

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ



ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟΥ ΔΙΠΛΩΜΑΤΟΣ ΕΙΔΙΚΕΥΣΗΣ

**Σεισμική απόκριση χώρων
υγειονομικής ταφής απορριμμάτων**

ΧΡΥΣΗ ΜΑΡΑΒΕΛΑΚΗ

Επιβλέπων: Αναπληρωτής Καθηγητής **Ιωάννης Τσομπανάκης**

ΧΑΝΙΑ, 2018

Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία επικεντρώνεται στη μελέτη χώρων υγειονομικής ταφής απορριμμάτων (ΧΥΤΑ) υπό σεισμική διέγερση, λαμβάνοντας υπόψη τις ιδιαιτερότητες των ιδιοτήτων των απορριμμάτων. Η σημασία της πραγματοποίησης μιας τέτοιας μελέτης καταδεικνύεται λόγω της μη αξιολόγησης της σπουδαιότητας των ιδιαιτεροτήτων των ΧΥΤΑ, της δυσκολίας εύρεσης των ιδιοτήτων του απορριμματικού υλικού και της απουσίας μελέτης των ιδιοτήτων του σε περίπτωση σεισμού. Έχουν παρατηρηθεί τα τελευταία χρόνια μεγάλες αστοχίες ΧΥΤΑ, οι οποίες εκτός των άλλων επιπτώσεων προκάλεσαν και ανθρώπινες απώλειες. Το ενδιαφέρον είναι αναμφισβήτητο μεγάλο, αλλά και η δυσκολία εκπόνησης μιας τέτοια μελέτης είναι επίσης μεγάλη, εξαιτίας της πολυπλοκότητας του 'γεωλογικού αναγλύφου' ενός ΧΥΤΑ, της έντονης ποικιλομορφίας των απορριμμάτων που τον αποτελούν και διαφόρων άλλων αβεβαιοτήτων που υπεισέρχονται στον σχεδιασμό και στην κατασκευή του.

Στόχος της μελέτης είναι να διερευνήσει τις ιδιότητες του απορριμματικού υλικού και την επίδραση των χαρακτηριστικών αυτού σε ένα χώρο υγειονομικής ταφής απορριμμάτων κατά τη διάρκεια μιας σεισμικής δόνησης. Για τη μελέτη και την ανάλυση του ΧΥΤΑ υπό σεισμική διέγερση και την επιρροή της μη-γραμμικής απόκρισης του απορριμματικού υλικού, πραγματοποιήθηκε δυναμική ανάλυση με κατάλληλες χρονοϊστορίες των επιταχύνσεων, χρησιμοποιώντας το επιστημονικό λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων *QUAD4M*, που δημιουργήθηκε από ομάδα ερευνητών στο Πανεπιστήμιο *Davis* των ΗΠΑ. Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για τη δυναμική μη-γραμμική ανάλυση βασίζονται σε συναφείς εργαστηριακές και αριθμητικές μελέτες της διεθνούς βιβλιογραφίας. Για την εισαγωγή των δεδομένων στο *QUAD4M* χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό *Excel*, ενώ η διακριτοποίηση των αριθμητικών προσομοιωμάτων ενός τυπικού ΧΥΤΑ έγινε με τη βοήθεια του *AutoCAD*.

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να εκφράσω τις ειλικρινείς ευχαριστίες μου σε όσους συνέβαλαν στην πραγματοποίηση της παρούσας εργασίας και ιδιαίτερα στον επιβλέποντα, κ. Ιωάννη

Τσομπανάκη, Αναπλ. Καθηγητή της Σχολής Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης για την επιστημονική καθοδήγηση και ηθική συμπαράσταση. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω και τους Καθηγητές της Σχολής Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης, κ. Γεώργιο Καρατζά και κ. Ευάγγελο Γιδαράκο, για τη συμμετοχή τους στην εξεταστική επιτροπή της παρούσας διατριβής. Ευχαριστώ, ακόμα και την κα. Ειρήνη Κουτσογιαννάκη, ΕΤΕΠ του Πολυτεχνείου Κρήτης, για την κριτική ανάγνωση του κειμένου της εργασίας

Πίνακας περιεχομένων

Πρόλογος.....	iii
Πίνακας περιεχομένων	v
Περίληψη	vii
Abstract	ix
Κεφάλαιο 1.....	1
Εισαγωγή.....	1
1.1 Αστικά στερεά απορρίμματα	1
1.2 Η βάση της νομοθεσίας σήμερα για την διαχείριση των αποβλήτων.....	3
1.2.1 Διαχείριση αποβλήτων με βάση τη νομοθεσία από Ευρωπαϊκή Ένωση	4
1.3 Σύσταση Αστικών Στερεών Αποβλήτων	6
1.4 Παραγωγή αστικών στερεών αποβλήτων.....	8
1.4.1. Παραγωγή αστικών στερεών αποβλήτων σε χώρες της Ευρώπης.....	8
1.4.2 Παραγωγή αστικών στερεών αποβλήτων στην Ελλάδα.....	11
1.5 Χώροι υγειονομικής ταφής απορριμμάτων.....	12
1.5.1 Στραγγίσματα	15
1.5.2 Βιοαέριο	16
1.5.3 Καθίζηση χώρων υγειονομικής ταφής απορριμμάτων	18
1.6 Αστοχίες ΧΥΤΑ λόγω κατολίσθησης	18
Κεφάλαιο 2.....	25
Παράγοντες που επηρεάζουν την ευστάθεια ενός χώρου υγειονομικής ταφής	25
2.1 Εισαγωγή.....	25
2.1.1 Η επίδραση του χρόνου ταφής των αστικών στερεών αποβλήτων	26
2.2 Δυναμικές ιδιότητες αστικών στερεών αποβλήτων	28
2.2.1 Δοκιμές προσδιορισμού δυναμικών ιδιοτήτων αστικών αποβλήτων.....	30
2.2.2 Δοκιμές διάτμησης στα αστικά στερεά απορρίμματα	36
2.3 Ειδικό βάρος αστικών στερεών αποβλήτων.....	40
2.4 Φυσικός χαρακτηρισμός των αστικών αποβλήτων	46

2.5. Αστοχίες χώρων υγειονομικής ταφής απορριμμάτων	47
2.5.1 Αστάθεια ΧΥΤΑ λόγω νερού	50
2.5.2 Γεωμετρία του ΧΥΤΑ.....	51
2.5.3 Διατμητική αντοχή απορριμμάτων	52
2.5.4 Διατμητική αντοχή επενδύσεων ΧΥΤΑ.....	56
2.5.5 Κλίμα	56
Κεφάλαιο 3.....	57
Μεθοδολογίες Ανάλυσης Σεισμικής Απόκρισης ΧΥΤΑ.....	57
3.1 Γραμμική ανάλυση εδαφών.....	57
3.2 Ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία	63
3.3 Ανάλυση με το λογισμικό QUAD4M	64
Κεφάλαιο 4.....	69
Αριθμητική Προσομοίωση Σεισμικής Απόκρισης ΧΥΤΑ	69
4.1 Απόκριση ΧΥΤΑ σε εδαφικές διεγέρσεις.....	69
4.2 Σεισμική απόκριση ΧΥΤΑ.....	70
4.3 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά ΧΥΤΑ - Δυναμικές ιδιότητες	72
4.4 Διακριτοποίηση προσομοιωμάτων.....	77
4.5 Χαρακτηριστικά εδαφικής κίνησης.....	79
4.6 Δημιουργία αρχείων εισόδου στο QUAD4M	81
4.7 Αριθμητικά αποτελέσματα	83
4.8 Συγκεντρωτικοί πίνακες αποτελεσμάτων	99
Κεφάλαιο 5.....	101
Συμπεράσματα.....	101
Βιβλιογραφία	105

Περίληψη

Το αντικείμενο της παρούσας μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση των κύριων παραγόντων που επηρεάζουν την ευστάθεια ενός χώρου υγειονομικής ταφής απορριμμάτων και πως επιδρούν αυτοί οι παράγοντες στη συμπεριφορά ενός χώρου υγειονομικής ταφής σε σεισμική καταπόνηση.

Η διερεύνηση γίνεται μέσω του λογισμικού *QUAD4M*, το οποίο έχει συνταχθεί σε γλώσσα προγραμματισμού *Fortran* και αναπτύχθηκε για την εν-χρόνω επίλυση διδιάστατων προβλημάτων της γεωτεχνικής σεισμικής μηχανικής. Βασικός σκοπός της εργασίας είναι η αριθμητική προσομοίωση της σεισμικής απόκρισης χώρου υγειονομικής ταφής απορριμμάτων ανάλογα με τις μηχανικές ιδιότητες του απορριμματικού υλικού.

Αρχικά, γίνεται μία εισαγωγή σε γενικές έννοιες που αφορούν τα αστικά απορρίμματα, τη σύστασή τους και τους τρόπους διαχείρισής τους, επικεντρώνοντας την περιγραφή στους χώρους υγειονομικής ταφής. Στη συνέχεια, γίνεται μια παρουσίαση των παραγόντων που επηρεάζουν τη σεισμική ευστάθεια ενός χώρου υγειονομικής ταφής απορριμμάτων, όπως οι δυναμικές ιδιότητες των στερεών αστικών αποβλήτων, το ειδικό βάρος, ο χρόνος ταφής και τέλος αναφέρονται κάποια παραδείγματα αστοχίας χώρων υγειονομικής ταφής.

Ακολουθεί η περιγραφή των μεθόδων αριθμητικής ανάλυσης και η ανάλυση με τη χρήση των πεπερασμένων στοιχείων, αναφέρονται βασικά στοιχεία για το λογισμικό *QUAD4M* και περιγράφεται η λειτουργία του. Ακολούθως, παρουσιάζεται εκτενώς η διαδικασία που ακολουθήθηκε στην παρούσα μελέτη για τις συγκεκριμένες δοκιμές και τα προσομοιώματα ΧΥΤΑ ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του απορριμματικού υλικού που χρησιμοποιήθηκαν, με αναλυτικά στοιχεία και περιγραφές και παρουσιάζονται τα σχετικά αποτελέσματα. Η εργασία ολοκληρώνεται με την αξιολόγηση των εξαχθέντων αποτελεσμάτων και την παρουσίαση των σχετικών συμπερασμάτων.

Abstract

The topic of the present thesis is the study of the main factors that influence the response of solid waste landfills under seismic loading. For this purpose, a series of seismic response analyses has been performed utilizing finite element software QUAD4M, which was developed in Fortran programming language and can be used for the solution of two-dimensional problems in geotechnical earthquake engineering. The main aim of this study is to present a realistic numerical simulation of the dynamic non-linear response of solid waste landfills taking into account the variation of mechanical properties of waste material.

Firstly, an introduction to general concepts regarding design and construction of municipal waste landfills is given. Furthermore, the key factors that affect the stability of landfills are provided, such as the dynamic properties of municipal waste, unit weight, compaction, etc. Examples of landfill failures are also presented. Moreover, a brief description of analysis methods, with emphasis on finite element based numerical approaches is included, in which the basic functions and capabilities of QUAD4M software are presented.

Subsequently, the computational procedure that has been implemented in this study for the examined typical landfill simulations is provided. Discussions of the derived results are presented, which highlight the wide discrepancy of the waste input data, which is also reflected in the results that strongly depend on the characteristics of the waste material as well as the frequency content and the intensity of the excitation. The thesis concludes by summarizing the findings of the study and presenting the conclusions obtained.

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1 Αστικά στερεά απορρίμματα

Με τον όρο Αστικά Στερεά Απορρίμματα (ΑΣΑ) (*Municipal Solid Waste*) θεωρούνται οι ουσίες ή τα αντικείμενα εκείνα που προέρχονται από την ανθρώπινη δραστηριότητα, παράγονται σε χώρους οικιακούς, εργασίας, ψυχαγωγίας και γενικότερα αστικού περιβάλλοντος, όπως ορίζονται και έχουν ταξινομηθεί στη γενική κατηγορία 20 του Ειδικού Καταλόγου Αποβλήτων (ΕΚΑ) σύμφωνα με το Παράρτημα της Απόφασης 2000/532/ΕΚ όπως έχει τροποποιηθεί με τις Αποφάσεις 2001/118/ΕΚ, 2001/119/ΕΚ και 2001/573/ΕΚ της Επιτροπής ΕΚ, η οποία έχει ενταχθεί στην ελληνική νομοθεσία (ΦΕΚ 383/Β/2006), (ΤΕΕ, 2010, *D-WASTE* ΕΛΛΑΣ, 2016). Τα οικιακά απορρίμματα ποικίλουν ως προς τη σύσταση και την ποσότητά τους. Οι παράγοντες που επηρεάζουν τις μεταβλητές αυτές, είναι το βιοτικό επίπεδο, τα καταναλωτικά πρότυπα, η μετακίνηση του πληθυσμού σε μεγάλα αστικά κέντρα και οι εποχές του έτους, όπου τους καλοκαιρινούς μήνες λόγω τουρισμού στην Ελλάδα παρατηρείται μεγάλη αύξηση των ΑΣΑ (Εικόνα 1.1).

Η συλλογή και διάθεση των αστικών στερεών αποβλήτων αποτελεί μείζον πρόβλημα του αστικού περιβάλλοντος σε όλο τον κόσμο σήμερα. Η έλλειψη κατάλληλης διαχείρισης των ΑΣΑ οδηγεί σε σημαντική μόλυνση εδάφους, νερού, αέρα και σε αισθητική ρύπανση, επίσης μπορεί να προκαλέσει προβλήματα στην ανθρώπινη υγεία, και να συμβάλλει στην αύξηση του φαινόμενου του θερμοκηπίου (*Weigand et al.*, 2003). Σε προηγμένες, περιβαλλοντικά συνειδητές κοινωνίες, η διαχείριση αντιμετωπίζεται ως ένα ολοκληρωμένο ζήτημα, δηλαδή με λύσεις που είναι τεχνολογικά εφικτές, νομικά και κοινωνικά αποδεκτές και περιβαλλοντικά και οικονομικά βιώσιμες. Η έννοια των "αποβλήτων" δεν υπάρχει στα φυσικά συστήματα. Οι φυσικοί βιογεωχημικοί κύκλοι εξασφαλίζουν συνεχή ροή χημικών ουσιών και οι αποσυνθετικοί παράγοντες μετατρέπουν την απέκκριση σε θρεπτικά συστατικά, τα οποία με τη σειρά τους, επαναχρησιμοποιούνται πλήρως από άλλους οργανισμούς (*Hadjibiros*, 2007). Πριν από την

βιομηχανική εποχή, οι ανθρώπινες κοινωνίες χρησιμοποιούσαν τα περισσότερα απορρίμματα ως λιπάσματα. Η ρύπανση των αποβλήτων είναι εγγενώς συνδεδεμένη με τη βιομηχανική παραγωγή και συνεπώς είναι υπεύθυνη για τα περισσότερα περιβαλλοντικά προβλήματα στον σύγχρονο κόσμο. Σήμερα που δεν ζούμε σε μια μεταβιομηχανική κοινωνία, θα έπρεπε να χρησιμοποιηθεί ευρέως όλη αυτή η τεχνολογία για την άμβλυνση των περιβαλλοντικών προβλημάτων με στόχο την ελαχιστοποίηση ή ακόμα καλύτερα την σταδιακή κατάργηση της διάθεσης των αποβλήτων, χρησιμοποιώντας μεθόδους πρόληψης της ρύπανσης (Κούγκολος, 2007).



Εικόνα 1.1: Κορεσμός ΧΥΤΑ Φυλής (Βιδάλη, 2011).

Οι εκπομπές μηδενικών αποβλήτων και, γενικά η έννοια της μηδενικής σπατάλης, προωθούνται ιδιαίτερα από την Ευρωπαϊκή Ένωση (ΕΕ) μέσω της εφαρμογής μιας προηγμένης περιβαλλοντικής πολιτικής και σχετικής νομοθεσίας (Μασλουμίδα, 2013). Μια τεχνολογική προοπτική στις μέρες μας είναι η πλήρης "αξιοποίηση" των αποβλήτων μέσω της μετατροπής τους σε χρήσιμες πρώτες ύλες ή ενέργεια. Στην περίπτωση υγρών αποβλήτων (Steinfeld & Del Porto, 2007), η σύγχρονη τεχνολογία έχει παράσχει αποδεκτές λύσεις προκειμένου να ενσωματωθούν στον φυσικό κύκλο του νερού. Αυτός ο τύπος λύσης δεν απαιτεί την ενεργό συμμετοχή των πολιτών, εκτός από τις χρηματικές συνεισφορές υπό μορφή φόρων ή εισφορών, για την κάλυψη του κόστους της κατασκευής και λειτουργίας τέτοιων εγκαταστάσεων.

Στην περίπτωση των ΑΣΑ, οι τεχνολογικές λύσεις είναι λιγότερες κυρίως λόγω της μεγάλης ποικιλομορφίας των αποβλήτων. Η ιδανική τεχνολογική λύση για το πρόβλημα των ΑΣΑ θα ήταν η χρήση ενός "τέλειου ρομπότ" που θα ήταν αποτελεσματικό και θα έκανε ακριβή διαλογή στα μικτά ΑΣΑ σε πολυάριθμες κατηγορίες, ώστε να επιτρέψει την τελική αξιοποίησή τους χωρίς να απομένουν άχρηστα απορρίμματα. Ωστόσο, η έλλειψη αυτής της ώριμης τεχνολογίας (Haferkamp et al., 1997) και η ενεργός συμμετοχή των πολιτών είναι απαραίτητες για την εξασφάλιση της

αξιοποίησης των ΑΣΑ. Η αποτελεσματική ανάκτηση υλικών είναι δυνατή μόνο εάν πραγματοποιηθεί αποτελεσματική διαλογή στην πηγή (Hadjibiros et al., 2011).

1.2 Η βάση της νομοθεσίας σήμερα για την διαχείριση των αποβλήτων

Η διαχείριση των ΑΣΑ είναι σήμερα ένα δύσκολο και πολύπλοκο ζήτημα, κυρίως για τους εξής λόγους:

- Η συλλογή και η διάθεση των ΑΣΑ είναι ένα σημαντικό θέμα γιατί σχετίζεται με την ανθρώπινη υγεία, την ποιότητα του περιβάλλοντος, την αισθητική του φυσικού και αστικού τοπίου, κ.α.
- Η ενόχληση - η σημασία της οποίας είναι συχνά υποκειμενική – που προκαλείται από τη μεταφορά των ΑΣΑ στα οχήματα συλλογής, τις οσμές, το θέαμα των χώρων ταφής, τα αρνητικά συναισθήματα από κατοίκους γειτονικών περιοχών σε μια εγκατάσταση συλλογής αστικών απορριμμάτων, την ανησυχία για τους πιθανούς κινδύνους για τη δημόσια υγεία, δημιουργούν δικαιολογημένα μια αρνητική κοινωνική στάση έναντι στην επεξεργασία και υγειονομική ταφή των αστικών απορριμμάτων (Εικόνα 1.2).



Εικόνα 1.2: Αντιδράσεις για τον ΧΥΤΑ Λευκίμμης (Ενημέρωση, 2016).

Η ταξινόμηση των απορριμμάτων και η ανάκτηση ενέργειας με συγκεκριμένους στόχους γίνεται όλο και περισσότερο αυστηρά τις τελευταίες δεκαετίες στη νομοθεσία. Ο πρωταρχικός στόχος είναι να επιτευχθεί η μέγιστη ανάκτηση των πρώτων υλών μέσω της διαλογής των ΑΣΑ στην πηγή και στη συνέχεια η ανακύκλωση αυτών και σε συνδυασμό με την κομποστοποίηση του

ζυμώσιμου κλάσματος των ΑΣΑ, έτσι ώστε να διατίθεται μόνο ένα μικρό κλάσμα "αδρανούς" υπολείμματος σε χώρους υγειονομικής ταφής. Ο δευτερεύων στόχος είναι η διαλογή και η ανάκτηση στην πηγή, συγκεκριμένων αποβλήτων (π.χ., μέταλλο, γυαλί, χαρτί υψηλής ποιότητας), προκειμένου να επιτευχθεί μια αποτελεσματική ανάκτηση ενέργειας, έτσι ώστε οι στάχτες αποβλήτων να διαχειρίζονται κατάλληλα και στη συνέχεια να διατίθενται σε χώρους υγειονομικής ταφής.

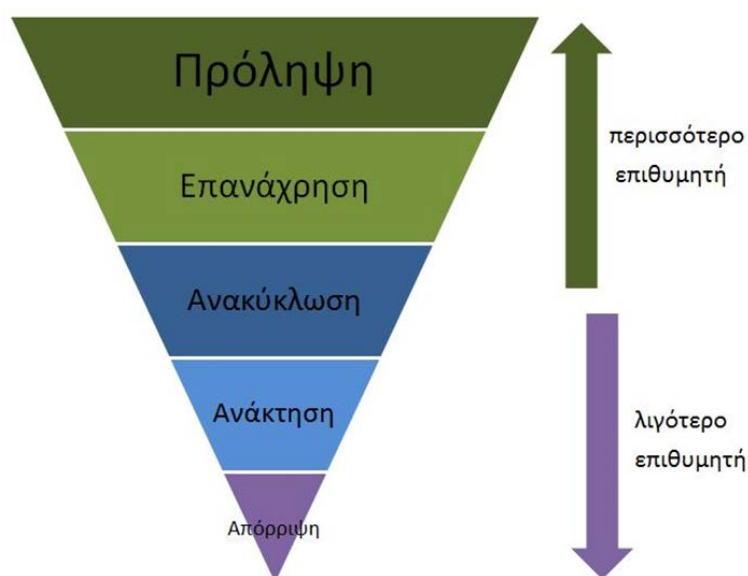
Βασικοί στόχοι στη διαχείριση των αποβλήτων είναι:

- Η μέγιστη ανάκτηση και βέλτιστη επαναχρησιμοποίηση των αποβλήτων, με αντίστοιχη ελαχιστοποίηση της υγειονομικής ταφής και εφαρμογή της αρχής "ο ρυπαίνων πληρώνει".
- Η υποχρεωτική επεξεργασία του οργανικού κλάσματος (χαρτοπολτού και χαρτιού) που αποσκοπεί σε σταδιακή ελαχιστοποίηση, μέχρι την πλήρη εξάλειψη, του οργανικού κλάσματος που τίθεται σε υγειονομική ταφή.
- Η ελαχιστοποίηση τόσο της ποσότητας όσο και του επικίνδυνου περιεχομένου των ΑΣΑ στην πηγή. Η ποσότητα των ΑΣΑ πρέπει να ελαχιστοποιείται με μέτρα διατήρησης και επαναχρησιμοποίησης, ενώ ο κίνδυνος πρέπει να ελαχιστοποιηθεί με μέτρα πρόληψης της ρύπανσης ή έγκαιρο διαχωρισμό των τοξικών ή μολυσματικών αποβλήτων.

