakakis M. and Topping B.H.V. (eds.), Civil-Comp Press, Stirling, United Kingdom.
- Zania V., Tsompanakis Y., and Psarropoulos P.N., (2008) "The role of geosynthetics on seismic behavior of landfills", Proceedings of 4th European Geosynthetics Conference, Edinburgh, Great Britain.
- Tsompanakis Y., Zania V., and Psarropoulos P.N., (2008) "Seismic stability of landfills and distress on the geosynthetic barrier", Proceedings of 8th World Congress on Computational Mechanics, Venice, Italy.
- Zania V., Tsompanakis Y., Psarropoulos P.N., and Papadimitriou A., (2008) "Failure mechanisms of landfills under dynamic loading", Proceedings of 4th Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics Conference, Sacramento, USA.
- Zania V., Tsompanakis Y., and Psarropoulos P.N., (2007) "Seismic stability assessment of landfills", In Topping B.H.V. (ed.), Proceedings of the Eleventh International Conference on Civil, Structural and Environmental Engineering Computing, Civil-Comp Press, Stirling, United Kingdom, paper 22.
- Zania V., Tsompanakis Y., Psarropoulos P.N., (2007) "Seismic behavior of sliding geostructures", Proceedings of International Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering (COMPDYN 2007), Rethymno, Greece.
- Zania V., Tsompanakis Y., Psarropoulos P.N., (2007) "Double sliding phenomena and seismic response of earth structures", Proceedings of 4th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, Thessaloniki, Greece, Paper No 1218.
- Zania V., Tsompanakis Y., Psarropoulos P.N., (2007) "Slope stability of municipal solid waste landfills under seismic loading", Proceedings of 4th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, Thessaloniki, Greece, Paper No 1217.
- Zania V., Tsompanakis Y., Psarropoulos P.N., (2007) "Effect of geosynthetic materials on the seismic response and stability of geostructures", Geotechnical applications of geosynthetics, Athens, Greece.
- Zania V., Tsompanakis Y., Psarropoulos P.N., (2006) "Efficient numerical simulation of waste landfills' seismic response", Proceedings of 6th European Conference on Numerical methods in Geotechnical Engineering, Graz , Austria.
- Psarropoulos P.N., Tsompanakis J., Karabatsos J., Zania V., (2006) "The role of dynamic soil-structure interaction in response of municipal solid waste landfills", Proceedings of 5th Hellenic Conference of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Ksanthi, Greece, Vol 1, pp 581-588.