1.2.1 Διαχείριση αποβλήτων με βάση τη νομοθεσία από Ευρωπαϊκή Ένωση

Με βάση τη νομοθεσία από την Ευρωπαϊκή Ένωση η διαχείριση των αποβλήτων ιεραρχείται με βάση την Εικόνα 1.3. Η βασική λογική της στρατηγικής είναι ότι τα απορρίμματα δεν αποτελούν ένα άχρηστο βάρος αλλά έναν πολύτιμο πόρο που, αν αξιοποιηθεί σωστά, μπορεί να έχει πολλαπλά οφέλη. Αυτός είναι ο λόγος που η απόρριψή τους σε χώρους υγειονομικής ταφής πρέπει να είναι η τελευταία διαθέσιμη επιλογή. Από την άλλη πλευρά, κάθε επεξεργασία των αποβλήτων, όσο περιβαλλοντικά φιλική και αν είναι, καταναλώνει ενέργεια και πόρους, καταλήγοντας στο ότι η πρόληψη από την παραγωγή αποβλήτων δίνει τα περισσότερα πλεονεκτήματα. Η κεντρική ιδέα αυτής της θεώρησης είναι ότι το καλύτερο απόβλητο είναι αυτό που δεν παράγεται ποτέ. Η πρόληψη παραγωγής αποβλήτων γίνεται ολοένα και πιο σημαντική στον σχεδιασμό της πολιτικής διαχείρισης αποβλήτων. Ένα βασικό εργαλείο είναι ο οικολογικός σχεδιασμός των προϊόντων ώστε να χρησιμοποιούνται ανακυκλωμένες πρώτες ύλες και η εκπαίδευση των καταναλωτών στην αγορά προϊόντων με λιγότερη συσκευασία.

Παραδείγματα πρόληψης είναι η κομποστοποίηση υλικών κουζίνας, η αποφυγή λήψης ανεπιθύμητης αλληλογραφίας, κ.α. Η επανάχρηση περιλαμβάνει την επαναλαμβανόμενη χρήση προϊόντων και συστατικών. Η επανάχρηση επίπλων και ρούχων που σε άλλες περιπτώσεις θα απορρίπτονταν έχει οικονομικά και κοινωνικά οφέλη (πέρα από τα περιβαλλοντικά) καθώς δημιουργεί θέσεις εργασίας και προσφέρει αγαθά σε πολίτες που δεν έχουν την οικονομική δυνατότητα να τα αγοράσουν. Παραδείγματα επανάχρησης είναι το γέμισμα των μελανοδοχείων εκτυπωτών, η επισκευή ηλεκτρονικού εξοπλισμού, η μεταποίηση παλιών ρούχων, η ανακαίνιση επίπλων, κ.α. Τα περισσότερα από τα απορρίμματα που πετάμε ανακυκλώνονται. Σήμερα στην Ελλάδα υπάρχουν συνολικά 22 συστήματα εναλλακτικής διαχείρισης και ανακύκλωσης για ένα μεγάλο εύρος προϊόντων. Με την ανακύκλωση εξοικονομούνται πολύτιμες πρώτες ύλες συχνά με μεγάλο οικονομικό και περιβαλλοντικό κόστος. Η ανακύκλωση απαιτεί την ευθύνη του παραγωγού για το προϊόν που παράγει αλλά και την υπευθυνότητα του πολίτη για το διαχωρισμό των αποβλήτων και την απόρριψή/παράδοσή τους στους αντίστοιχους κάδους/αποδέκτες ανάλογα με το είδος τους (Εικόνα 1.3).

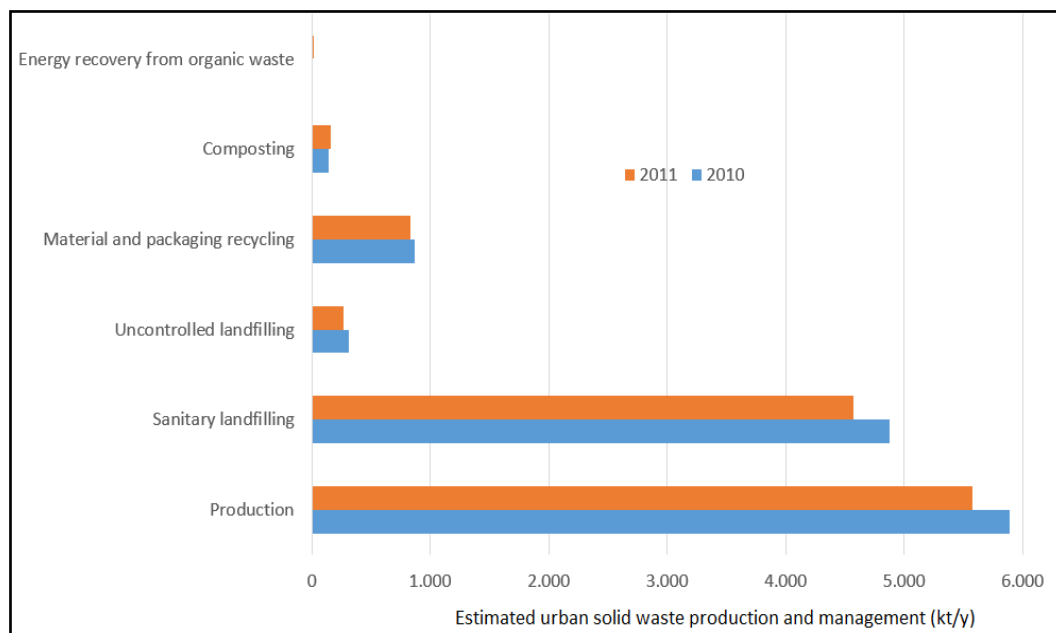


Εικόνα 1.3: Πυραμίδα διαχείρισης αποβλήτων αποτυπώνεται στην Θεματική Στρατηγική της Ε.Ε. για την Πρόληψη και την Ανακύκλωση των Αποβλήτων και έχει μεταφερθεί στην εθνική νομοθεσία με τον νόμο 4042/2012β(Ε.Ο.ΝΑ.,2018).

Το 2015 υπήρξε μία επιτυχημένη χρονιά καθώς, παρά τις δυσκολίες της οικονομικής συγκυρίας για τη χώρα μας, η Ελληνική Εταιρεία Αξιοποίησης Ανακύκλωσης (ΕΕΑΑ) όχι μόνο συνέχισε τη δυναμική της πορεία αλλά πρώτη φορά μετά το 2009, σημειώθηκε αύξηση κατά 10% των συνολικών ποσοτήτων των υλικών συσκευασίας που ανακυκλώθηκαν, παρόλο που τα απορρίμματα συσκευασίας στη χώρα μειώθηκαν ακόμα μια χρονιά κυρίως εξαιτίας της πτωτικής

πορείας της κατανάλωσης (Ελληνική Εταιρεία Αξιοποίησης Ανακύκλωσης ΕΕΑΑ, ετήσια έκθεση 2015). Η ανάκτηση αφορά κυρίως την αποτέφρωση των αποβλήτων για την παραγωγή ηλεκτρισμού, ατμού και θέρμανσης για οικιακή χρήση. Η διαδικασία αυτή, αν δεν γίνει σωστά, εγκυμονεί κινδύνους για την ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον και για αυτό πρέπει να τηρούνται συγκεκριμένες προδιαγραφές ασφαλείας. Η αποτέφρωση αποβλήτων για την ανάκτηση ενέργειας είναι χαμηλά στις προτεραιότητες για τη διαχείριση των αποβλήτων, γι' αυτό τα κράτη-μέλη της Ε.Ε. προτρέπονται να χρησιμοποιούν πρακτικές ανώτερες στην ιεραρχία διαχείρισης αποβλήτων. Ενδεικτικά, παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 1.1 η παραγωγή και ο τρόπος διαχείρισης των ΑΣΑ στην Ελλάδα (kg/y) για το 2010 και 2011.

Η απόρριψη σε χώρους υγειονομικής ταφής είναι η τελευταία λύση στην ιεραρχία διαχείρισης των αποβλήτων. Από την ταφή τους παράγεται το μεθάνιο, ένα πανίσχυρο αέριο του θερμοκηπίου. Η αποσύνθεση των αποβλήτων απελευθερώνει επικίνδυνες χημικές ουσίες που μπορούν να ρυπάνουν έδαφος και νερό. Υπολογίζεται ότι ένας ΧΥΤΑ μπορεί να ρυπάνει κάθε μέρα, την ποσότητα πόσιμου νερού που καταναλώνει ένα μέσο νοικοκυριό κάθε χρόνο. Με οικονομικούς όρους, η αξία των υλικών που απορρίπτεται στους ΧΥΤΑ της Ευρώπης κάθε χρόνο υπολογίζεται σε 5,25 δισ. ευρώ (European Commission).



Διάγραμμα 1.1: Παραγωγή-Διαχείριση ΑΣΑ (kg/y) στην Ελλάδα για τα έτη 2010-2011 (Perkoulidis, 2015).

1.3 Σύσταση Αστικών Στερεών Αποβλήτων

Η ποιοτική ανάλυσή των ΑΣΑ συμβάλλει στον προσδιορισμό των βασικών ποσοστιαίων

κατηγοριών σε αυτά, έτσι ώστε να προσδιορισθεί η απαραίτητη πληροφορία για την κατάρτιση σχεδίων διαχείρισης, επεξεργασίας, αποθήκευσης και διάθεσης αυτών. Σύμφωνα με τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό Περιβάλλοντος (*European Environment Agency - EEA*) στα ΑΣΑ περιλαμβάνονται τα οικιακά απορρίμματα, που αποτελούν τον κύριο όγκο των αστικών στερεών αποβλήτων καθώς και απορρίμματα από άλλες δραστηριότητες, που όμως λόγω της φύσης ή της σύνθεσής τους προσομοιάζουν με τα οικιακά. Άλλες πηγές προέλευσης των ΑΣΑ αποτελούν οι δημόσιες υπηρεσίες και ιδρύματα (σχολεία, κυβερνητικά κτίρια κλπ.), οι εμπορικές, οι τουριστικές και άλλες συναφείς επιχειρήσεις (κτίρια γραφείων, εμπορικά καταστήματα, χώροι συνεστιάσεων, ξενοδοχεία, κλπ). Στην κατηγορία αυτή συμπεριλαμβάνονται και τα απορρίμματα που προέρχονται από δραστηριότητες διαφορετικού χαρακτήρα, αλλά προσομοιάζουν με τα οικιακά, όπως ένα τμήμα των νοσοκομειακών αποβλήτων και των αποβλήτων της βιομηχανίας. Σημαντικό μέρος των ΑΣΑ αποτελούν τα υλικά συσκευασίας που έχουν ιδιαίτερη σημασία λόγω των επιμέρους στόχων αξιοποίησης που θέτει το θεσμικό πλαίσιο για τα απορρίμματα (βλ. Ν. 2939/2001). Στα ΑΣΑ περιλαμβάνονται επίσης τα ογκώδη απορρίμματα (στρώματα, έπιπλα κ.ά.), απορρίμματα κήπων (φύλλα, κλαδιά, κηπευτικά) καθώς και απορρίμματα από καθαρισμό των δρόμων.

Συγκεκριμένα στα αστικά απορρίμματα που διαχειρίζονται οι φορείς αποκομιδής περιλαμβάνονται:

- Κατάλοιπα κάθε φύσης, όπως οικιακά απορρίμματα, φύλλα, σκουπίσματα, χαρτιά που τοποθετούνται μέσα στις πλαστικές σακούλες.
- Απορρίμματα από εμπορικές εγκαταστάσεις και βιοτεχνίες, κτίρια γραφείων που τοποθετούνται επίσης σε σακούλες ή κάδους όπως τα οικιακά.
- Κοπριές, αφυδατωμένες ιλύες, προϊόντα από καθαρισμούς δρόμων και δημοσίων χώρων, που συγκεντρώνονται σε μεγάλα δοχεία για την αποκομιδή τους.
- Κατάλοιπα από χώρους εκθέσεων, αγορές, εορτές, κλπ.
- Απορρίμματα από σχολεία, στρατιωτικές εγκαταστάσεις, νοσοκομεία (πλην των μολυσματικών) που συγκεντρώνονται σε ειδικούς χώρους.
- Ογκώδη αντικείμενα (δεν περιλαμβάνονται στα αστικά απορρίμματα).
- Αδρανή και κατάλοιπα δημοσίων έργων.
- Βιομηχανικές στάχτες, σκουριές, μολυσματικά νοσοκομείων, υπολείμματα σφαγείων.
- Πολύ ογκώδη αντικείμενα που απαιτούν ειδικό τρόπο μεταφοράς.

Σύμφωνα με την *N.W.M.P. (National Waste Management Planning)* τα στατιστικά στοιχεία

σχετικά με τη παραγωγή απόβλητων κατά το 2011 στην Ελλάδα ήταν:

- ΑΣΑ: 5.575.000 τόνοι (εκ των οποίων 6.500 τόνοι ήταν επικίνδυνα απορρίμματα, 2.470.000 τόνοι ήταν βιολογικά απορρίμματα, 866.000 τόνοι ήταν απορρίμματα συσκευασιών και 1.860.000 τόνοι ήταν άλλα ανακυκλώσιμα υλικά).
- Λάσπη από αστικά απορρίμματα: 174.000 τόνοι.
- Βιομηχανικά απορρίμματα και απορρίμματα από άλλες δραστηριότητες: 17.459.000 τόνοι απορρίμματα κατασκευών και κατεδαφίσεων (CDW): 1.307.000 τόνοι και γεωργικά/ζωικά απορρίμματα: 10.781.000 τόνοι.

Σε μία πιο πρόσφατη μελέτη μπορούμε να δούμε την αντίστοιχη χρονική εξέλιξη στις ΗΠΑ. Η κυρίαρχη κατηγορία αποβλήτων το 2014 και στις αρχές του 2015 ήταν τα πλαστικά με μέσο όρο 20% και 24% των συνολικών αποβλήτων, αντίστοιχα. Το υψηλό ποσοστό πλαστικών απορριμμάτων μπορεί να αποδοθεί στην ευρεία χρήση υλικών συσκευασίας. Εξάλλου, το 2002, η ανακύκλωση και η ανάκτηση αποβλήτων, όπως χαρτόνι, χαρτιά, πλαστικά, μέταλλα και γυαλί, ήταν περίπου 42%. Ενώ, λόγω της αλλαγής του τρόπου ζωής, η παραγωγή αυτών των αποβλήτων αυξήθηκε σημαντικά σε 55 και 56% στις αρχές του 2015, αντίστοιχα. Ως εκ τούτου, ο διαχωρισμός και η συλλογή τέτοιων υλικών μπορεί να εξεταστεί για μια αποτελεσματική διαχείριση των ΑΣΑ.

1.4 Παραγωγή αστικών στερεών αποβλήτων

1.4.1. Παραγωγή αστικών στερεών αποβλήτων σε χώρες της Ευρώπης

Σύμφωνα με τη Ρόκκου (2010) το 2002, η παραγωγή ΑΣΑ ήταν κατά μέσο όρο 0,6 – 0,8 κιλά/άτομο/ημέρα στα χωριά που ο πληθυσμός τους είναι μικρότερος των 2.000 κατοίκων, ενώ στις περιοχές με πληθυσμό έως 100.000 κατοίκους, η παραγωγή αποβλήτων ήταν κατά μέσο όρο 0,8 – 1,2 κιλά/άτομο/ημέρα. Στην Ευρωπαϊκή Ένωση (Ε.Ε.), οι παραγόμενες κατ' άτομο ποσότητες ΑΣΑ διαφοροποιούνται σημαντικά ανάμεσα στα Κράτη-Μέλη και γενικότερα στα διάφορα κράτη (Πίνακας 1.1).

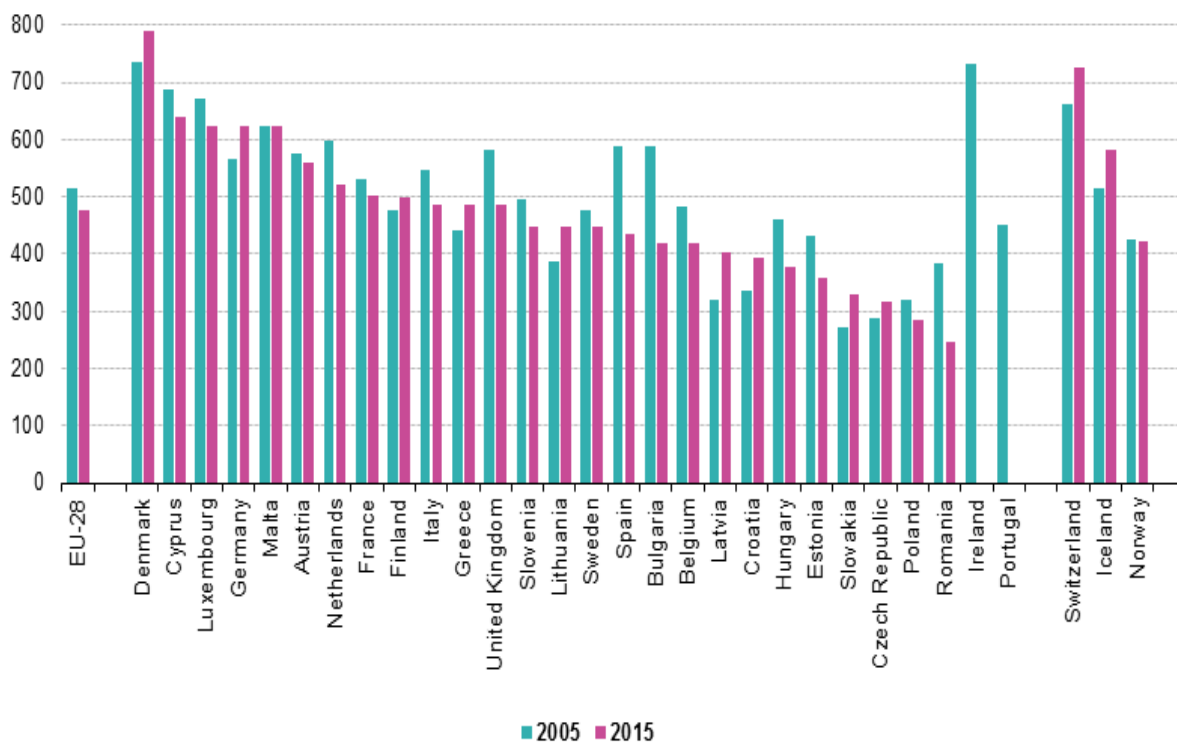
ΠΕΡΙΟΧΗ	gr /άτομο/ημέρα
Χώρες με πολύ χαμηλό εισόδημα (π.χ., Αιθιοπία, Ινδία)	400
Αναπτυσσόμενα Κράτη (π.χ., Αίγυπτος, Βραζιλία)	700
Βιομηχανικά αναπτυγμένα κράτη	1100
Πλούσια κράτη (π.χ., Ελβετία)	2500
Ελλάδα	800 -1000

Πίνακας 1.1: Παραγωγή ΑΣΑ gr/άτομο/ημέρα (Βορνιωτάκη,2012).

Πιο συγκεκριμένα, αν εξετάσουμε κάποια παραδείγματα από χώρες της Ευρώπης, μπορούμε να συγκρίνουμε τη σύσταση των ΑΣΑ σε διάφορες χρονολογίες και τη διαφορά αυτών. Η παραγωγή Α.Σ.Α. στην Ε.Ε. το 2001 ήταν κατά 87% μεγαλύτερη περίπου από εκείνη του 1985 (Ε.Ο.Π., 2002). Σύμφωνα με έκθεση του Ο.Ο.Σ.Α., η μέση ετήσια παραγωγή ΑΣΑ στη διευρυμένη Ε.Ε. των 27 Κρατών-Μελών ήταν, το 2006, 517 κιλά/κάτοικο, (OECD, 2006). Το 2010 η συνολική δημιουργία αποβλήτων στην Ε.Ε ανήλθε σε 2,50 δισ. τόνους, ποσότητα που αντιστοιχεί σε πολύ μικρή αύξηση κατά 0,3 % ή 8 εκατ. τόνους (Ευρωπαϊκή Επιτροπή, 2014).

Σύμφωνα με τα επίσημα στοιχεία της Eurostat για το 2013, η ποσότητα των παραγόμενων αποβλήτων ανά κάτοικο ετησίως ήταν για την Γερμανία 617 kg, για την Ιταλία 491 kg, για την Κύπρο 624 kg, ενώ για την Ελλάδα ήταν 506 kg και γενικά για την Ευρώπη 481 kg. Το 2015 ανήλθε στα 477 Kg/ ετησίως ανά άτομο. Οι ευρωπαϊκές χώρες με τη χαμηλότερη παραγωγή ανά κάτοικο είναι η Εσθονία και η Ρουμανία με παραγωγή 293 και 272 kg αντίστοιχα (D-WASTE ΕΛΛΑΣ, 2016). Ενώ, η μικρότερη ετήσια παραγωγή ΑΣΑ κυμαινόταν, το 2001, από 220 κιλά/κάτοικο για την Πολωνία, και η μεγαλύτερη σε 960 κιλά/κάτοικο για την Ισλανδία, με μέσο όρο για την Ε.Ε. των 15 κρατών-μελών, τα 560 κιλά/κάτοικο (Λάλας κ.ά., 2007).

Στο Διάγραμμα 1.2 γίνεται σύγκριση στη παραγωγή ΑΣΑ ανά κάτοικο σε χώρες της ΕΕ για το 2005/2015 όπου παρατηρείται διαφορά από χώρα σε χώρα και διαφορά στην παραγωγή των ΑΣΑ/κάτοικο/χώρα.



Διάγραμμα 1.2: Σύγκριση παραγωγής ΑΣΑ ανά κάτοικο σε χώρες της ΕΕ για τα έτη 2005-2015 (Eurostat, 2018).

	1995	2000	2005	2010	2015	change (%) 1995-2015
EU-28	:	521	515	504	476	:
EU-27	473	523	517	505	476	1
Belgium	455	471	482	456	418	-8
Bulgaria	694	612	588	554	419	-40
Czech Republic	302	335	289	318	316	5
Denmark	521	664	736	:	789	52
Germany	623	642	565	602	625	0
Estonia	371	453	433	305	359	-3
Ireland	512	599	731	624	:	:
Greece	303	412	442	532	485	60
Spain	505	653	588	510	434	-14
France	475	514	530	533	501	5
Croatia	:	262	336	379	393	:
Italy	454	509	546	547	486	7
Cyprus	595	628	688	689	638	7
Latvia	264	271	320	324	404	53
Lithuania	426	365	387	404	448	5
Luxembourg	587	654	672	679	625	6
Hungary	460	446	461	403	377	-18
Malta	387	533	623	601	624	61
Netherlands	539	598	599	571	523	-3
Austria	437	580	575	562	560	28
Poland	285	320	319	316	286	0
Portugal	352	457	452	516	:	:
Romania	342	355	383	313	247	-28
Slovenia	596	513	494	490	449	-25
Slovakia	295	254	273	319	329	12
Finland	413	502	478	470	500	21
Sweden	386	428	477	439	447	16
United Kingdom	498	577	581	509	485	-3
Iceland	426	462	516	484	583	37
Norway	624	613	426	469	421	-33
Switzerland	600	656	661	708	725	21
Montenegro	:	:	:	:	533	:
The former Yugoslav Republic of Macedonia	:	:	:	351	:	:
Serbia	:	:	:	363	259	:
Turkey	441	465	458	407	400	-9
Bosnia and Herzegovina	:	:	:	332	:	:
Kosovo*	:	:	:	:	178	:

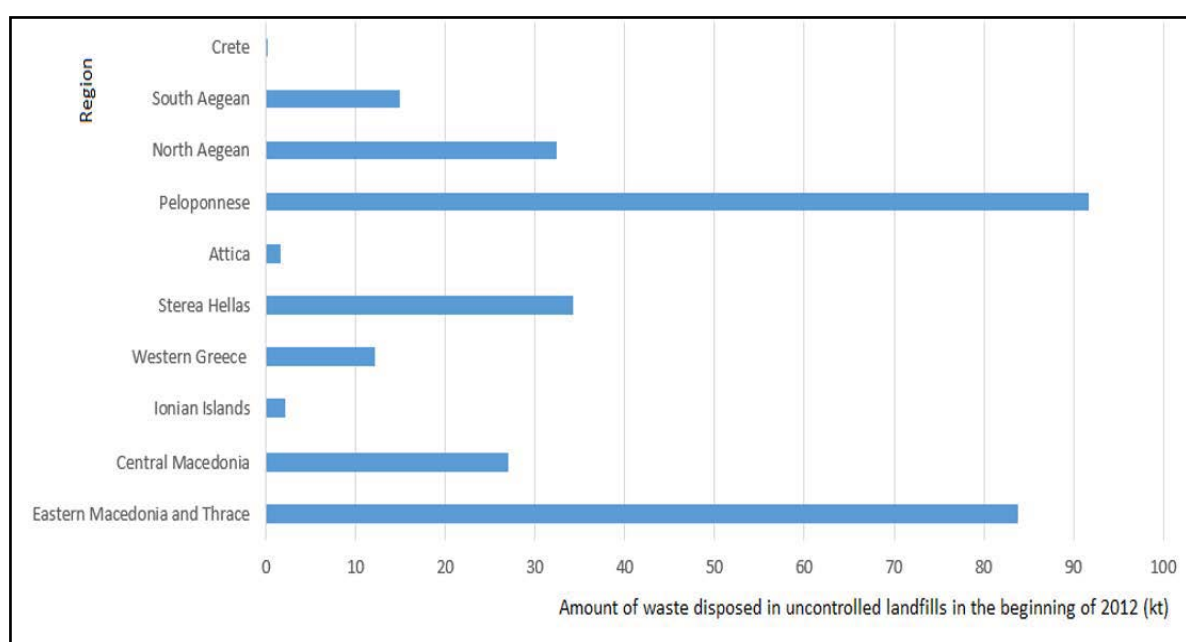
(:) not available

Πίνακας 1.2: Παραγωγή αποβλήτων ανά κάτοικο στις χώρες της Ευρώπης για συγκεκριμένες χρονικές στιγμές και η διακύμανση μέσα στα έτη (Eurostat 2018).

Στον Πίνακα 1.2 διακρίνονται πιο έντονα οι διαφορές στην παραγωγή των ΑΣΑ/κάτοικο σε χώρες της Ευρώπης από 1995 έως και το 2015. Στην τελευταία στήλη βλέπουμε την ποσοστιαία διαφορά, όπου στην Ελλάδα έχουμε μια αύξηση της τάξης του 60%.

1.4.2 Παραγωγή αστικών στερεών αποβλήτων στην Ελλάδα

Οι κατ' άτομο παραγόμενες ποσότητες ΑΣΑ διαφοροποιούνται ανάλογα με το βιοτικό επίπεδο και τις διατροφικές συνήθειες του πληθυσμού, τη συχνότητα συλλογής των απορριμμάτων, την ανάπτυξη προγραμμάτων ανακύκλωσης κ.ά. (ΤΕΕ, 2010). Στην Ελλάδα, η μέση ετήσια παραγωγή Α.Σ.Α. ανερχόταν, το 1997, σε 354 κιλά/κάτοικο, ενώ το 2001 σε 416 κιλά/κάτοικο (αύξηση 17,5%) (Ε.Ε.Δ.Σ.Α., 2009). Ο μέσος συντελεστής παραγωγής απορριμμάτων, σύμφωνα με τα επίσημα στοιχεία της *Eurostat*, το 2009, ήταν 458 κιλά/κάτοικο. Παρακάτω παρουσιάζεται αναλυτικά η παραγωγή ΑΣΑ για το 2012 ανά περιοχή στην Ελλάδα (Διάγραμμα 1.3).



Διάγραμμα 1.3: Παράγωγή ΑΣΑ ανά κάτοικο σε περιοχές στην Ελλάδα για το 2012 (Ammari, 2012).

Οι κοινωνικές και οικονομικές συνθήκες καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό την ποσότητα των παραγόμενων στερεών αποβλήτων ανά κάτοικο. Σημαντικοί παράγοντες που επηρεάζουν την παραγωγή ΑΣΑ είναι: το κατά κεφαλήν Ακαθάριστο Εθνικό Προϊόν (Α.Ε.Π.), το μέγεθος του νοικοκυριού, η απασχόληση ανά τομέα (υπηρεσίες, βιομηχανία, γεωργία, κλπ.) και ο γενικότερος χαρακτήρας της περιοχής (αστική, γεωργική, ορεινή, κλπ.). Αυτό αποδεικνύεται από τις διαφορές στους ρυθμούς παραγωγής ΑΣΑ στις πόλεις της Δυτικής Ευρώπης, σε σχέση με τις πόλεις Ανατολικής Ευρώπης. Για παράδειγμα, μια σύγκριση των οικονομικών τομέων το έτος 2000, δείχνει ότι οι μεγαλύτερες πόλεις της ΕΕ των 15 κρατών-μελών χαρακτηρίζονταν από κατά πολύ υψηλότερους ρυθμούς παραγωγής ΑΣΑ (510 Kg/κάτοικο/έτος), από ότι οι πόλεις της κεντρικής και ανατολικής Ευρώπης (354 Kg/κάτοικο/έτος) (Τσιλέμου και Παναγιωτακόπουλος, 2005).

1.5 Χώροι υγειονομικής ταφής απορριμμάτων

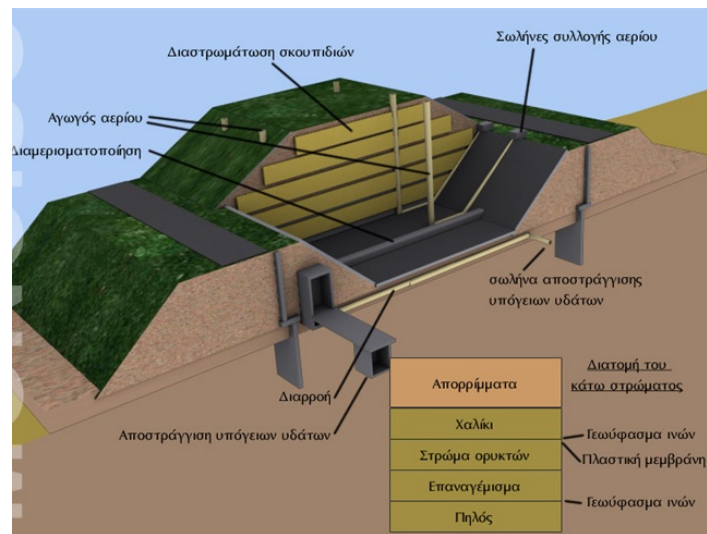
Η τελική διάθεση των απορριμμάτων γίνεται με την κατόρυξή τους στους Χώρους Υγειονομικής Ταφής Απορριμμάτων (ΧΥΤΑ) ή Υπολείμμάτων (ΧΥΤΥ). Η υγειονομική ταφή είναι μια μέθοδος η οποία χρησιμοποιείται σε οποιονδήποτε συνδυασμό μεθόδων εναλλακτικής διαχείρισης, αφού εκτός από τα συνήθη απορρίμματα (οικιακά απορρίμματα, μπάζα, τέφρες και σκουριές, σταθεροποιημένες και αφυδατωμένες ιλύες) (Κούγκολος, 2007) στους ΧΥΤΑ καταλήγουν και τα υπολείμματα άλλων μεθόδων επεξεργασίας, π.χ., της καύσης και λιπασματοποίησης (Παναγιωτακόπουλος, 2002).

Οι χώροι διάθεσης απορριμμάτων χωρίζονται σε δύο κύριες ομάδες. Σε χώρους διάθεσης επικίνδυνων και μη επικίνδυνων ή εναλλακτικά αστικών απορριμμάτων. Ο λόγος είναι τα διαφορετικά μέτρα πρόληψης και προστασίας του περιβάλλοντος, που υιοθετούνται σε κάθε περίπτωση, εξ αιτίας της φύσης των απορριμμάτων. Τα επικίνδυνα απορρίμματα απομονώνονται και τοποθετούνται σε ξεχωριστούς χώρους, ώστε να αποφευχθεί το ενδεχόμενο της μεταξύ τους αντίδρασης, με τις όποιες συνέπειες συνεπάγεται. Παράλληλα υπάρχουν και ειδικοί χώροι διάθεσης, όπως για τα θρυμματισμένα απορρίμματα, για την παραγωγή της μέγιστης δυνατής ποσότητας αερίων και για τα υπολείμματα της διαδικασίας βιοαποικοδόμησης, όπου οι διαδικασίες ανάπτυξης του χώρου διαφοροποιούνται αρκετά. Επομένως, η υγειονομική ταφή αποτελεί μια πλήρη μέθοδο διαχείρισης που προϋποθέτει την εφαρμογή μιας σειράς επιστημονικών, τεχνικών και οικονομικών αρχών.

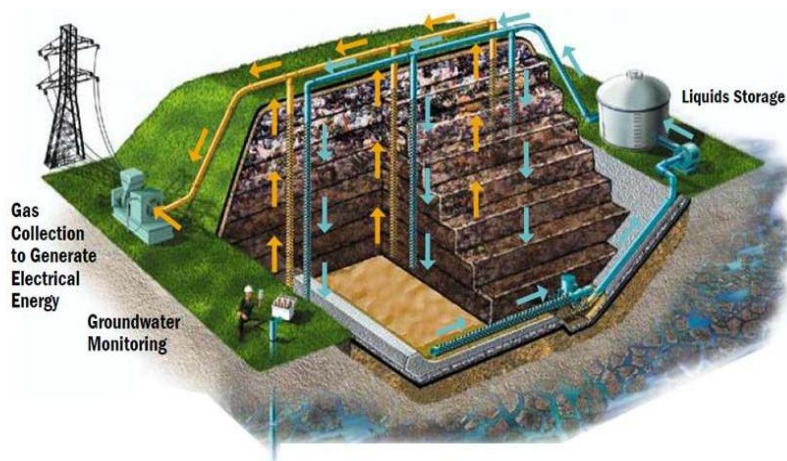
Επίσης, είναι μια μέθοδος που απαιτεί σχετικά απλή τεχνολογία και χαμηλή δαπάνη λειτουργίας, ενώ ο χώρος μετά το πέρας του χρόνου ζωής του και την αποκατάστασή του δίνει τη δυνατότητα για άλλου είδους χρήση (π.χ., ανάπτυξη βλάστησης για πάρκα, κ.τ.λ.). Ωστόσο, η κατόρυξη των απορριμμάτων είναι θεμιτό να γίνεται αφού αυτά έχουν υποστεί την επεξεργασία με εναλλακτικές μεθόδους, αφενός ώστε να μειωθεί ο όγκος των απορριμμάτων προς τελική διάθεση και αφετέρου, επειδή τα αδρανοποιημένα με αυτόν τον τρόπο υπολείμματα επιφέρουν αρκετά μειωμένες περιβαλλοντικές επιπτώσεις (*Hadjibiros et al.*, 2011).

Κατά την κατόρυξή τους τα απορρίμματα αποτίθενται σε διαδοχικές στρώσεις 2 – 3 μέτρων, στις οποίες καθημερινά μετά τη συμπίεσή τους παρεμβάλλονται στρώσεις κάλυψής τους από χώμα ώστε να αποφευχθούν η έκλυση οσμών αλλά και η έλξη τρωκτικών κ.τ.λ. Η επιφάνεια του πυθμένα των ΧΥΤΑ είναι από αργιλικά υλικά αλλά και επιπρόσθετη στρώση γεωυφάσματος ώστε να είναι αδιαπέραστη και να προστατεύεται ο υδροφόρος ορίζοντας από τη μόλυνση από τα διασταλάζοντα υγρά των απορριμμάτων (Κούγκολος, 2007), τα οποία συλλέγονται με σωλήνες και οδηγούνται είτε προς εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων, είτε επιστρέφουν στο χώρο

κατόρυξης με σκοπό την αύξηση της υγρασίας των απορριμμάτων.



Εικόνα 1.4: Διατομή ΧΥΤΑ (Monoiso, 2018).



Εικόνα 1.5 : Η λειτουργία ενός ΧΥΤΑ (Πηλίδης, 2013).

Πριν ή κατά τη διάρκεια της διαδικασίας διάθεσης, τα απορρίμματα είναι δυνατόν να υφίστανται συμπίεση ή λεπτό τεμαχισμό ώστε να μειωθεί ο όγκος τους (Κούγκολος, 2007). Από τη διαδικασία της κατόρυξης παράγεται βιοαέριο το οποίο συλλέγεται και οδηγείται προς καύση και σε πολλούς ΧΥΤΑ χρησιμοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ή ζεστού νερού (Κούγκολος, 2007). Η διαδικασία σταθεροποίησης των απορριμμάτων στους ΧΥΤΑ μπορεί να είναι αερόβια ή αναερόβια. Σε αναερόβιο περιβάλλον η σταθεροποίηση λαμβάνει χώρα με πιο αργούς ρυθμούς, καθώς ταυτόχρονα παράγεται μεθάνιο και τοξικά στραγγίσματα, ενώ υπό αερόβιες συνθήκες, με την παροχή των κατάλληλων αναλογιών αέρα και υγρασίας, ο ρυθμός σταθεροποίησης αυξάνεται, η παραγωγή μεθανίου μειώνεται, όπως επίσης μειώνεται η τοξικότητα των στραγγισμάτων και το επίπεδο του κινδύνου μόλυνσης του υδροφόρου ορίζοντα.

Επίσης, υπό αερόβιες συνθήκες μεγάλο μέρος του οργανικού κλάσματος υφίσταται αποδοτικότερη κομποστοποίηση, ενώ μειώνεται το κόστος λειτουργίας του ΧΥΤΑ και επεκτείνεται ο χρόνος ζωής του, αφού πραγματοποιείται μεγαλύτερη μείωση του όγκου των απορριμμάτων σε σχέση με την αναερόβια διαδικασία (Εικόνα 1.5).

Ο ΧΥΤΑ είναι ένας οργανωμένος μικτός χώρος διάθεσης αποβλήτων που αποτελεί βελτισμένη διάθεση ΑΣΑ σε σχέση με την ανεξέλεγκτη χωματερή, με την οποία δεν πρέπει να συγχέονται, φαινόμενο ιδιαίτερο στην Ελλάδα. Ωστόσο, η ταφή των ΑΣΑ (*Christoulas et al*, 1999) δεν αποσκοπεί στην ανάκτηση υλικών ή ενέργειας και δημιουργεί σημαντικές περιβαλλοντικές απειλές. Ένας ΧΥΤΑ παραμένει βιοχημικώς ενεργός για πολλές δεκαετίες. Υπολογίζεται γύρω στα 50 χρόνια, από τα οποία 20 χρόνια αφορούν τη λειτουργία του και 30 χρόνια την παρακολούθηση του καθώς παράγει και απελευθερώνει τοξικά υγρά ή ατμοσφαιρικούς ρύπους καθώς και αέρια του θερμοκηπίου.

Επομένως, απαιτεί μακροπρόθεσμη παρακολούθηση, συντήρηση, να ληφθεί υπόψη η πιθανότητα αστοχίας (π.χ., κάποια κατολίσθηση), συντήρηση του δικτύου σωλήνων για τη συλλογή βιοαερίου, της συλλογής των στραγγισμάτων και μείωση των πιθανοτήτων ατυχήματος που σχετίζεται με κακή κατασκευή, κακή συντήρηση ή φυσικούς κινδύνους. Επομένως, σαν κατασκευή παραβιάζει τις αρχές βιωσιμότητας μεταφέροντας στις μελλοντικές γενιές σημαντικό περιβαλλοντικό πρόβλημα.

Η παρακολούθηση ενός χώρου διάθεσης απορριμμάτων αποσκοπεί στην επιβεβαίωση της ομαλής λειτουργίας του, όπως αυτή σχεδιάστηκε από τους μηχανικούς, και της τήρησης των περιβαλλοντικών και υγειονομικών περιορισμών. Η συμπεριφορά της εγκατάστασης και το δυναμικό επικινδυνότητας προσδιορίζεται από τα διασταλάγματα, τα αέρια, την δυνατή εξάπλωσή τους στην ευρύτερη περιοχή και την ευστάθεια του χώρου. Στην Εικόνα 1.4 παρουσιάζεται χαρακτηριστικά μια διατομή ενός χώρου υγειονομικής ταφής απορριμμάτων.

Κατά κανόνα, απαιτείται ο έλεγχος του ύψους του νερού μέσα στον χώρο διάθεσης των απορριμμάτων, των υπόγειων συστημάτων απομάκρυνσης των διασταλαγμάτων, της ενδεχόμενης ρύπανσης του υπόγειου υδροφορέα, της πίεσης και των συγκεντρώσεων των αερίων τόσο μέσα στον χώρο, όσο και έξω από αυτόν και της σταθερότητας και αποτελεσματικότητας της τελικής κάλυψης του χώρου. Στη συνέχεια, δίνεται έμφαση στα κατασκευαστικά εκείνα στοιχεία τα οποία, όπως θα αναλυθεί και σε επόμενο κεφάλαιο, είναι περισσότερο εκτεθειμένα στον σεισμικό κίνδυνο.

Κατά την αποσύνθεση των απορριμμάτων εξέρχεται από τη μάζα τους μολυσμένο νερό. Αυτό το νερό των στραγγισμάτων έχει υψηλές τιμές *COD*, *BOD*, συγκεντρώσεων θρεπτικών

ουσιών, βαρέων μετάλλων και ιχνοστοιχείων. Τυχόν ανάμιξη αυτού του νερού με τα υπεδάφια αποθέματα πόσιμου νερού πρέπει να αποφεύγεται και αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση μόνωσης (Liu & Liptak, 1997). Γι' αυτό και χρησιμοποιούνται συνήθως ελαστικές υδατοστεγείς μεμβράνες σε αλληπάλληλες στρώσεις μεταξύ των απορριμμάτων. Η τοποθέτηση των μεμβρανών ρυθμίζεται με βάση τη βροχόπτωση και την τοπογραφία της περιοχής. Στην περίπτωση που το έδαφος είναι κεκλιμένο η κλίση δεν πρέπει να ξεπερνά το 5%. Σε αυτήν την περίπτωση απαιτούνται εδαφοβελτιωτικά έργα για να αποφευχθεί η διάβρωση του εδάφους από τη ροή των όμβριων υδάτων (Tchobanoglous & Kreith, 2002).

1.5.1 Στραγγίσματα

Τα πιο σημαντικά προβλήματα που σχετίζονται με την ταφή απορριμμάτων είναι η παραγωγή στραγγισμάτων (διασταλλαζόντων). Τα στραγγίσματα είναι υγρά που δημιουργούνται από την αποσύνθεση του οργανικού μέρους των απορριμμάτων και από τη διείσδυση στη μάζα τους των νερών της βροχής. Τα στραγγίσματα συνδέονται με την περιβαλλοντικά ορθή λειτουργία αυτών των χώρων, καθώς κατά την πορεία των υγρών μέσα από τη μάζα των απορριμμάτων διαλύονται και παρασύρονται διάφοροι ρύποι. Αν τα στραγγίσματα διαφύγουν στο περιβάλλον μπορούν να μολύνουν επιφανειακά και υπόγεια νερά (Εικόνα 1.6). Αποτελούν μείζον πρόβλημα κινδύνου αν δε ληφθούν προληπτικά μέτρα. Το πρόβλημα των στραγγισμάτων επιδεινώνεται από το γεγονός ότι πολλοί ΧΥΤΑ εξακολουθούν να λειτουργούν χωρίς τον κατάλληλο στεγανωτικό πυθμένα ή δε μεταβαίνουν σε αποτελεσματική συλλογή και επεξεργασία των στραγγισμάτων (Lema et al., 1988).

Οι ρυπαντές που απελευθερώνονται από τα απορρίμματα με διάφορες φυσικοχημικές και βιολογικές διαδικασίες περνούν μέσα στο νερό και το επιβαρύνουν με οργανικά και ανόργανα υλικά. Τα κυριότερα ρυπαντικά συστατικά των διασταλλαζόντων είναι: ανόργανα κατιόντα όπως ασβέστιο (Ca^{++}), μαγνήσιο (Mg^{++}), νάτριο (Na^{+}), κάλιο (K^{+}), αμμώνιο (NH_4^{+}), σίδηρος (Fe^{++}), μαγγάνιο (Mn^{++}), ανόργανα ανιόντα όπως χλωριόντα (Cl^{-}), θειικά (SO_4^{--}) και όξινα ανθρακικά (HCO_3^{-}), βαρέα μέταλλα όπως: κάδμιο (Cd), ψευδάργυρος (Zn), μόλυβδος (Pb), χαλκός (Cu), νικέλιο (Ni) και κοβάλτιο (Co), οργανικά υλικά εκφρασμένα ως BOD και COD, ειδικά οργανικά υλικά (συνήθως περιεκτικότητας μικρότερης του 0,1 mg/l) όπως αρωματικοί υδρογονάνθρακες, φαινόλες και χλωριωμένες αλειφατικές ενώσεις, διάφορα άλλα συστατικά όπως βορικά, θειούχα, αρσενικά και ελαιώδη (δευτερεύουσας σημασίας), υδράργυρος και βάριο (δευτερεύουσας σημασίας).



Εικόνα 1.6: Διαρροή σταλαγμάτων ΧΥΤΑ Ηρακλείου (ΟΠΗ,2018).

Ένα σύστημα διαχείρισης στραγγισμάτων απαρτίζεται από ένα σύστημα αποστράγγισης, ένα συλλογής και ένα επεξεργασίας. Η αποστράγγιση των στραγγισμάτων γίνεται λόγω βαρύτητας δια μέσου διόδων, οι οποίες συνίστανται από ένα διαπερατό κοκκώδες στρώμα στο οποίο περιέχονται διάτρητοι σωλήνες, που καταλήγουν σε φρεάτια συλλογής τα οποία βρίσκονται στον πυθμένα του κυττάρου. Τα στραγγίσματα που συλλέγονται στα φρεάτια είτε αντλούνται είτε κυλούν λόγω κλίσης σε περιμετρικά σημεία συλλογής.

Στη βάση του ΧΥΤΑ χρησιμοποιείται ένα δίκτυο αγωγών, φρεατίων και αντλιών για τη συλλογή των στραγγισμάτων. Ο ρυθμός παραγωγής αυτού του μολυσμένου νερού εξαρτάται από την παρουσία βροχοπτώσεων, την τοπογραφία της περιοχής απόθεσης, από τη σύνθεση του εδάφους, την παρουσία φυτικής ύλης και τη σύνθεση των απορριμμάτων. Οι αγωγοί τοποθετούνται επί ενός στρώματος χαλικιών και τυλίγονται με γεωύφασμα, ώστε να εισέρχονται στο δίκτυο τα στραγγίσματα φιλτραρισμένα από τεμαχίδια που θα μπορούσαν να βουλώσουν τους αγωγούς. Τα στραγγίσματα απαντλούνται τελικά από τον ΧΥΤΑ. Τα στραγγίσματα είτε μεταφέρονται με φορτηγά - βυτία για επεξεργασία σε μονάδα βιολογικού καθαρισμού υγρών λυμάτων είτε υφίστανται ξήρανση, οπότε το προϊόν της ξήρανσης επιστρέφεται στον ΧΥΤΑ. Αυτό γίνεται για να μειωθούν τα *BOD*, *COD* και να αυξηθεί το pH του τελικού προϊόντος, με παράλληλη μείωση της συγκέντρωσης των βαρέων μετάλλων (Liu & Liptak, 1997). Επιπλέον, με την ανακύκλωση των συμπυκνωμένων στραγγισμάτων επιτυγχάνεται επιτάχυνση της βιοαποικοδόμησης των απορριμμάτων (Tchobanoglous & Kreith, 2002).

1.5.2 Βιοαέριο

Κατά τα πρώτα στάδια της υγειονομικής ταφής όπου διατίθενται τα ανεπεξέργαστα

απορρίμματα, παράγονται μεγάλες ποσότητες αερίων, οι οποίες μπορούν να αποτελέσουν σημαντική πηγή εσόδων αφού τα παραγόμενα αέρια μπορούν να αξιοποιηθούν ως ενέργεια. Όπως έχει ήδη αναφερθεί για την κατασκευή χώρων υγειονομικής ταφής απαιτείται σύστημα συλλογής βιοαερίου για τη χρησιμοποίηση αυτού, όπου αυτό είναι δυνατόν (Εικόνα 1.7). Στην περίπτωση, όμως, που οι εκπομπές παραμένουν σε χαμηλά επίπεδα για μακρό χρονικό διάστημα, χάνεται μια σημαντική οικονομική συνεισφορά στην εγκατάσταση. Η παραγωγή αερίων από τους χώρους υγειονομικής ταφής είναι αποτέλεσμα της μικροβιακής αναερόβιας αποδόμησης του οργανικού κλάσματος των αποβλήτων που διατίθενται σε αυτούς.

Τα βιοαποδομήσιμα οργανικά υλικά των αποβλήτων ως επί των πλείστων είναι το χαρτί, τα ζωικά και φυτικά απορρίμματα καθώς και τα απορρίμματα των κήπων. Τα κύρια στοιχεία αυτών των αερίων είναι το μεθάνιο, σε αναλογία 55- 60% v/v και το διοξείδιο του άνθρακα σε αναλογία 40- 45% v/v και άλλα αέρια όπως άζωτο, μονοξείδιο του άνθρακα, υδρόθειο, υδρατμοί κ.λπ. συνήθως μέχρι 5%v/v. Η παραγωγή αυτών των αερίων προκύπτει μέσω τριών αρχικών διαδοχικών φάσεων και ακολουθείται από τη φάση σταθερής παραγωγής CH₄ και CO₂. Η τελευταία εξαρτάται από τη χρονική διάρκεια αποδόμησης του οργανικού τμήματος των αποβλήτων και μπορεί να διαρκέσει χρόνια. Το μεθάνιο είναι ελαφρύτερο του αέρα και τείνει να κινηθεί κατακόρυφα και να διαφύγει στην ατμόσφαιρα. Τα μόρια του είναι σχετικά μικρά γι' αυτό μπορεί να κινηθεί μέσα σε πορώδη εδάφη και να εκτονωθεί αρκετές εκατοντάδες μέτρα μακριά από τα όρια του χώρου διάθεσης.

Το βιοαέριο απομακρύνεται από το έδαφος και τα περικλειόμενα σε αυτό απορρίμματα, με τη βοήθεια συστήματος προώθησης υπό πίεση. Πρέπει να αποφεύγεται η υπεράντληση του βιοαερίου διότι μπορεί να οδηγήσει σε μείωση του ρυθμού παραγωγής του, λόγω εισροής αέρα, καθώς έτσι αυξάνεται τελικά το κόστος τελικής αξιοποίησης του μεθανίου (έχει το 50% της ενεργειακής αξίας του φυσικού αερίου). Ο ρυθμός παραγωγής του βιοαερίου αυξάνεται όσο προχωράει η ενηλικίωση του χώρου διάθεσης, κορυφώνεται κατά την περίοδο λήξης της απόθεσης των απορριμμάτων (~20 έτη) και συνεχίζεται με μειωμένο ρυθμό για μεγάλο χρονικό διάστημα μετά την ολοκλήρωση του χρόνου ζωής του χώρου απόθεσης. Η παραγωγή βιοαερίου κυμαίνεται μεταξύ 160-240 m³/ton απορριμμάτων, σε μια χρονική περίοδο 10-15 ετών.

Η απομάκρυνση του βιοαερίου από το χώρο εδαφικής διάθεσης των απορριμμάτων είναι απαραίτητη για τους ακόλουθους λόγους: α) το υλικό επικάλυψης των απορριμμάτων μπορεί να εγκλωβίσει το βιοαέριο με αποτέλεσμα την κατακόρυφη αύξηση της εσωτερικής πίεσης των αερίων κάτω από την επικάλυψη, που μπορεί να οδηγήσει σε έκρηξη. Μάλιστα, ενδέχεται το βιοαέριο μέσω των μικροπόρων του εδάφους να μεταναστεύσει σε αποστάσεις μεγαλύτερες των

500 m προκαλώντας εκρήξεις ακόμα και σε κτίρια περί του ΧΥΤΑ, β) δευτερευόντως, το βιοαέριο μπορεί να προκαλέσει κορεσμό στους μικροπόρους του εδάφους μην επιτρέποντας στα ριζικά τριχίδια των φυτών, που έχουν φυτευτεί στην τελική επικάλυψη του ΧΥΤΑ για την αποκατάσταση του περιβάλλοντος μετά το τέλος λειτουργίας του ΧΥΤΑ, να προσλάβουν νερό και θρεπτικά συστατικά από το έδαφος προκαλώντας έτσι το μααρασμό της βλάστησης και υποβάθμιση του φυσικού περιβάλλοντος, γ) προβλήματα υγείας σε ανθρώπους που εργάζονται στον ΧΥΤΑ καθώς και αυτών που διαμένουν κοντά σε αυτό, δ) μόλυνση του υπόγειου υδροφορέα, ε) ανεπιθύμητες οσμές και δυσάρεσκεια των κατοίκων της περιοχής και στ) γενικότερα την αρνητική επίδραση στην παγκόσμια κλιματική αλλαγή.



Εικόνα 1.7: Συλλογή βιοαερίου από ΧΥΤΑ (Envima,2018).

1.5.3 Καθίζηση χώρων υγειονομικής ταφής απορριμμάτων

Άλλος ένας μεγάλος κίνδυνος είναι και η καθίζηση σε τμήματα του ΧΥΤΑ. Η καθίζηση προκαλείται από την αποσύνθεση των οργανικών ουσιών και από τη μηχανική φόρτιση. Το ποσοστό αυτής της καθίζησης είναι από 10-50%. Επιπλέον, υπάρχει ανώμαλη καθίζηση που προκαλείται και δημιουργεί ρηγμάτωση της στρώσης επικάλυψης με αποτέλεσμα την είσοδο στο σώμα του ΧΥΤΑ νερού, εντόμων, τρωκτικών, κλπ.

Οφείλεται συνήθως στην εναπόθεση μεγάλων ογκωδών αποβλήτων ή ημίρρευστων υλικών. Η αύξηση του ειδικού βάρους των αποβλήτων μειώνει το ποσοστό της καθίζησης και επιτυγχάνεται με συνδυασμό τριών παραγόντων: του μικρού πάχους στρώσεων αποβλήτων, την επικάλυψη με αδρανή υλικά και τη συμπίεση.

1.6 Αστοχίες ΧΥΤΑ λόγω κατολίσθησης

Η προστασία του περιβάλλοντος και η αειφόρος ανάπτυξη αποτελούν σημαντικά

προβλήματα που αντιμετωπίζουν οι άνθρωποι κατά τον 21^ο αιώνα. Αυτά θεωρούνται εξίσου σημαντικά για τον σχεδιασμό διαχείρισης στερεών αποβλήτων και για την ασφάλεια του πλανήτη των χωματερών ή ΧΥΤΑ, στο οποίο πρέπει να επιτυγχάνεται η εναπόθεση αστικών στερεών απορριμμάτων (ΑΣΑ) κατά τρόπο που να ελαχιστοποιεί τις επιπτώσεις τόσο στο περιβάλλον όσο και στην ανθρώπινη ζωή.

Υπάρχουν αρκετές τεκμηριωμένες αστοχίες χωματερών ή ΧΥΤΑ ανά τον κόσμο, που έχουν προκαλέσει απώλεια ανθρώπινων ζωνών, περιβαλλοντική υποβάθμιση και έχουν υψηλό κόστος επισκευής (Koerner και Soong 2000, Eid κ.α. 2000, Blight 2008, Reddy κ.α. 2009, Reddy και MunwarBasha 2014). Γι' αυτό, είναι σημαντικό να μελετηθεί το μέτρο ευστάθειας και άμβλυνσης της κατολίσθησης των χωματερών. Οι περισσότεροι ειδικοί στο παρελθόν έχουν επικεντρωθεί σε μεγάλο αριθμό αναλύσεων σχετικά με την ευστάθεια ΧΥΤΑ (Reddy κ.α. 1996, Blight 2004, Chen κ.α. 2008, Koerner κ.α. 2008, Babu κ.α. 2010, Lavigne κ.α. 2014), ενώ έχει δοθεί λιγότερη προσοχή στην ανάλυση της δυναμικής εκροής (*runout feature*). Ορισμένες κατολισθήσεις με συμπεριφορά μακράς εκροής είναι καταστροφικές, διότι δεν μπορούν να προληφθούν και να μετριάσουν με τις συνήθεις μετρήσεις αστικού σχεδιασμού. Τείνουν να προκαλέσουν σοβαρές απώλειες σε ανθρώπινες ζωές, καθώς και ακραίες ζημιές σε κατασκευές και εγκαταστάσεις. Προς το παρόν, τα μέτρα έγκαιρης πρόβλεψης και πρόληψης λειτουργούν αποτελεσματικά στην αντιμετώπιση των κινδύνων κατολισθήσεων μακράς εκροής (Hutchinson 1977, Sassa 1988, Crosta & Agliardi 2003, Denlinger & Iverson 2004, Yin et al. 2009, 2016a, Gin & Xing 2012, Xing et al. 2014, Nocentini et al. 2015).

Οι αριθμητικές προσομοιώσεις χρησιμοποιήθηκαν ευρέως ως αποτελεσματικά εργαλεία για την ανάλυση των κατολισθήσεων μετά από αστοχία χωματερών ή ΧΥΤΑ. Έχουν πραγματοποιηθεί πολλές αριθμητικές μελέτες για την καλύτερη κατανόηση της συμπεριφοράς των κατολισθήσεων, οι οποίες προσομοιώνουν τη διαδικασία μαζικής κίνησης μαζών ολίσθησης και συσσώρευσης χρησιμοποιώντας ορισμένες μεθόδους ανάλυσης, όπως για παράδειγμα η μέθοδος διακριτού στοιχείου, η μέθοδος SPH, η μέθοδος MPS, η μέθοδος DDA, η μέθοδος LS-RAPID και η μέθοδος DAN (McDougall & Hungr 2004, 2005, Zhou 2013, Huang et al. 2013, Huang & Zhu 2014, Zhang et al., 2015, Sassa et al., 2010, Yin et al., 2016a). Όλες αυτές οι αξιόπιστες προσεγγίσεις έχουν σχεδιαστεί για την πρόβλεψη της κίνησης των μαζών ολίσθησης (Chen & Lee 2003, Poisel et al., 2008, Xing et al., 2016a). Στη συνέχεια, παρατίθενται κάποια παραδείγματα κατολισθήσεων χώρων υγειονομικής ταφής απορριμμάτων.

Χώρος υγειονομικής ταφής Shenzhen, China

Στις 20 Δεκεμβρίου 2015, ώρα 11:40 π.μ., σημειώθηκε καταστροφική κατολίσθηση στον

ΧΥΤΑ *Shenzhen, Guangdong*, στη Νοτιοανατολική Κίνα. Εβδομήντα επτά άνθρωποι σκοτώθηκαν και 33 κτίρια που βρίσκονταν στην ευθεία της κατολίσθησης θάφτηκαν ή υπέστησαν ζημιές. Η κατολίσθηση προέκυψε από 2,73 εκατομμύρια m^3 ΑΣΑ. Σύμφωνα με τον *Fahrboschung*, η κατολίσθηση του ΧΥΤΑ *Shenzhen Hong'ao* ανήκε στην κατηγορία της κατολίσθησης μακράς εκροής (*Zhang et al., 2010*) (Εικόνες 1.8 και 1.9).

Ο ΧΥΤΑ είχε σχεδιαστεί για μέγιστο ύψος πλήρωσης 95m, μέση ανύψωση 51m και συνολική δυνατότητα χωρητικότητας $4 \cdot 10^6 \text{m}^3$ (*Urban Construction Plan for Shenzhen City*). Στη χωματερή των ΑΣΑ είχαν τοποθετηθεί $5,83 \cdot 10^6 \text{m}^3$ απορριμμάτων πριν από την ολίσθηση, τα οποία υπερέβησαν την τιμή σχεδιασμού κατά $1,83 \cdot 10^6 \text{m}^3$. Η εκφόρτωση των ΑΣΑ κατέληξε σε υπερφόρτωση σε σύντομο χρονικό διάστημα, με αποτέλεσμα να επιταχυνθεί η αστοχία του πρανούς του ΧΥΤΑ.

Μέσω του ελέγχου στο πεδίο, το πρανές του ΧΥΤΑ του *Hong'ao* εμφάνισε φαινόμενα καθίζησης του εδάφους στην άκρη της περιοχής, στις 21 Οκτωβρίου 2015. Επίσης, εμφανίστηκαν ρωγμές στις 26 Νοεμβρίου 2015 σε διάφορες επιφάνειες. Στις 06:00 π.μ. στις 20 Δεκεμβρίου 2015, διαπιστώθηκαν ρωγμές και σε άλλα σημεία. Εντωμεταξύ, στο πίσω μέρος της χωματερής παρουσιάστηκαν ρωγμές πλάτους 40cm και μήκους περίπου 50m. Στις 11:28:29 π.μ., 20 Δεκεμβρίου 2015, το απορριμματικό πρανές παρουσίασε γενική αστοχία. Οι επιτόπιες δοκιμές και οι γεωτρήσεις έδειξαν ότι τα ΑΣΑ αποτελούνταν από στρώμα αλλοιωμένου εδάφους, αποτελούμενου από γρανίτη, ψαμμίτη καθώς και δομικά υλικά.



Εικόνα 1.8: Καταστροφές κτιρίων από κατολίσθηση ΧΥΤΑ στην Κίνα (*YangGao et al., 2016*).



Εικόνα 1.9: XYTA Shenzhen, στην Κίνα πριν και μετά την κατολίσθηση (Gao et al., 2016).

Οι βασικές φυσικές και μηχανικές παράμετροι ελέγχθηκαν στο εργαστήριο. Έτσι, το αλλοιωμένο έδαφος περιείχε κυρίως 30% κόκκους χάλικα μεγαλύτερο από 20mm, διάμετρο 30% κόκκους άμμου που κυμαίνονταν σε μέγεθος από 0,05 έως 2mm και 40% κόκκους λάσπης μικρότερους από 0,05mm. Η φυσική πυκνότητα του αλλοιωμένου εδάφους ήταν 1,65-1,75 g/cm³ και $c = 10$ kPa με εσωτερική γωνία τριβής, $\phi_i = 17^\circ$ με απροσδιόριστη δοκιμή άμεσης διάτμησης και βαθμό κορεσμού 90,4-94,5%. Οι προαναφερθείσες φυσικές και μηχανικές παράμετροι αντανakλούσαν τον υψηλό βαθμό κορεσμού και τη χαμηλή αντοχή διάτμησης των ΑΣΑ, τα οποία αποτελούν βασικές αιτίες που μπορούν να προκαλέσουν αστοχία κατολίσθησης σε πολύ ήπια επιφάνεια ρήξης. Φαινόμενα σεισμού και βροχόπτωσης δεν θεωρούνται ως αιτίες υποβοήθησης για τη συγκεκριμένη κατολίσθηση.

Χώρος υγειονομικής ταφής Payatas, Quezon στις Φιλιππίνες

Στις 10 Ιουλίου 2000, σημειώθηκε αστοχία κλίσης στον ΧΥΤΑ *Payatas* της πόλης *Quezon*, στις Φιλιππίνες (Εικόνα 1.10). Η αστοχία προκάλεσε το θάνατο 330 ατόμων (*Gaillard και Cadag*, 2009) και άφησε πολλούς άστεγους λόγω της στενής εγγύτητας των σπιτιών στη χωματερή. Η πόλη *Metro Manila* (Φιλιππίνες) παρήγαγε κατά μέσο όρο 5.443 μετρικούς τόνους (6.000 τόνους) αστικών στερεών απορριμμάτων (ΑΣΑ) ανά ημέρα κατά τη διάρκεια 5 ετών πριν από την αστοχία. Περίπου 1.540 μετρικοί τόνοι ΑΣΑ (1.700 τόνοι) ανά ημέρα τοποθετούνταν στην περιοχή *Payatas*. Το 1998, η χρήση της χωματερής έπρεπε να σταματήσει, αλλά η κυβέρνηση της πόλης *Quezon* ζήτησε από την Αρχή Ανάπτυξης της Μανίλα (*MMDA*) να αναβάλλει την κατάργηση αυτή λόγω του υψηλότερου κόστους χρήσης της χωματερής στο *San Mateo, Rizal* (περίπου 6,7 χλμ. μακριά).

Σύμφωνα με την Αρχή Ανάπτυξης, η κυβέρνηση της πόλης *Quezon* συνέχισε να αναβάλλει την κατάργηση της χωματερής *Payatas* μέχρι ένα μήνα πριν από την αστοχία της 10ης Ιουλίου 2000. Η αστοχία του πρανούς συνέβη μετά από σφοδρές βροχοπτώσεις σε τροπική περιοχή. Η βροχή από δύο πρόσφατους τυφώνες και τα προερχόμενα από βιοδιάσπαση αέρια της χωματερής προκάλεσαν αυξημένη πορώδη πίεση μέσα στη μάζα του ΧΥΤΑ, με αποτέλεσμα τη μείωση στην ενεργή τάση και στην ευστάθεια. Επιπλέον, οι *Merry et al.*, (2005) συμπεραίνουν ότι τα απορρίμματα συμπίεστηκαν στην άκρη της κορυφής του ΧΥΤΑ, δημιουργώντας μια πεπιεσμένη περιοχή στην κορυφή. Αυτό το φαινόμενο οδήγησε στη συγκέντρωση μικρής ποσότητας, περίπου ένα επίπεδο 0,15m πάχους, λιμνάζοντος νερού στην κορυφή του ΧΥΤΑ.



Εικόνα 1.10: Αστοχία *Payatas* Φιλιππίνες (*Jafari, 2013*).

Πιο συγκεκριμένα, η αιτία της αστοχίας συνεπάγεται τη μείωση των ενεργών τάσεων κατά μήκος της επιφάνειας αστοχίας. Πέντε παράγοντες μπορεί να έχουν συμβάλει στην αστοχία αυτή: (1) η παρουσία στραγγισμάτων λόγω βροχοπτώσεων, (2) η δημιουργία πιέσεων λόγω των αερίων του ΧΥΤΑ στα απορρίμματα, (3) η χαμηλή πυκνότητα των ΑΣΑ λόγω περιορισμένης συμπίεσης, (4) οι απότομες εξωτερικές κλίσεις και (5) οι χαμηλές ή μειωμένες αντοχές διάτμησης των ΑΣΑ. Αρχικά, η παρείσφρηση της βροχόπτωσης πιθανόν ενισχύθηκε λόγω της έλλειψης αποστράγγισης (π.χ. λίμνες από τη βροχόπτωση), της τάφρου αποστράγγισης, που ανασκάφθηκε για να κατευθύνει την απορροή της επιφάνειας προς την κορυφή της πλαγιάς, και λόγω της έλλειψης εδάφους στην κορυφή της χωματερής.

Επίσης, οι υπερβολικές πιέσεις αερίου, π.χ. μεθανίου, που δημιουργούνται από τη βιοδιάσπαση ΑΣΑ εντός της κορεσμένης ζώνης, μείωσαν περαιτέρω την ενεργή τάση των ΑΣΑ και την αντίστοιχη αντίσταση διάτμησης κατά μήκος της επιφάνειας αστοχίας. Αυτός είναι ένας πραγματικός παράγοντας που συμβάλλει, καθώς η συσσώρευση της πίεσης αερίων χωματερής σε κορεσμένα ΑΣΑ παρέχει πιέσεις πόρων παρόμοιες με εκείνες που παρατηρήθηκαν κατά την υπό πίεση επανακυκλοφορία στραγγισμάτων. Στην ολίσθηση απορριμμάτων παίζει ρόλο η χαμηλή πυκνότητα απορριμμάτων ανά μονάδα βάρους, λόγω περιορισμένης συμπίκνωσης και μεγάλου μέρους ελαφρών πλαστικών υλικών (*Koelsch, 2001*). Τέλος, παρατηρήθηκαν απότομες εξωτερικές κλίσεις που κυμαίνονται από 40 ° έως 70 ° που έχουν ως αποτέλεσμα επιπλέον βάρους.

Κεφάλαιο 2

Παράγοντες που επηρεάζουν την ευστάθεια ενός χώρου υγειονομικής ταφής

2.1 Εισαγωγή

Η ευστάθεια της μάζας των αποβλήτων είναι μία από τις μεγαλύτερες ανησυχίες που συνδέονται με τον σχεδιασμό της επέκτασης του χώρου υγειονομικής ταφής. Η εμπειρία έχει δείξει ότι τόσο η κατακόρυφη όσο και η πλευρική επέκταση των χώρων υγειονομικής ταφής μπορούν να προκαλέσουν αστάθεια στη μάζα των αποβλήτων. Η κατακόρυφη επέκταση γενικά οδηγεί σε μια σημαντική αύξηση του ύψους της κλίσης του χώρου υγειονομικής ταφής. Για παράδειγμα, το αναβληθέν κλείσιμο του χώρου υγειονομικής ταφής *Payatas* στις Φιλιππίνες προκάλεσε τελικά μια κατολίσθηση το 2000, η οποία σκότωσε 300 άτομα (*Kavazanjian and Merry, 2005*).

Η επέκταση πλευρικά μπορεί να προκαλέσει προβλήματα στις κλίσεις των πρανών ενός υφιστάμενου χώρου υγειονομικής ταφής. Η μεγαλύτερη αστάθεια μάζας αποβλήτων στις Ηνωμένες Πολιτείες συνέβη το 1996 μετά από πλευρική επέκταση (*Eid et al., 2000*). Μια άλλη πιθανότητα για να δημιουργηθεί μηχανισμός αστοχίας που συνδέεται με την επέκταση της υγειονομικής ταφής είναι η ολίσθηση στη διεπαφή του ενδιάμεσου σύστηματος επένδυσης μεταξύ του υπάρχοντος ΧΥΤΑ και της επέκτασής του. Πρέπει να εξασφαλίζεται η ευστάθεια και η ακεραιότητα του ΧΥΤΑ κατά τη λειτουργία του, αλλά και μετά το κλείσιμό του. Για την αξιολόγηση της ευστάθειας των χώρων υγειονομικής ταφής στερεών αποβλήτων απαιτείται η γνώση των μηχανικών ιδιοτήτων των στερεών αποβλήτων.

Αρκετοί ερευνητές διερεύνησαν την επίδραση διαφόρων παραγόντων όπως η σύνθεση, το ειδικό βάρος, η ηλικία ή η αποσύνθεση, ο ρυθμός φόρτωσης, ο περιορισμός της συμπίεσης των

αποβλήτων, η περιεκτικότητα σε υγρασία, κ.λπ. σχετικά με την αντοχή και τη δυσκαμψία των ΑΣΑ. Αυτές οι ιδιότητες είναι δύσκολο να προσδιοριστούν λόγω:

- της ανομοιογενούς σύστασης των υλικών,
- της διαφοροποίησης των ιδιοτήτων με τον χρόνο (η γήρανση και η 'ωρίμανση' της απορριμματικής μάζας, δηλαδή το βαθμό αποδόμησης),
- της διαφορετικής σύστασης των απορριμμάτων σε κάθε περιοχή, και
- της ύπαρξης των γεωσυνθετικών επενδύσεων της βάσης και της κάλυψης των ΧΥΤΑ.

Τα παραπάνω, εκτός των άλλων, καθιστούν εξαιρετικά δύσκολες τις εργαστηριακές αναλύσεις. Είναι επομένως σημαντικό να γίνει αναφορά στις προσπάθειες που έχουν πραγματοποιηθεί έως σήμερα για να διερευνηθούν οι μηχανικές και δυναμικές ιδιότητες των απορριμμάτων. Είναι γνωστό ότι η μηχανική απόκριση των ΑΣΑ επηρεάζεται σημαντικά από τη σύνθεση ή τα ινώδη υλικά όπως τα υφάσματα, τα πλαστικά, το χαρτί και το ξύλο (*Zhan et al., 2008, Reddy et al., 2009, Bray et al. (Zekkos et al., 2010b, 2013)* και οι ινώδεις εγκλείσεις προκαλούν την ανισότροπη συμπεριφορά των ΑΣΑ (*Zekkos et al., 2010b, 2013*). Επιπρόσθετα η διατμητική αντοχή των ΑΣΑ εξαρτάται από τον σχετικό προσανατολισμό των ινωδών υλικών ως προς μια κατεύθυνση (*Ramaiah and Ramana, 2017*).

Απαιτούνται επιπρόσθετες πληροφορίες για τη διατμητική δύναμη των ΑΣΑ, την εκτίμηση της σταθερότητας της κλίσης, καθώς συμβαίνουν αστοχίες ολικές ή μερικές εντός της μάζας των αποβλήτων. Τα δεδομένα σχετικά με τη δύναμη διάτμησης των ΑΣΑ έχουν ληφθεί από δύο πειραματικές μετρήσεις τις τελευταίες δύο δεκαετίες (*Landva and Clark, 1990, Singh and Murphy, 1990, Jessberger and Kockel, 1993, Kavazanjian et al., 1995, Gabr and Valero, 1995, Grisolia and Napoleoni, 1996, GeoSyntec, 1996, Manassero et al., 1996; Jones et al., 1997, VanImpe and Bouazza, 1998, Machado et al., 2002*).

2.1.1 Η επίδραση του χρόνου ταφής των αστικών στερεών αποβλήτων

Το κλίμα, οι πρακτικές λειτουργίας των χώρων υγειονομικής ταφής και η σύνθεση των αποβλήτων επηρεάζουν τη γεωτεχνική συμπεριφορά των χώρων υγειονομικής ταφής (Εικόνα 2.1). Παλιότερα, οι αλλαγές των ΑΣΑ στη σύνθεση και στη δομική εξέλιξή τους ήταν σε μεγάλο βαθμό άγνωστες και παραμένουν αμφιλεγόμενες (*Bray et al., 2009, Stoltz et al., 2009*). Για παράδειγμα οι *Turczynski (1988), Caicedo et al. (2002), Gabr et al. (2007α, β), Varga et al. (2011), Hossain και Haque (2009) και Reddy et al. (2009a)* διαπίστωσαν ότι η διατμητική αντοχή των ΑΣΑ

μειώνεται με τη πάροδο του χρόνου. Ο *Zhan et al. (2008)* κατέληξαν ακριβώς στο αντίθετο, ενώ οι *Reddy et al. (2011)* και οι *Koerner και Koerner (2015)* ανέφεραν ότι αρχίζει ως υλικό υψηλής τριβής και εξελίσσεται σε ένα υλικό που χάνει την τριβή του, όμως, κερδίζει σε συνοχή με την πάροδο του χρόνου. Ενώ ο *Zekkos (2005)* κατέληξε στο συμπέρασμα ότι δεν υπάρχουν σημαντικές αλλαγές στην διατμητική αντοχή με την πάροδο του χρόνου, οι *Bareither et al. (2012)* υποστήριξαν ότι η σύνθεση των αποβλήτων και οι αλλαγές της είναι πιο σχετικές με την διατμητική αντοχή των αστικών λυμάτων από την ίδια την αποσύνθεσή τους. Η διατμητική αντοχή των αστικών στερεών αποβλήτων εξαρτάται από τη διαφορετική ηλικία ταφής τους. Το απορριμματικό υλικό εξελίσσεται από ένα αρχικά εξαιρετικά συνεκτικό υλικό, σε ένα που χάνει την συνοχή του αλλά αυξάνει τη γωνία τριβής του με την πάροδο του χρόνου (*Abreu & Vilar, 2017*).

Τα απορρίμματα που έχουν μεγαλύτερη ηλικία δεν σημαίνει ότι είναι περισσότερο υποβαθμισμένα από τα απορρίμματα που έχουν πρόσφατα αποτεθεί. Ορισμένοι παράγοντες περιορίζουν την αποσύνθεση των βιο-αποικοδομήσιμων συστατικών στους χώρους υγειονομικής ταφής, συμπεριλαμβανομένων των περιβαλλοντικών συνθηκών όπως η υγρασία, το pH και η θερμοκρασία (*Barlaz et al., 1990*), καθώς και την αρχική σύνθεση των αποβλήτων και τις συνθήκες της διάθεσής τους, όπως η διαδικασία συμπίκνωσης, η αποστράγγιση και η συλλογή του βιοαερίου.



Εικόνα 2.1: ΧΥΤΑ Νάξου (Κοινή Γνώμη, 2016)

2.2 Δυναμικές ιδιότητες αστικών στερεών αποβλήτων

Σε περιοχές με μέτρια έως υψηλή σεισμικότητα απαιτείται η ορθή αποτίμηση των δυναμικών ιδιοτήτων των αστικών στερεών αποβλήτων για τις αναλύσεις της σεισμικής απόκρισης των χώρων υγειονομικής ταφής. Οι δυναμικές ιδιότητες των ΑΣΑ στην γραμμική περιοχή απόκρισης, περιλαμβάνουν την ταχύτητα διάδοσης των διατμητικών κυμάτων (V_s), το αντίστοιχο μέτρο διάτμησης μικρής παραμόρφωσης (G_{max}). Άλλοι κρίσιμοι παράγοντες είναι η διατμητική αντοχή, ο λόγος απόσβεσης και το ειδικό βάρος (γ) των αποβλήτων. Οι προαναφερθείσες ιδιότητες μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά τη σεισμική απόκριση των ΧΥΤΑ. Είναι απαραίτητες για την αξιόπιστη εκτέλεση αναλύσεων σεισμικής απόκρισης, δυναμικής ευστάθειας των χώρων υγειονομικής ταφής των ΑΣΑ. Είναι επομένως ζωτικής σημασίας ο κατάλληλος χαρακτηρισμός και η ρεαλιστική προσομοίωση των δυναμικών ιδιοτήτων των στερεών αποβλήτων.

Στις μη γραμμικές αναλύσεις περιλαμβάνονται (συνήθως αποτυπώνονται με κατάλληλες καμπύλες) η μείωση του (κανονικοποιημένου) μέτρου διάτμησης και η αύξηση της απόσβεσης του υλικού όσο αυξάνεται η διατμητική παραμόρφωση του. Σημαντικό, επίσης, είναι και το ειδικό βάρος της μάζας των ΑΣΑ. Ιστορικά έχουν χρησιμοποιηθεί δύο μέθοδοι αξιολόγησης των μη γραμμικών δυναμικών ιδιοτήτων των ΑΣΑ: 1) η αντίστροφη ανάλυση της απόκρισης των εξοπλισμένων χωματερών με δοκιμές πεδίου (*Augello et al., 1998, Matasovic και Kavazanjian 1998, Elgamal et al., 2004*), και 2) οι εργαστηριακές μετρήσεις σε μεγάλη κλίμακα ΑΣΑ (*Matasovic et al. 1998, Zekkos et al. 2008, Lee 2007, Yuan et al., 2011*). Στις μετρήσεις πεδίου, οι ιδιότητες μικρής παραμόρφωσης περιορίζονται στη μέτρηση της παραμέτρου V_s και του ειδικού βάρους της μάζας. Οπότε, οι συγκεκριμένες δοκιμές μετρήσεων αξιολογούν τη μετάπτωση της καμπύλης του μέτρου διάτμησης των ΑΣΑ.

Οι εργαστηριακές δοκιμές έχουν το πλεονέκτημα ότι τα όρια και οι συνθήκες είναι καλά καθορισμένες και οι παράμετροι ελέγχου μπορούν να εξακριβωθούν. Βέβαια, οποιαδήποτε διαταραχή κατά τη διάρκεια της δειγματοληψίας δημιουργεί θέματα σχετικά με το πόσο αντιπροσωπευτικό είναι το δείγμα, με τη διαφοροποίηση της καταπόνησης μεταξύ του εργαστηριακού δείγματος και του υλικού στο πεδίο, και με το συστηματικό έλεγχο των εργαστηριακών συσκευών, μπορούν να είναι σημαντικά μειονεκτήματα αυτής της μεθόδου. Οι επί τόπου δοκιμές πεδίου έχουν πλεονεκτήματα σε σχέση με τις εργαστηριακές δοκιμές. Οι δοκιμές πεδίου δεν επηρεάζονται από το δείγμα, οι διαταραχές και τα αποτελέσματα των δοκιμών ενσωματώνουν την πολυπλοκότητα της πραγματικής καταπόνησης. Επιπλέον, μπορεί

υπό όρους να θεωρηθούν και ως δοκιμέςπλήρους κλίμακας. Όμως, είναι δαπανηρές και δεν είναι σε θέση να ελέγξουν ορισμένες παραμέτρους (π.χ., έλεγχος αποστράγγισης και οριακές συνθήκες). Παρόλο που τόσο οι εργαστηριακές μέθοδοι όσο και οι μέθοδοι πεδίου έχουν χρησιμοποιηθεί εκτεταμένα για να αξιολογηθούν οι δυναμικές ιδιότητες των αστικών αποβλήτων, πολύ λίγες εκτεταμένες μελέτες έχουν διεξαχθεί για να αξιολογηθούν οι μη γραμμικές δυναμικές ιδιότητές τους. Υπάρχει, επίσης, πολύ περιορισμένη γκάμα επιτόπιων δοκιμών για την αξιολόγηση των μη γραμμικών δυναμικών ιδιοτήτων της μελέτης των αστικών αποβλήτων. Οι μόνες διαθέσιμες μελέτες είναι οι *Zalachoris (2010)* και *Stoke et al. (2011)*.

Ο προσδιορισμός της δυναμικής συμπεριφοράς του απορριμματικού υλικού περιγράφεται, όπως και στα εδάφη, από την ταχύτητα διάδοσης των διατμητικών κυμάτων (V_s) και από το μέτρο διάτμησης G_{max} :

$$G_{max} = \rho * V_s^2 \quad \text{Εξίσωση (2.1)}$$

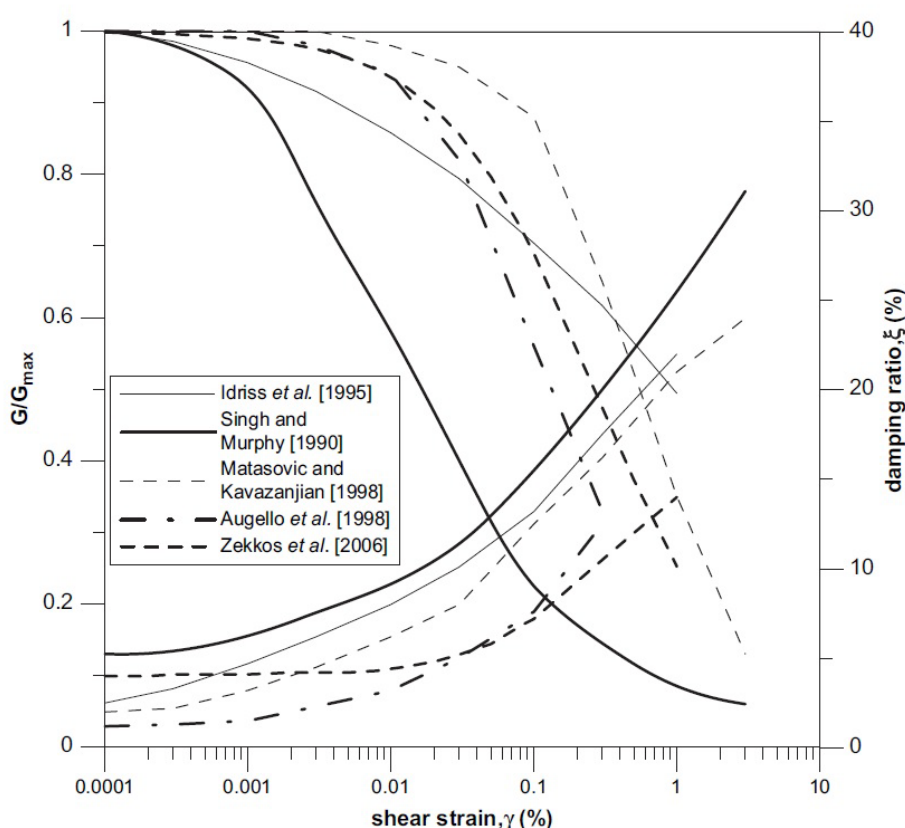
όπου ρ είναι η πυκνότητα των ΑΣΑ.

Γενικά, όπως και η πυκνότητα των ΑΣΑ, η ταχύτητα διάδοσης των διατμητικών κυμάτων εξαρτάται από πολλούς παράγοντες και συνήθως 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.

Απομείωση του μέτρου διάτμησης – Αύξηση του λόγου απόσβεσης

Όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 2.1, η διακύμανση είναι αρκετά μεγάλη και για τις καμπύλες απομείωσης μέτρου διάτμησης–αύξησης του λόγου απόσβεσης. Πιο συγκεκριμένα, οι καμπύλες 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. Οι *Idriss et al. (1995)* ανέφεραν V_s με μέση τιμή 365m/sec που μετρήθηκαν στον ΧΥΤΑ ΟΙΙ στην Καλιφόρνια, όπου εκτελέστηκαν υπολογισμοί με χρήση αριθμητικών αναλύσεων 2D και των καταγεγραμμένων αποκρίσεων σε ΧΥΤΑ για την αξιολόγηση των καμπύλων μείωσης του μέτρου διάτμησης και αύξησης του συντελεστή απόσβεσης. Οι *Matasovic και Kavazanjian (1998)* ανέφεραν τιμές V_s κυμαινόμενες μεταξύ 150-390m/sec για τον ΧΥΤΑ ΟΙΙ.

Ο εργαστηριακός έλεγχος γίνεται με διαδικασίες, όπως ο κυκλικός άμεσος έλεγχος απλής διάτμησης ($0,1\% < \gamma < 10\%$), μετά τη διεξαγωγή διαδικασιών ανάλυσης ($\gamma < 0,1\%$), για τον υπολογισμό των καμπυλών των απορριμμάτων ενός ΧΥΤΑ. Οι *Augello et al.* (1998) εκτίμησαν ότι οι καμπύλες των αποβλήτων υπολογίζονται μέσω αναλύσεων 2D πεπερασμένων στοιχείων από τα αρχεία του ΧΥΤΑ ΟΙΙ. Οι *Singh και Murphy* (1990) υπολόγισαν καμπύλες προσαρμογής τύρφης και αργίλου στα δεδομένα για V_s . Οι *Houston et al.* (1995) διεξήγαγαν δοκιμές για την εύρεση των V_s που ποικίλλουν ανάλογα το βάθος και κυμαίνονται από 125-230m/sec. Οι *Zekkos et al.* (2006) προσδιόρισαν τις δυναμικές ιδιότητες του υλικού μέσω κυκλικών τριαξονικών δοκιμών μεγάλης κλίμακας των δειγμάτων από τον ΧΥΤΑ *Tri-Cities* στις ΗΠΑ (Διάγραμμα 2.1).

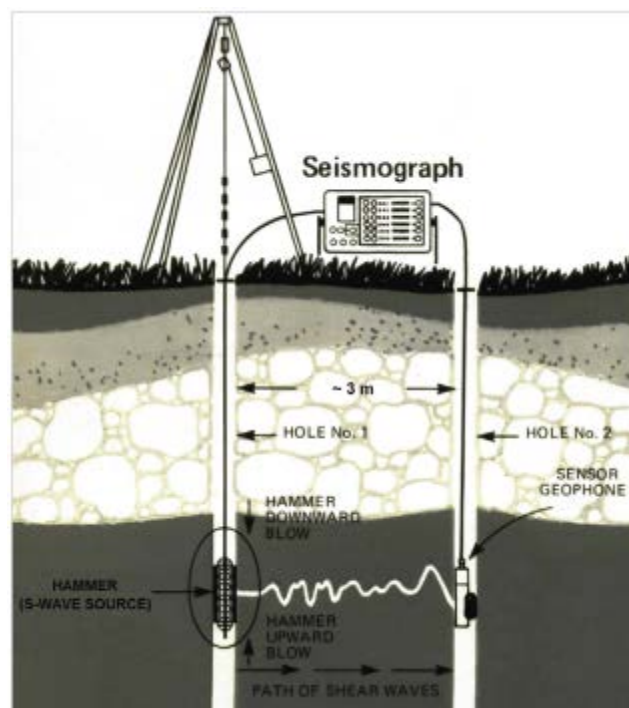


Διάγραμμα 2.1: Καμπύλες απομείωσης γ (%) – ξ (%)– G/G_{max} (Zekkos et al., 2006).

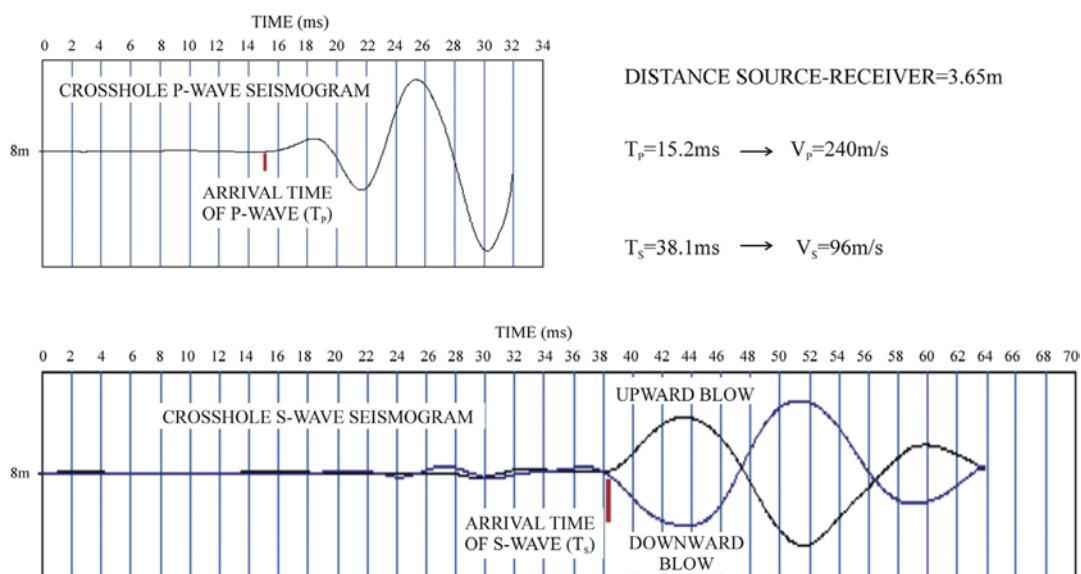
2.2.1 Δοκιμές προσδιορισμού δυναμικών ιδιοτήτων αστικών αποβλήτων

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται συνοπτικά επί τόπου δοκιμές και μεγάλης κλίμακας εργαστηριακές δοκιμές σε ΧΥΤΑ, για τον υπολογισμό των δυναμικών ιδιοτήτων των αστικών αποβλήτων.

Οι ταχύτητες των διατμητικών (ή δευτερευόντων) και διαμήκων (ή πρωτευόντων) κυμάτων σύμφωνα με το Zekkos (2014), μετρούνται χρησιμοποιώντας μικρής κλίμακας σεισμικές δοκιμές *crosshole* και *downhole* (Εικόνα 2.2). Ο συνδυασμός αυτών των σεισμικών μεθόδων επιτρέπει την εκτίμηση της επίδρασης της σύστασης των απορριμμάτων στον υπολογισμό των δυναμικών ιδιοτήτων, της ανισοτροπίας όσο αφορά τη διατμητική αντοχή και του λόγου *Poisson*. Επιπρόσθετα, έγιναν δυναμικές δοκιμές χρησιμοποιώντας δύο μετακινούμενες δονητικές μηχανές για να υπολογιστεί η επί του πεδίου (*in-situ*) μη γραμμική σχέση μεταξύ μέτρου διάτμησης και διατμητικών παραμορφώσεων. Οι οριζόντιες δονήσεις με αυξανόμενα επίπεδα έντασης παράγουν διατμητικές παραμορφώσεις από 0.001% έως 0.02% επιτρέποντας τον υπολογισμό των καμπυλών μείωσης του μέτρου διάτμησης για μεγάλο εύρος παραμορφώσεων. Επίσης, μπορεί να εκτιμηθεί η επίδραση των συγκεντρωμένων τάσεων στις δυναμικές ιδιότητες των απορριμμάτων χρησιμοποιώντας το σημαντικό βάρος των δονητικών μηχανών ως αντίδραση για να εφαρμοστούν προσαυξημένα κατακόρυφα φορτία στην επιφάνεια των απορριμμάτων.



Εικόνα 2.2: Διάταξη για *cross hole test* (Abreu et al., 2016).

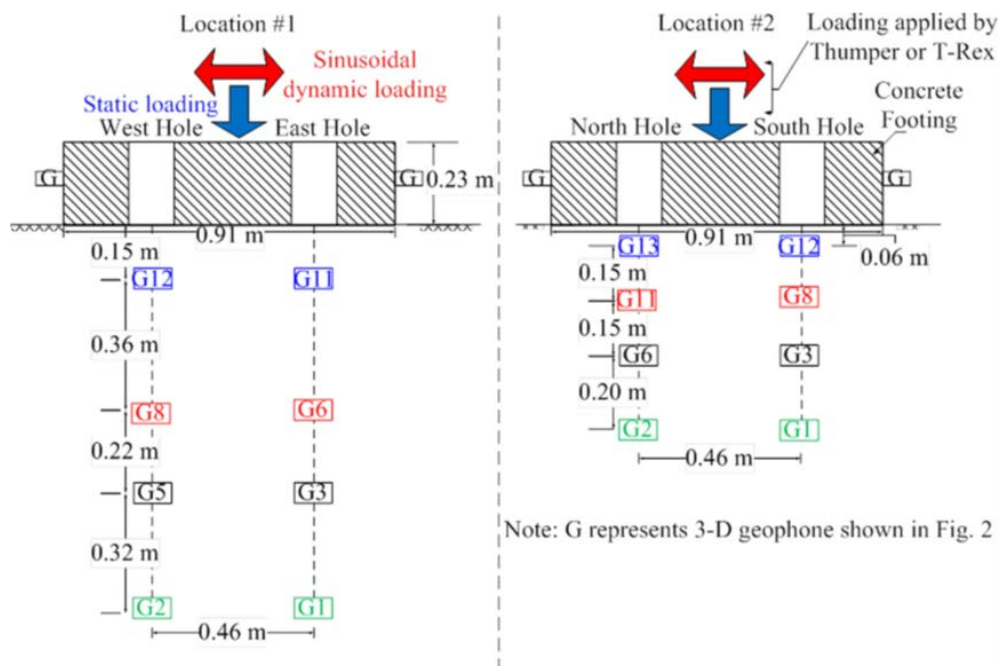


Διάγραμμα 2.2: Τυπικά σειсмоγράφημα από *cross hole test* (Abreu et al., 2016).

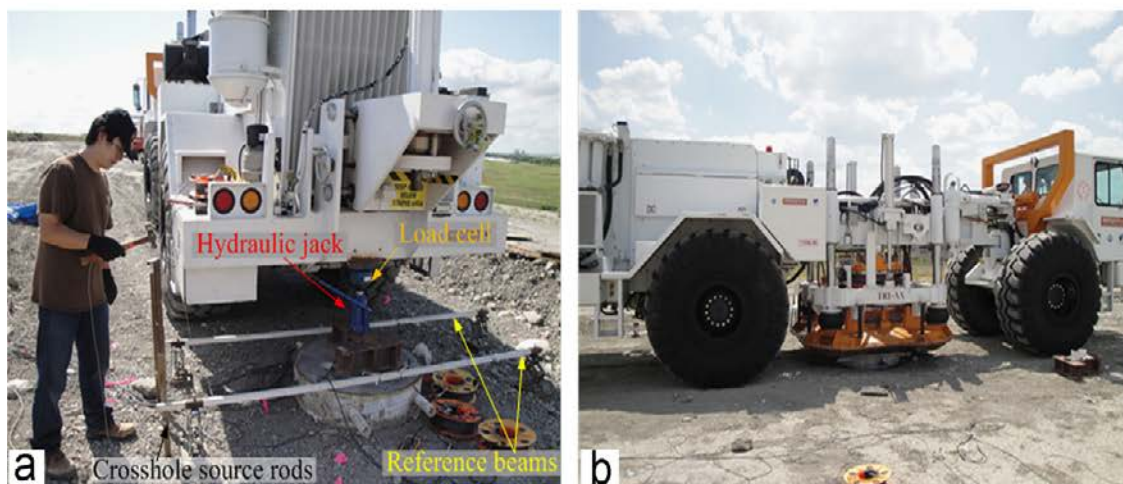
Άλλη μια μεθοδολογία σύμφωνα με τους Zekkos et al. (2014) έγινε στο Τέξας όπου οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε δύο σημεία του πεδίου. Αρχικά, μελετήθηκε το προφίλ μετάδοσης των διατμητικών κυμάτων με την εφαρμογή της Φασματικής Ανάλυσης Επιφανειακών Κυμάτων (SASW). Στη συνέχεια, τοποθετήθηκαν γεώφωνα καθ' ύψος του ΧΥΤΑ σε τέσσερα διαφορετικά βάθη. Το μέγιστο βάθος τοποθέτησης ήταν 1m. Πάνω σε αυτά τοποθετήθηκαν πλάκες προκατασκευασμένου σκυροδέματος πλάτους 90cm και πάχους 30cm. Ράβδοι για την ανίχνευση των σεισμικών κυμάτων τοποθετήθηκαν σε απόσταση 1,14m από το πρώτο σημείο ελέγχου, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.3. Κατακόρυφες σεισμικές δονήσεις πραγματοποιήθηκαν χτυπώντας πλευρικά (για διάτμηση S) και άνωθεν (για θλίψη P) της βάσης, καταγράφοντας τις αφίξεις των κυμάτων που αντιστοιχούν στα P, S κύματα αντίστοιχα. Για τη διέγερση της βάσης χρησιμοποιήθηκαν ειδικά παλμικά μηχανήματα (Εικόνα 2.4).

Η ταχύτητα διάδοσης του διατμητικού κύματος μετρήθηκε με τη χρήση του χρόνου μετάδοσης των κυμάτων από τους επιφανειακούς στους βαθύτερα τοποθετημένους αισθητήρες. Για να αξιολογηθεί το εύρος της διατμητικής παραμόρφωσης, υπολογίστηκε η τριαξονική μετατόπιση ενσωματώνοντας την καταγεγραμμένη χρονοϊστορία. Χρησιμοποιήθηκε ένα στοιχείο με τέσσερις κόμβους, αφού επιλέχθηκαν ζεύγη γεωφώνων σε δύο διαφορετικά βάθη και στη συνέχεια υπολογίστηκε η χρονοϊστορία της διατμητικής παραμόρφωσης. Σε κάθε αύξηση της κάθετης επιβληθείσας δύναμης, μετρήθηκε η διασπορά της κάθετης και οριζόντιας τάσης με τη χρήση των μοντέλων Foster και Ahvlin (1954). Στη μεταβολή του εύρους της δυναμικής φόρτισης από υψηλή σε χαμηλή, εκτιμήθηκε η μετάπτωση του μέτρου διάτμησης. Στη μεταβολή του

ρυθμού αύξησης του κάθετου φορτίου, μελετήθηκε το φαινόμενο περιορισμού της τάσης στη μετάπτωση του μέτρου διάτμησης.



Εικόνα 2.3: Ράβδοι ανίχνευσης σεισμικών κυμάτων (Zekkos et al., 2014).



Εικόνα 2.4: (a) T-Rex σε τεστ απλής διάτμησης
(b) T-Rex κατά τη διάρκεια της δυναμικής δοκιμής (Zekkos et al., 2014).

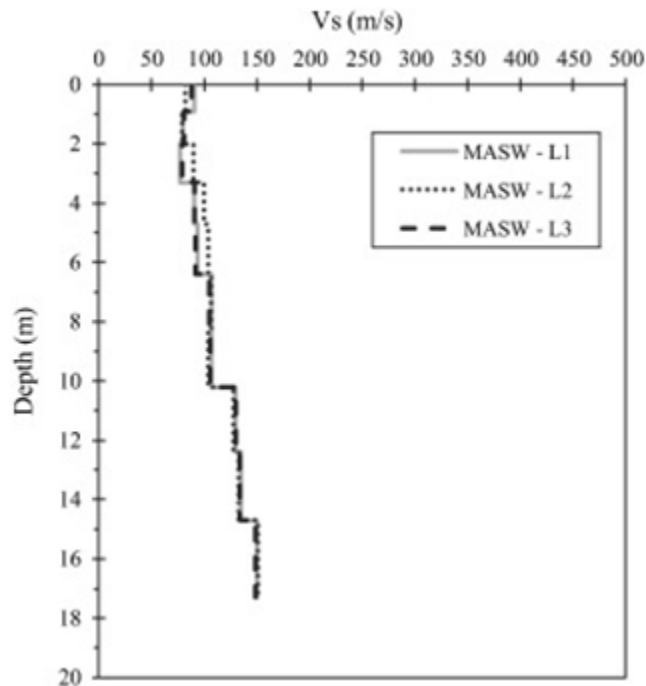
Γενικά, έχουν χρησιμοποιηθεί πολλές γεωφυσικές μέθοδοι για τον προσδιορισμό των γεωτεχνικών ιδιοτήτων των ΧΥΤΑ. Η σεισμική φόρτιση τυπικά ελέγχει το σχεδιασμό των απορριμμάτων σε περιοχές με μέτρια και υψηλή σεισμικότητα (Zekkos et al., 2008). Σε γεωφυσικές δοκιμές που παρέχεται ένας μέσος τρόπος μέτρησης των επιτόπιων ταχυτήτων των

διατμητικών κυμάτων (V_s) και τη διαμόρφωση του προφίλ της μεταβολής τους με το βάθος για να μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ειδικές δυναμικές αναλύσεις.

Ως εκ τούτου, τα τελευταία τριάντα χρόνια, ένας μεγάλος αριθμός σεισμικών μεθόδων χρησιμοποιήθηκαν για να χαρακτηρίσουν τους χώρους υγειονομικής ταφής. Αυτές περιλαμβάνουν παρεμβατικές τεχνικές, όπως είναι οι μέθοδοι *downhole*, *crosshole*, *uphole*, *seismic Marchetti dilatometer (SDMT)* και μη παρεμβατικές τεχνικές, όπως η φασματική ανάλυση επιφανειακών κυμάτων (*SASW*) που χρησιμοποιήθηκε από τους *Kavazanjian et al. (1995, 1996)*, *Lin et al. (2004)*, *Konstantaki et al. (2015)*, το ελεγχόμενο προφίλ επιφανειακού κύματος (*CSW*) από τον *Zalachoris (2010)*, η πολυκαναλική ανάλυση επιφανειακών κυμάτων (*MASW*) από τους *Sahadewa et al. (2011)*, χαρακτηριστικά αποτελέσματα υπολογισμού ταχύτητας διάδοσης ανά βάθος παρουσιάζονται από τον *Abreu (2016)* στο Διάγραμμα 2.3 με χρήση της μεθόδου *MSW*, η διάθλαση και η τομογραφία με άμεσο κύμα.

Σύμφωνα με τον *Foti (2012)*, συνδυάζοντας διάφορες γεωφυσικές μεθόδους και διαφορετικά σύνολα δεδομένων υπάρχει η δυνατότητα για ένα πιο αξιόπιστο χαρακτηρισμό της τοποθεσίας, μειώνοντας τις αβεβαιότητες που σχετίζονται με μια ενιαία μέτρηση. Επιπλέον, κάθε μέθοδος διερευνά ένα συγκεκριμένο υπέδαφος όπου ο όγκος και ο συνδυασμός των διαφόρων μεθόδων μπορεί να προσφέρει υψηλή τοπική ανάλυση ενώ χαρακτηρίζει μεγάλες εκτάσεις του χώρου. Για παράδειγμα, οι *Wille et al. (2013)* χρησιμοποίησαν ηλεκτρομαγνητική επαγωγή, μαγνητική σήμανση, σεισμική διάθλαση και ραντάρ που εισχωρεί στο έδαφος για να ερευνήσουν τη στρωματογραφία και την κατανομή των διαφόρων συστατικών των απορριμμάτων στο σώμα των απορριμμάτων. Οι *Konstantaki et al. (2015)* χρησιμοποίησαν σεισμικά στοιχεία και στοιχεία αντίστασης για τον χαρακτηρισμό ενός ετερογενούς χώρου υγειονομικής ταφής. Οι *Moreau et al. (2013)* χρησιμοποίησαν ηλεκτρική αντίσταση για την παρακολούθηση της κατανομής του νερού που περιέχεται σε ένα χώρο υγειονομικής ταφής. Οι *Mantlik et al. (2009)* χρησιμοποίησαν βαρυμετρία για να χαρακτηρίσουν τις πυκνότητες των αποβλήτων.

Για τον προσδιορισμό της ταχύτητας διάδοσης του διατμητικού κύματος V_s , υπολογίστηκε μια τιμή για το βάρος μονάδας των αστικών αποβλήτων και υπολογίστηκαν οι τιμές G_{max} για το σώμα αποβλήτων (*Castelli et al., 2013, Sharma et al., 1990, Houston et al., 1995*). Οι *Matasovic and Kavazanjian (1998)*, *Abbiss (2001)* και *Zalachoris (2010)* πραγματοποίησαν από τα λίγα πειράματα που έχουν μετρήσει επί τόπου τόσο το ειδικό βάρος των αστικών αποβλήτων όσο και το V_s και υπολόγισαν ένα συγκεκριμένο προφίλ για το μέγιστο μέτρο διάτμησης, G_{max} . Οι τιμές G_{max} που ανέφεραν αυτές οι μελέτες κυμαίνονται μεταξύ 4,4 και 121MPa.



Διάγραμμα 2.3: Ταχύτητα (m/s) – βάθος (m) από δοκιμή MSW (Abreu *et al.*, 2016).

Σε γενικές γραμμές, διεξάγονται περιορισμένες εργαστηριακές και επιτόπιες έρευνες σχετικά με τα ΑΣΑ, κυρίως λόγω των δυσκολιών στην εκτέλεση τέτοιων δοκιμών. Τέτοιες δυσκολίες περιλαμβάνουν τα θέματα υγείας που συνδέονται με τις δοκιμές των αποβλήτων, τη διαταραχή του δείγματος και τις πολλές δοκιμές για τα απαιτούμενα δείγματα προκειμένου να συμπεριληφθούν τα μεγαλύτερα σωματίδια αποβλήτων (Zekkos *et al.*, 2006). Επιπλέον, οι Zekkos *et al.* (2014) παρουσίασαν την ταχύτητα διατμητικής κυματομορφής των αστικών αποβλήτων με χρήση της φασματικής ανάλυσης επιφανειακών κυμάτων (SASW), η οποία συγκρίθηκε με άλλες μεθόδους.

Από τους Anbazhagan *et al.* (2016) διεξήχθη δοκιμή κυκλικού τριγώνου των ΑΣΑ, που ανακτήθηκαν από τον ΧΥΤΑ του *Mavallipura*, στο εργαστήριο για τον προσδιορισμό των δυναμικών παραμέτρων των αστικών αποβλήτων που απαιτούνται. Αυτά περιλαμβάνουν τις μετρήσεις πεδίου χρησιμοποιώντας *MSAW* και περίπου 50 εργαστηριακές κυκλικές τριαξονικές δοκιμές. Οι ιδιότητες των ΑΣΑ προσδιορίζονται στο πεδίο και στο εργαστήριο και οι καταχωρημένες κινήσεις εδάφους, χρησιμοποιούνται ως αρχικά δεδομένα εκτελώντας μη γραμμική ανάλυση σε μονοδιάστατη σεισμική απόκριση. Η συμπεριφορά των αποβλήτων προσεγγίστηκε χρησιμοποιώντας ελαστικό μέτρο διάτμησης και ιξώδη απόσβεση. Στον Πίνακα 2.1 παρουσιάζεται η διακύμανση της ταχύτητας διάδοσης του διατμητικού κύματος με διαφορετικές μεθόδους σε πολλούς ΧΥΤΑ στις ΗΠΑ και αλλού.

Ερευνητές	XYTA	Μέθοδος	depth (m)	VS (m/s)
Wo. Clyde Cons. (1987)	Puente Hills Landfill, California, USA	Crosshole	14	240–270
Sharma et al. (1990)	Richmond site, California, USA	Downhole	15,3	198
Carey et al. (1993)	Brookhaven Landfill, New York, USA	Crosshole	δεν αναφ.	185-478
Houston et al. (1995)	Northwest Regional Landfill, Arizona	Downhole	10	124-229
Kavazanjian et al. (1996)	Azuza Landfill	SASW	75	80-300
Rix et al. (1998)	Bolton Road Sanitary Landfill	SASW	25	120-165
	Sanifill MSW landfill, Georgia, USA		32	85-160
Cuéllar et al. (1998)	Villalba waste dump	SASW	15	80-170
Carvalho (1999)	Bandeirantes Landfill	Cros./downh.	28	92-208
Pereira et al. (2002)	Valdemingomez landfill	SASW	33	80-250
Lin et al. (2004)	Tri-Cities	SASW	30	85-235
Zekkos (2005)	Tri-Cities landfill in Fremont	SASW	<30	75-200
			>30	195-400
Mat.and Kavazanjian(2006)	Olympic View Sanitary Landfill	SASW	30	130-240
Del Greco et al. (2007)	Alice Castello landfill	SASW	22	100-180
Zalachoris (2010)	Austin Community landfill	Crosshole	0,76	109-128
Castelli and Maugeri (2014)	Cozzu Vuturo landfill	SDMT	16	50-400
Sahadewa et al. (2014)	Austin Community landfill	Cros./ do.	0,6	110-250
Konstantaki et al. (2015)	Wieringermieer landfill, Netherland	S.refl.MASW	13	120-260

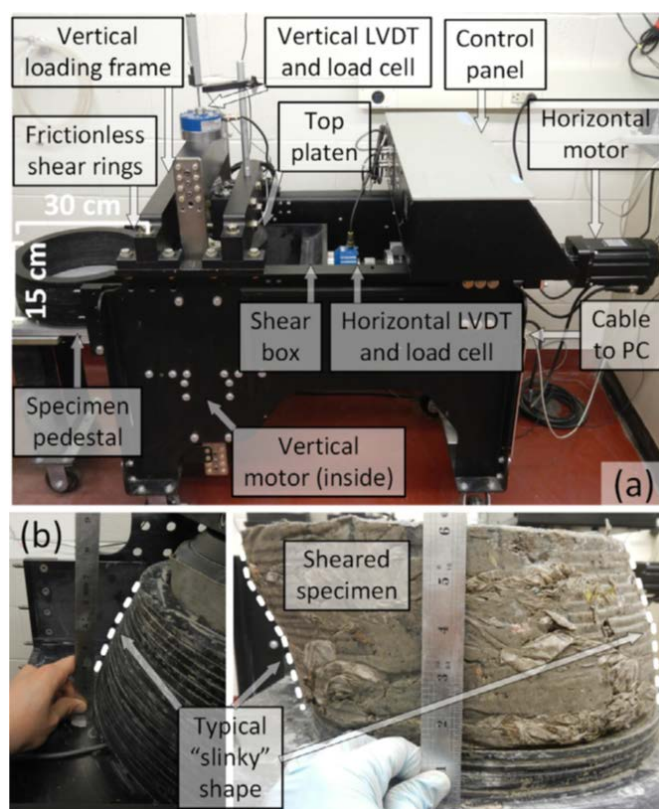
Πίνακας 2.1: Διακυμάνσεις V_s σε διαφορετικές μεθόδους δοκιμής σε πολλούς XYTA.

2.2.2 Δοκιμές διάτμησης στα αστικά στερεά απορρίμματα

Η απλή διατμητική δοκιμή έχει σημαντικά πλεονεκτήματα έναντι της άμεσης διάτμησης και της τριαξονικής δοκιμής των ΑΣΑ. Τα ΑΣΑ είναι ουσιαστικά ένα σύνθετο υλικό το οποίο αποτελείται από δύο στοιχεία, συγκεκριμένα από ένα πολτό (με μηχανικές ιδιότητες παρόμοιες του εδάφους) και ένα ινώδες υλικό, το οποίο προσδίδει ενίσχυση μέσα στο υλικό των ΑΣΑ (Koelsch, 1995). Η ποικιλία στη σύνθεση των ΑΣΑ (πολτός και ινώδη υλικά) επηρεάζει το ειδικό βάρος, τη διατμητική αντοχή, την αποσύνθεση και κατ' επέκταση την παραγωγή αερίων. Τα αστικά απορρίμματα έχει αποδειχθεί ότι είναι ένα από τα πιο ανισότροπα υλικά λόγω της παρουσίας ινωδών συστατικών, όπως το χαρτί, τα πλαστικά και το ξύλο, τα οποία τείνουν να προσανατολίζονται οριζόντια κατά τη συμπίεση ή κατά την εφαρμογή ενός κατακόρυφου φορτίου (Gotteland et al., 2000; Zekkos et al., 2013). Στην πραγματικότητα, έχει αποδειχθεί ότι τα ΑΣΑ έχουν πολλές ομοιότητες με ινώδη υλικά (Zekkos et al., 2013).

Σε τριαξονικές δοκιμές των ΑΣΑ, τα ινώδη δηλαδή χαρτί, πλαστικό και ξύλο, συμβάλλουν σημαντικά στην αντοχή του δείγματος. Έτσι, οι αντιστάσεις διάτμησης που παρατηρούνται στην τριαξονική διάτμηση είναι υψηλές, με αναφερόμενες γωνίες τριβής 48° ή μεγαλύτερες (Zekkos et al., 2012). Ωστόσο, όπως φαίνεται από τους Bray et al. (2009) σε δοκιμή άμεση διάτμησης, το επίπεδο οριζόντιας αστοχίας είναι παράλληλο με τον προσανατολισμό της πλειοψηφίας των

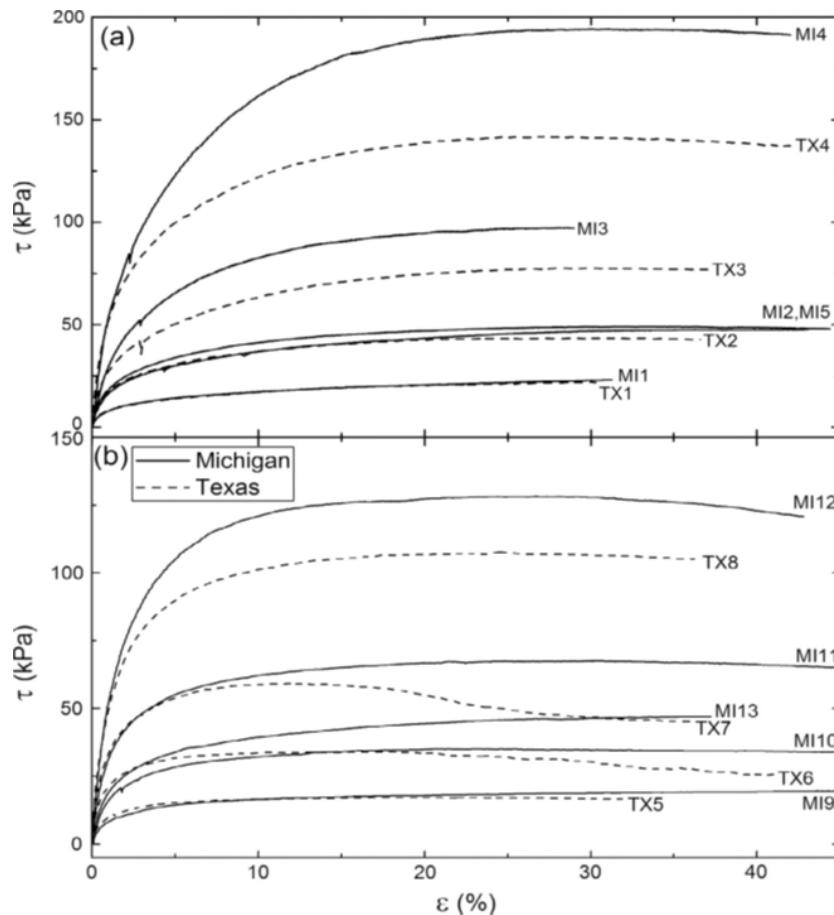
ινωδών αποβλήτων και η διατμητική αντοχή σε άμεση διάτμηση είναι χαμηλότερη. Ο Anbazhagan (2016) παρουσίασε το παραπάνω εύρημα σε ένα πείραμα που πραγματοποίησε (Εικόνα 2.5). Ακόμα, στην άμεση διάτμηση η δοκιμή ουσιαστικά επιβάλλει το επίπεδο αστοχίας στο υλικό. Δεδομένης της μεταβλητότητας στα συστατικά ενός δείγματος αποβλήτων, η επιβαλλόμενη οριζόντια αστοχία δεν μπορεί απαραίτητα να είναι το πιο αδύναμο επίπεδο και πιθανόν να υπάρχει ασθενέστερο επίπεδο το οποίο δεν έχει εντοπισθεί. Οι συνθήκες αυτών των δοκιμών είναι κατάλληλες για συμβατικούς χώρους ταφής όπου τα απορρίμματα έχουν χαμηλή υγρασία. Μια χαρακτηριστική συσκευή για δοκιμές απλής διάτμησης μεγάλης κλίμακας είναι η ASU που χρησιμοποιείται στις περισσότερες περιπτώσεις (Εικόνα 2.6). Ωστόσο, σε παλαιότερους ή και εγκαταλελειμμένους χώρους υγειονομικής ταφής χωρίς σωστή λειτουργία των στραγγισμάτων συλλογής και απομάκρυνσης, η περιεκτικότητα σε υγρασία των ΑΣΑ μπορεί να είναι σημαντικά μεγαλύτερη.



Εικόνα 2.5: α) Συσκευή απλής διάτμησης β) Δείγμα μετά την δοκιμή (Anbazhagan et al., 2016).

Σύμφωνα με τους Zekkos et al. (2017) σε δοκιμές διάτμησης υπό συνεχές φορτίο και ένταση, τα αποτελέσματα αξιολογήθηκαν σύμφωνα με δύο κριτήρια παραμορφωσιακής αστοχίας, 10% και 30%, καθώς και δύο ερμηνείες ενεργούς γωνίας τριβής. Συνολικά, η γωνία τριβής προέκυψε, αφού θεωρήθηκε οριζόντιο επίπεδο αστοχίας και 10% διατμητική παραμόρφωση. Με τις συγκρίσεις που έγιναν μεταξύ των πειραματικών αποτελεσμάτων,

παρατηρήθηκαν σημαντικές διαφορές μεταξύ των δύο μεθόδων. Συγκεκριμένα, τα ΑΣΑ παρουσίασαν μεγαλύτερη αντοχή σε διάτμηση στην καταπόνηση υπό σταθερή φόρτιση απ' ό,τι σε σταθερή ένταση. Επίσης, οι μετρήσεις έδειξαν σημαντικά μειωμένη διατμητική αντοχή σε ΧΥΤΑ όπου τα απορρίμματα εναποτίθενται με μικρό έργο συμπύκνωσης και σταθερή ένταση, συγκεκριμένα χωρίς στράγγιση.



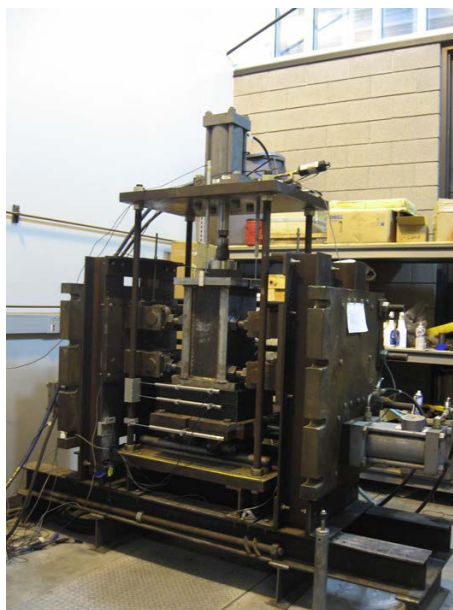
Διάγραμμα 2.4: Διαγράμματα τάσης (τ)-παραμόρφωσης (ϵ %) α) δοκιμές υπό σταθερή φόρτιση β) δοκιμές απλής διάτμησης (με $\sigma_{nc} = 50, 100, 200, 400$ kPa) (Zekkos *et al.*, 2014).

Στην έρευνα των Zekkos *et al.* (2017) χρησιμοποιήθηκε μια πρότυπη απλή συσκευή απλής διάτμησης, μεγάλων διαστάσεων. Η συσκευή αυτή επιτρέπει δοκιμές σε κυλινδρικά στοιχεία ονομαστικής διαμέτρου 300mm και μέγιστου ύψους 137mm. Δύο συσκευές επιβάλλουν οριζόντια και κατακόρυφη φόρτιση και δύο κυψέλες των 4.4kN μετράνε το φορτίο. Δύο ανιχνευτές μετατόπισης μετράνε τις οριζόντιες και κάθετες μετακινήσεις και υπολογίζουν τη διατμητική παραμόρφωση και κάθετη διάτμηση κατά την καταπόνηση. Το πειραματικό μοντέλο ήταν μία στήλη κυκλικών δακτυλίων αλουμινίου, περιτυλιγμένα με τεφλόν, γεγονός που επέτρεπε ελάχιστη τριβή. Ένα δείγμα άοπλης μεμβράνης χρησιμοποιήθηκε ως προστατευτικό των δακτυλίων.

Ο χαρακτηρισμός των απορριμμάτων έγινε με χρήση των διαδικασιών που περιγράφονται από τους *Zekkos et al.* (2010). Συνοπτικά, αυτές οι διαδικασίες περιλαμβάνουν τη συλλογή δειγμάτων ΑΣΑ τα οποία διαχωρίζονται σε σωματίδια μικρότερα και μεγαλύτερα των 20mm. Αφού χαρακτηριστεί το δείγμα τα σωματίδια αυτά αναμειγνύονται ξανά για να δημιουργήσουν ένα δείγμα με στοχευμένη σύνθεση. Η ηλικία των δειγμάτων ήταν μεταξύ 6 και 12 μηνών και ο βαθμός αναερόβιας βιοδιάσπασης θεωρήθηκε ελάχιστος. Σε αυτήν την εργασία δεν ερευνάται, ωστόσο, η επιρροή της βιοδιάσπασης των απορριμμάτων στη διατμητική αντοχή. Η πλειονότητα των δειγμάτων ετοιμάστηκαν και τοποθετήθηκαν στην συσκευή χωρίς συμπύκνωση. Στα δείγματα επιβλήθηκαν δοκιμές με φορτίο 50 kPa, 100 kPa, 200 kPa και 400 kPa. Δώδεκα δείγματα δοκιμάστηκαν σε σταθερό φορτίο και τα υπόλοιπα σε σταθερή ένταση (Διάγραμμα 2.4).

Σε αυτήν την εργασία οι παράμετροι της σταθερής φόρτισης *Mohr-Coulomb* φαίνεται να είναι μικρότερες από τις τιμές των άλλων –περιορισμένων- μελετών που έγιναν επί του θέματος. Αυτό μπορεί να αποδοθεί σε διάφορους παράγοντες, συμπεριλαμβανομένου της σύνθεσης των απορριμμάτων, του τρόπου διάτμησης (απευθείας διάτμηση, τριαξονική ή απλή διάτμηση), του χρησιμοποιηθέντος κριτηρίου διατμητικής αντοχής στην κατάσταση αστοχίας και ιδιαίτερα της έλλειψης συμπύκνωσης των δειγμάτων κατά την προετοιμασία των δοκιμών. Η μικρή διατμητική αντοχή των απορριμμάτων που τέθηκαν υπό συνεχές φορτίο αλλά και των δειγμάτων που δεν συμπυκνώθηκαν σημαντικά, δίνουν έμφαση στην πιθανότητα πολύ μικρής αντοχής στις χωματερές βιοδιάσπασης, όπου τα απορρίμματα τοποθετούνται με ελάχιστη προσπάθεια συμπύκνωσης.

Αν και τα δείγματα είχαν ίδια σύνθεση και στην πλειοψηφία τους ετοιμάστηκαν χωρίς συμπύκνωση, αυτά που έρχονταν από το Τέξας βρέθηκαν περισσότερο αδύναμα από αυτά του Μίσιγκαν. Αυτή η διαφορά μπορεί να οφείλεται στις διαφορές στα υλικά διάστασης μικρότερης των 20mm, τα οποία ήταν λεπτότερα και τα πλαστικά στα δείγματα του Τέξας. Επίσης, χρησιμοποιήθηκε το κριτήριο του 10% στην διατμητική παραμόρφωση και ενεργή γωνία τριβής μεταξύ 20° και 70°. Παρατηρήθηκε ότι η γωνία τριβής διαφέρει κατά 40° σε συνεχή ένταση και 20° σε συνεχές φορτίο. Όταν το οριζόντιο επίπεδο θεωρείται ως το επίπεδο αστοχίας, δηλαδή το επίπεδο εκτροπής, οι υπολογισθείσες γωνίες τριβής είναι μικρότερες. Ο βαθμός παραμόρφωσης βρέθηκε να επηρεάζει την αντοχή σε διάτμηση και στις δύο εξεταζόμενες περιπτώσεις φόρτισης. Παρατηρήθηκε αύξηση της τάξης του 15% στη διατμητική αντοχή, όταν ο βαθμός παραμόρφωσης αυξήθηκε από 0,25 σε 2,25% ανά λεπτό.



Εικόνα 2.6: ASU μεγάλης κλίμακας συσκευή για δοκιμές απλής διάτμησης (Yuan *et al.*, 2011).

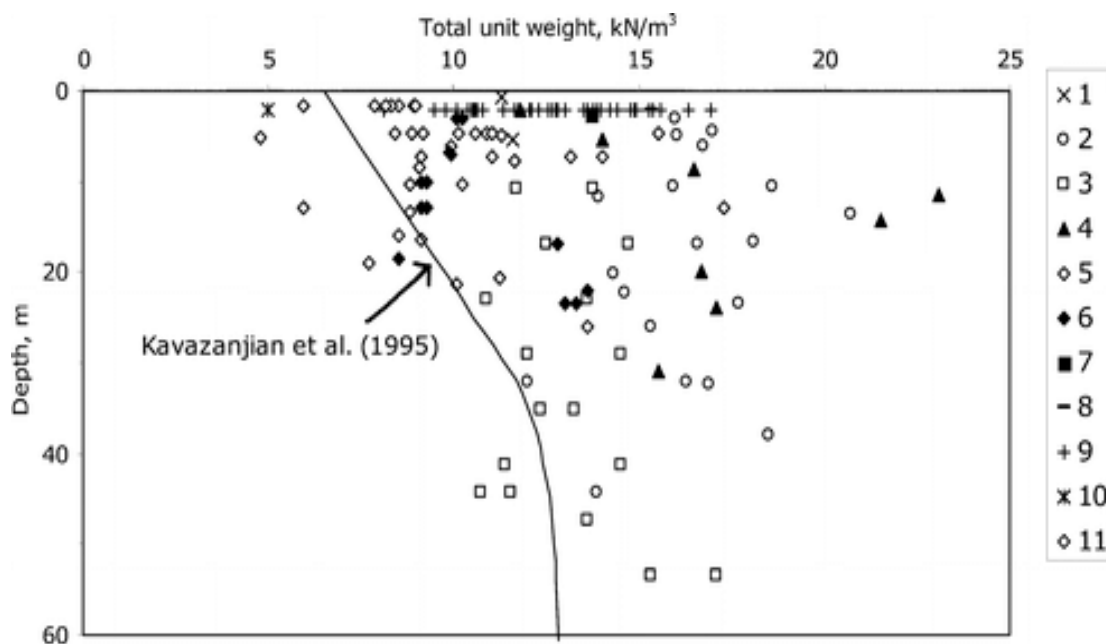
2.3 Ειδικό βάρος αστικών στερεών αποβλήτων

Το ειδικό βάρος (γ) των ΑΣΑ είναι μια κρίσιμη παράμετρος στη στατική και δυναμική απόκριση των χώρων υγειονομικής ταφής. Το ειδικό βάρος παίζει σημαντικό ρόλο στις περισσότερες τεχνικές αναλύσεις, συμπεριλαμβανομένης της στατικής και δυναμικής ευστάθειας του ΧΥΤΑ, της διάτμησης της γεωμεμβράνης, της σύνθλιψης σωλήνων και της αξιολόγησης της χωρητικότητας του ΧΥΤΑ. Ωστόσο, ο προσδιορισμός του ειδικού βάρους των ΑΣΑ εξακολουθεί να αποτελεί σημαντική πηγή αβεβαιότητας όσον αφορά τη μελέτη ενός χώρου υγειονομικής ταφής. Σημαντική διασπορά υπάρχει στις αναφερόμενες τιμές του ειδικού βάρους των ΑΣΑ. Ως εκ τούτου, είναι δύσκολο για έναν μηχανικό να υπολογίσει με ασφάλεια ένα αντιπροσωπευτικό προφίλ πυκνότητας αστικών αποβλήτων και είναι η πιο σημαντική παράμετρος για όλους τους διαφορετικούς τύπους αναλύσεων ΧΥΤΑ που αναφέρονται από τους Dixon και Jones (2005).

Η περιβαλλοντική γεωτεχνική μελέτη των Konig and Jessberger (1997), επικαλούμενη τα δεδομένα του Fassett (1993) και άλλων ερευνητών, αναφέρουν τιμές ειδικού βάρους από 3kN/m^3 για μη συμπιεσμένα ή ελάχιστα συμπιεσμένα απορρίμματα και έως 17kN/m^3 για συμπιεσμένα απορρίμματα. Όπως αναφέρθηκε από τους Zekkos *et al.* (2005b), οι τιμές του ειδικού βάρους των ΑΣΑ που αναφέρθηκαν σε 37 διαφορετικούς ΧΥΤΑ κυμαίνονται από 3 έως 20kN/m^3 . Η πλειοψηφία αυτών των μελετών δεν αναφέρουν τη μέθοδο που χρησιμοποιήθηκε. Οι Landna και Clark (1986) παρουσίασαν τα αποτελέσματα από τις επί τόπου δοκιμές κοντά σε επιφάνεια σε αρκετούς ΧΥΤΑ του Καναδά και τόνισαν τη διαφορά μεταξύ των απορριμμάτων, της κάλυψης του εδάφους. Η συνολική πυκνότητα κοντά στον χώρο υγειονομικής ταφής και η κάλυψη εδάφους

που υπολογίζεται από τα στοιχεία που αναφέρθηκαν από τους *Landva* και *Clark* (1986), κυμαίνονταν από 8 έως 17kN/m³. Πιθανώς, οι τιμές που αναφέρθηκαν από τους άλλους ερευνητές αντιπροσωπεύουν επίσης το ειδικό βάρος των απορριμμάτων/χώματος που καλύπτουν το μείγμα, καθώς αυτή είναι η σημαντική παράμετρος για την ανάλυση.

Το προφίλ ειδικού βάρους των ΑΣΑ των *Kavazanjian et al.* (1995) είναι ένα από τα πιο συχνά αναφερόμενα προφίλ ειδικού βάρους των ΑΣΑ. Αυτό το προφίλ αρχίζει από μια τιμή περίπου 6kN/m³ κοντά στην επιφάνεια και φτάνει περίπου 13kN/m³, για βάθη 4 m ή μεγαλύτερα (Διάγραμμα 2.5). Αναπτύχθηκε κυρίως με βάση τους κανονισμούς που αναφέρθηκαν από φορείς εκμετάλλευσης ΧΥΤΑ για σχετικά ξηρούς χώρους υγειονομικής ταφής, δηλαδή ΧΥΤΑ που σύμφωνα με τους περιορισμούς των νόμων στις ΗΠΑ δεν γίνεται η εισαγωγή υγρών αποβλήτων. Ωστόσο, οι μετέπειτα μελέτες έδειξαν ότι, ακόμη και για ξηρούς ΧΥΤΑ, οι τιμές του ειδικού βάρους στο προφίλ του 1995 ήταν σχετικά χαμηλές.



(1) Santo Tirso, Portugal (Gomes et al. 2002); (2) OII, California, USA (Matasovic and Kavazanjian, 1998); (3) Azusa, California, USA (Kavazanjian et al, 1996); (4) Tri-Cities, California, USA (this study); (5) no name older landfill (Oweis and Khera, 1998); (6) no name younger landfill (Oweis and Khera, 1998); (7) Hong Kong, China (Cowland et al. 1993); (8) Central Maine landfill, USA (Richardson and Reynolds, 1991); (9) 11 Canadian landfills (Landva & Clark, 1986); (10) Valdemingomez, Spain (Pereira et al. 2002); (11) Cherry Island landfill, Delaware, USA (Geosyntec, 2003);

Διάγραμμα 2.5: Διάγραμμα πυκνότητας (kN/m³)-βάθος (m) (*Kavazanjian et al.*, 1995).

Ο *Kavazanjian* (1999) εξηγεί ότι η καμπύλη υποτίθεται ότι αναφέρει τιμές ειδικού βάρους που αντιπροσωπεύουν τη συνολική πυκνότητα του εδάφους και των απορριμμάτων όταν στην πραγματικότητα αντιπροσώπευαν μόνο τη μάζα των απορριμμάτων στη μονάδα όγκου του ΧΥΤΑ. Ως εκ τούτου, στις επόμενες εργασίες, αυτό το προφίλ του 1995 προσαρμόστηκε προς τα πάνω

για να υπολογίσει την ημερήσια και προσωρινή κάλυψη εδάφους που συνήθως τοποθετείται στον χώρο υγειονομικής ταφής πάνω από τα απορρίμματα. Οι *Kavazanjian et al.* (1996) αναφέρουν τις τιμές βάρους ανά μονάδα ΑΣΑ από 10 έως 13kN/m³ κοντά στην επιφάνεια του εδάφους, αυξάνοντας τις τιμές σε 13-16kN/m³ σε βάθος 30m σε έξι ΧΥΤΑ στην Καλιφόρνια (Διάγραμμα 2.5). Οι *Matasovic και Kavazanjian* (1998) ανέφεραν τιμές που κυμαίνονται από 14-18kN/m³ σε βάθος 10m.

Η επίδραση της πυκνότητας, ειδικά στις δυναμικές αναλύσεις, είναι πολύ μεγάλη. Για παράδειγμα, η δύναμη διάτμησης αργίλου/γεωσύνθεσης στο εσωτερικό του συστήματος επένδυσης στη βάση του ΧΥΤΑ αποτελεί συνάρτηση του φόρτου υπερφόρτωσης, το οποίο εξαρτάται άμεσα από το βάρος μονάδας των ΑΣΑ. Το προφίλ επηρεάζει επίσης την αξιολόγηση της χωρητικότητας ενός ΧΥΤΑ. Οι *Matasovic and Kavazanjian (1998)* αναφέρουν ότι ένας ΧΥΤΑ ύψους 60m με μέσο ειδικό βάρος 10kN/m³ θα έχει εκτιμηθείσα χωρητικότητα απόρριψης 40% λιγότερη από ένα χώρο υγειονομικής ταφής με μέσο ειδικό βάρος 15kN/m³, όπως μετρήθηκε επί τόπου στη λειτουργία του ΧΥΤΑ ΟΙΙ.

Ακόμα, η τιμή του ειδικού βάρους μπορεί να έχει ευεργετική ή επιβλαβή επίδραση, ανάλογα με την περίοδο ταλάντωσης ΧΥΤΑ (την οποία και επηρεάζει) και της επικρατούσας περιόδου του σεισμού. Δεν είναι μόνο το μέσο βάρος μονάδας αλλά και η κατανομή του βάρους εντός του ΧΥΤΑ που επηρεάζει τη σεισμική απόκριση. Τα αποτελέσματα των φασμάτων απόκρισης των επιταχύνσεων έχουν σημαντικές διαφορές όσον αφορά την ένταση της υπολογισθείσας κίνησης στην κορυφή σε σύγκριση με τη βάση ή τις πλευρές του ΧΥΤΑ. Οι μετατοπίσεις επηρεάζονται επίσης από την κατανομή του ειδικού βάρους των ΑΣΑ.

Η ακατάλληλη επιλογή στην κατανομή του ειδικού βάρους των ΑΣΑ σε σχέση με το βάθος μπορεί να οδηγήσει σε αναξιόπιστα αποτελέσματα. Για παράδειγμα, ο *Zekkos (2005)* έδειξε ότι η χρήση δύο διαφορετικών προφίλ ειδικού βάρους ΑΣΑ που έχουν το ίδιο μέσο ειδικό βάρος 10,5kN/m³ οδηγεί σε σημαντικές διαφορές στις μετατοπίσεις της κάλυψης των ΧΥΤΑ. Οι *Zekkos et al. (2005)* συνοψίζουν τις μεθόδους που χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση του ειδικού βάρους των αστικών αποβλήτων, τα αρχεία με τοπογραφική έρευνα, το μοναδιαίο βάρος των δειγμάτων και τις επί τόπου δοκιμές μεγάλης κλίμακας. Τα αρχεία υγειονομικής ταφής επιτρέπουν την εκτίμηση του βάρους του παραλαμβανόμενου υλικού του ΧΥΤΑ, ενώ η τοπογραφική έρευνα επιτρέπει τον υπολογισμό του όγκου της υγειονομικής ταφής. Έτσι, μπορεί να εκτιμηθεί το ειδικό βάρος σε κάθε θέση.

Δυστυχώς, αυτή η μέθοδος δεν είναι αξιόπιστη για την αξιολόγηση της κατανομής του ειδικού βάρους του ΧΥΤΑ (δηλαδή, τη μεταβολή του γ_{MSW} με το βάθος). Εάν υπάρχει ένα δείγμα ΑΣΑ που να έχει ανακτηθεί ανέπαφο, το ειδικό βάρος ΑΣΑ μπορεί να αξιολογηθεί εύκολα. Αλλά, αυτή η μέθοδος είναι αμφισβητήσιμη λόγω έλλειψης επάρκειας μεθόδων δειγματοληψίας, μεγάλων δειγμάτων και αναπόφευκτη διαταραχή του δείγματος. Εναλλακτική μέθοδος είναι η επιτόπια δοκιμή μεγάλης κλίμακας, που είναι ουσιαστικά η δοκιμή τυπικής πυκνότητας άμμου-κώνου (*ASTM D1556-07*). Σε αυτήν τη μέθοδο, ένα μεγάλο τμήμα ανασκάπτεται και ζυγίζεται το εκσκαφθέν υλικό. Βαθμονομημένο γεωυλικό (π.χ., χαλίκι) με γνωστό βάρος χρησιμοποιείται για να γεμίσει το λάκκο έτσι ώστε ο όγκος του λάκκου να μπορεί να υπολογισθεί. Γνωρίζοντας το βάρος και τον όγκο των ανασκαφθέντων αστικών απορριμμάτων, μπορεί να αξιολογηθεί το μέσο ειδικό βάρος.

Μεταξύ των τριών μεθόδων, θεωρείται ότι η επιτόπια δοκιμή μεγάλης κλίμακας είναι η πιο αξιόπιστη μέθοδος αξιολόγησης του ειδικού βάρους των ΑΣΑ (*Zekkos 2005*). Οι *Zekkos et al. (2006)* πραγματοποίησαν μεγάλης κλίμακας επιτόπια δοκιμή ειδικού βάρους, με δεδομένα από ΧΥΤΑ διαφόρων χωρών και ανέφεραν ότι η πλειονότητα των τιμών κυμαίνεται μεταξύ 8 και 16kN/m³ έως και βάθος 60m. Από τη μελέτη παρατηρήθηκε ότι το ειδικό βάρος των ΑΣΑ αυξήθηκε ανάλογα με το βάθος, όπως έχει αναφερθεί και από τους *Zekkos et al. (2006, 2008)* και *Matasovic and Kavazanjian (1998)*.

Σε αυτήν τη μελέτη, το ειδικό βάρος των ΑΣΑ θεωρήθηκε ανάλογο με την ταχύτητα των διατμητικών κυμάτων (*Zekkos et al., 2008*). Οι πυκνότητες των γεωτεχνικών υλικών υπολογίζονται λαμβάνοντας υπόψη τη σχέση ταχύτητας και πυκνότητας των διακυμάνσεων των κυμάτων που προτάθηκε από τους *Anbazhagan et al. (2015)* για τις πρώτες δοκιμές και για τους άλλους δύο τύπους δοκιμών έγινε χρήση της Εξίσωσης (2.2) που προσδιορίστηκε από τους *Zekkos et al. (2005)*, που αναφέρεται αναλυτικά παρακάτω.

Οι *Zekkos et al. (2005)* ανέφεραν παράγοντες που επηρεάζουν το ειδικό βάρος των ΑΣΑ βασισμένο σε μεγάλης κλίμακας εργαστηριακές δοκιμές. Η σχέση μεταξύ της πυκνότητας των ΑΣΑ και του επιπέδου τάσης μπορεί να περιγραφεί από μια υπερβολική εξίσωση. Επιπροσθέτως, η επίδραση του χρόνου πρακτικά δεν είναι σημαντική. Δεδομένου ότι εξετάζεται μόνο η μηχανική συμπίεση, υπάρχει αύξηση κατά λιγότερο από 10% του ειδικού βάρους των ΑΣΑ και οφείλεται στον χρόνο που βρίσκονται συμπιεσμένα για 50 χρόνια, δηλαδή όσα χρόνια θεωρείται βιοχημικά ενεργός ένας ΧΥΤΑ.

Οι Zekkos *et al.* (2006a) πρότειναν ένα μοντέλο για το προφίλ του ειδικού βάρους με υπερβολική μορφή, η οποία εκφράζεται από την Εξίσωση (2.2). Κατά τη χρήση αυτού θα πρέπει να επιλεγεί το αντιπροσωπευτικό προφίλ με βάση την αναμενόμενη επιφάνεια της κατανομής της μονάδας του βάρους:

$$\gamma_{msw} = \gamma_{\varepsilon} + \frac{z}{\alpha_{\gamma} + \beta_{\gamma} * z} \quad \text{Εξίσωση (2.2)}$$

όπου:

γ_{msw} : πυκνότητα αστικών αποβλήτων , γ_{ε} : πυκνότητα επιφάνειας κοντά στην επιφάνεια (kN/m^3),

z : ύψος σε m,

α_{γ} : m^4/kN , β_{γ} : m^3/kN είναι παράμετροι μοντελοποίησης (Πίνακας 2.2).

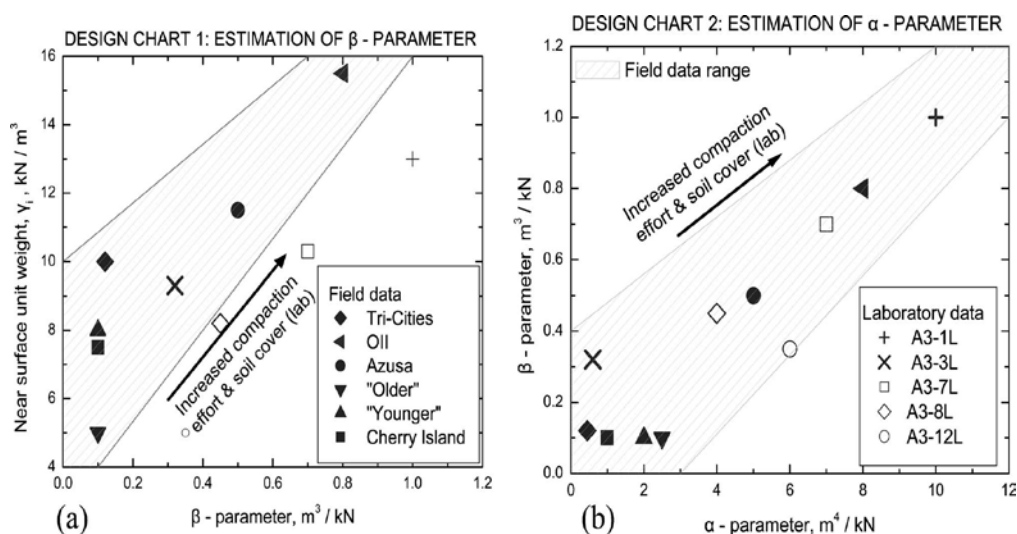
Ποσότητα εδάφους	γ_{msw} (kN/m^3)	α_{γ} (m^4/kN)	β_{γ} (m^3/kN)
Χαμηλή	5	2	0.1
Τυπική	10	3	0.2
Υψηλή	15.5	6	0.9

Πίνακας 2.2: Παράμετροι της Εξίσωσης (2.2) για διαφορετική προσπάθεια συμπίεσης και ποσότητα κάλυψης εδάφους (Zekkos *et al.*, 2006a).

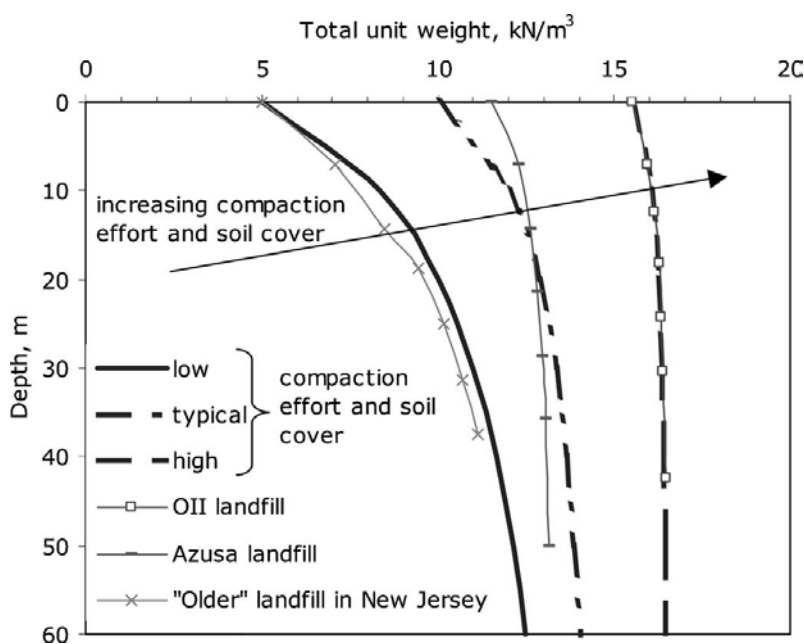
Η παράμετρος β δίνεται ως συνάρτηση της διαφοράς του ειδικού βάρους στην επιφάνεια και σε μεγάλο βάθος. Σε μεγάλο βάθος το προφίλ του ειδικού βάρους γίνεται σχεδόν συνεχές. Το αντίστροφο του β είναι η ασυμπτωτική τιμή της διαφοράς στο ειδικό βάρος σε μεγάλο βάθος και στην επιφάνεια. Συνήθως, κυμαίνεται μεταξύ 0 και $1\text{m}^3/\text{kN}$. Εάν το ειδικό βάρος σε μεγάλο βάθος είναι κοντά στην πυκνότητα στην πλησιέστερη επιφάνεια, το β είναι περίπου $1\text{m}^3/\text{kN}$. Εάν το βάρος μονάδας είναι σε βάθος πολύ μεγαλύτερο από εκείνο κοντά στην επιφάνεια, τότε το β προσεγγίζει το μηδέν. Εάν $\beta = 0$, τότε το ειδικό βάρος αυξάνεται γραμμικά με το βάθος και δεν προσεγγίζει μια ασυμπτωτική τιμή. Τιμές του β μεγαλύτερες από $1\text{m}^3/\text{kN}$ είναι πιθανές αλλά δεν επηρεάζουν σημαντικά το σχήμα της υπερβολής.

Η παράμετρος α δίνεται ως συνάρτηση του ρυθμού αύξησης του ειδικού βάρους με το βάθος κοντά στην επιφάνεια. Ο λόγος $1/\alpha$ είναι η αρχική κλίση της καμπύλης του ειδικού βάρους ως προς το βάθος κοντά στην επιφάνεια. Η παράμετρος α παίρνει τιμές συνήθως μέσα σε ένα εύρος τιμών από 0 έως $10\text{m}^4/\text{kN}$. Αν το ειδικό βάρος αυξηθεί σημαντικά σε ρηχά βάθη, τότε πρέπει να χρησιμοποιηθούν μικρές τιμές του α . Εάν το ειδικό βάρος δεν αυξάνεται σημαντικά

κοντά στην επιφάνεια, τότε θα πρέπει να είναι μεγαλύτερες οι τιμές του α . Το Διάγραμμα 2.6 απεικονίζει τον τρόπο με τον οποίο οι τιμές των α και β επηρεάζουν το προφίλ του ειδικού βάρους των αστικών αποβλήτων.



Διάγραμμα 2.6: Υπολογισμός παραμέτρων α , β (Zekkos, 2006).



Διάγραμμα 2.7: Προτεινόμενα προφίλ πυκνότητας για συμβατικά στερεά απορρίμματα από τους ΧΥΤΑ OII, Azusa, New Jersey (Zekkos et al., 2006).

Οι Zekkos et al. (2006α) παρέχουν συστάσεις για την επιλογή κατάλληλου χώρου υγειονομικής ταφής με χαρακτηριστικό προφίλ πυκνότητας για τρεις περιπτώσεις (Διάγραμμα 2.7): 1) ανάλυση ή σχεδιασμός βασισμένα σε ολοκληρωμένη γεωτεχνική έρευνα, 2) ανάλυση ή σχεδιασμός με βάση περιορισμένη έρευνα, και 3) ανάλυση ή σχεδιασμός μελλοντικής χωματερής

(δηλαδή χωρίς διερεύνηση). Σε γενικές γραμμές, η αξιολόγηση του ειδικού βάρους αστικών αποβλήτων πραγματοποιείται με τη χρήση δοκιμαστικών κοιλοτήτων (δηλαδή, για κοντινή επιφάνεια) και μεγάλης διαμέτρου γεωτρήσεις (δηλαδή, για μεγαλύτερο βάθος). Ταυτόχρονα, ο όγκος του εκσκαφθέντος υλικού μπορεί να εκτιμηθεί χρησιμοποιώντας μετρήσεις ερευνών ή χρησιμοποιώντας ένα "βαθμονομημένο" υλικό.

2.4 Φυσικός χαρακτηρισμός των αστικών αποβλήτων

Η σύνθεση των αποβλήτων είναι ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες που επηρεάζουν τις μηχανικές ιδιότητες τους. Ο φυσικός χαρακτηρισμός των αστικών αποβλήτων απαιτεί μια ποιοτική και ποσοτική διαδικασία αξιολόγησης της σύνθεσής τους. Οι διαδικασίες χαρακτηρισμού των αποβλήτων έχουν αναπτυχθεί για ποικίλες εφαρμογές, συμπεριλαμβανομένου του γεωχημικού χαρακτηρισμού, του χαρακτηρισμού της ροής αποβλήτων και του γεωτεχνικού χαρακτηρισμού. Αρκετές διαδικασίες χαρακτηρισμού των ΑΣΑ για γεωτεχνικούς σκοπούς έχουν προταθεί από τις αρχές της δεκαετίας του 1990 (π.χ., *Landva and Clark 1990, Grisolia et al. 1995*). Η ανάπτυξη αυτών των διαδικασιών αποσκοπούσε στη συλλογή σχετικών πληροφοριών σχετικά με τα απορρίμματα σε σχέση με τη γεωτεχνική τους απόκριση, όπως η αντοχή διάτμησης, η υδραυλική αγωγιμότητα, η δυσκαμψία και η συμπίεστικότητα. Ουσιαστικά, η βάση των πρώτων συστημάτων ταξινόμησης των ΑΣΑ για γεωτεχνικούς σκοπούς ήταν η διάκριση μεταξύ αποικοδομήσιμων και μη αποικοδομήσιμων συστατικών των αποβλήτων. Οι *Dixon και Langer (2006)* διαπίστωσαν ότι κανένα από τα υπάρχοντα συστήματα ταξινόμησης αποβλήτων δεν πληρούσε τις απαιτήσεις ενός λεπτομερούς συστήματος ταξινόμησης και πρότειναν το δικό τους πλαίσιο ταξινόμησης. Επίσης, το σύστημα ταξινόμησης *Dixon και Langer (2006)* απαιτεί σημαντικό επίπεδο προσπάθειας και προοριζόταν κυρίως για ερευνητικούς σκοπούς. Συνεπώς, αυτή η προσέγγιση μπορεί να είναι πολύ χρονοβόρα για χρήση στην πράξη.

Οι *Zekkos et al. (2010)* πρότειναν μια διαδικασία φυσικού χαρακτηρισμού των αστικών αποβλήτων για γεωτεχνικούς σκοπούς. Η προτεινόμενη διαδικασία έχει σχεδιαστεί για να προσδιοριστούν τα χαρακτηριστικά των ΑΣΑ που μπορεί να έχουν σημαντική επίδραση στις μηχανικές τους ιδιότητες. Αυτή η διαδικασία αποτελείται από τέσσερις φάσεις: 1) συλλογή και ανασκόπηση διαθέσιμων πληροφοριών, 2) χαρακτηρισμός πεδίου, 3) πρωτογενής γεωτεχνικός χαρακτηρισμός, και 4) δευτερογενής γεωτεχνικός χαρακτηρισμός.

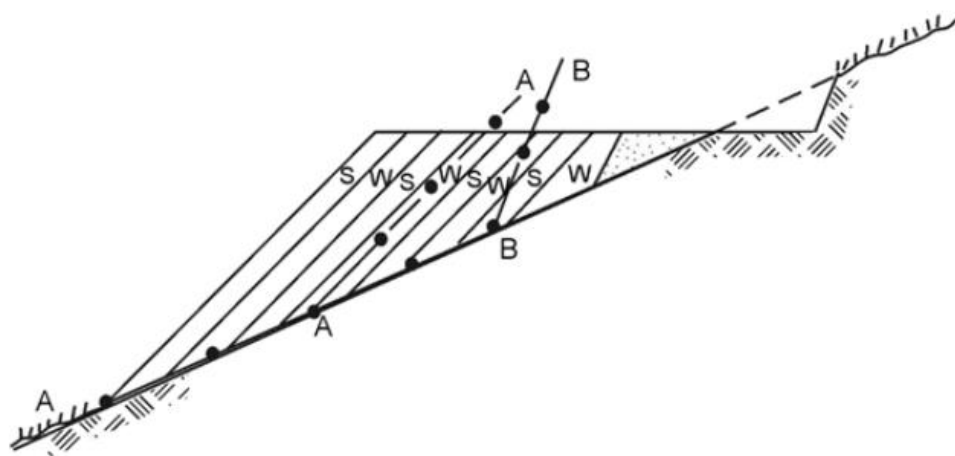
Στις πρώτες φάσεις συλλέγονται περισσότερες ποιοτικές πληροφορίες για μεγάλο όγκο αστικών απορριμμάτων και στη συνέχεια συλλέγονται ποσοτικές πληροφορίες για μικρό όγκο. Αυτό το σύστημα χαρακτηρισμού απαιτεί τον διαχωρισμό των συστατικών των αποβλήτων σε υλικό μεγαλύτερο από 20mm (κυρίως απορρίμματα) και μικρότερο από 20mm (κυρίως έδαφος), ο οποίος εκτελείται στη φάση 3. Στη φάση 4, τα συστατικά των αποβλήτων χαρακτηρίζονται με περισσότερες λεπτομέρειες για την αξιολόγηση της σύνθεσης των αποβλήτων (δηλ. ποσοστό επί τοις εκατό κατά βάρος χαρτιού, μαλακών πλαστικών, κ.λπ.) και πραγματοποιούνται μετρήσεις όπως η υγρασία και το οργανικό περιεχόμενο.

2.5. Αστοχίες χώρων υγειονομικής ταφής απορριμμάτων

Η αμέλεια των ανθρώπων απέναντι στα στερεά απορρίμματα ευτυχώς άρχισε να μειώνεται από τις αρχές του 20ού αιώνα. Έκτοτε, η παραγωγή στερεών αποβλήτων αυξήθηκε τόσο ως προς την ποσότητα όσο και ως προς την ποικιλία των ειδών, με αποτέλεσμα η τοποθέτηση σε χώρους υγειονομικής ταφής να γίνει ένα μείζον περιβαλλοντικό ζήτημα. Ωστόσο, πριν από δύο δεκαετίες, η ευστάθεια των ΧΥΤΑ άρχισε να απασχολεί ολοένα και περισσότερο καθώς διευρυνόταν η χρήση τους. Τα τελευταία χρόνια, σημειώθηκαν αστοχίες σε όλο τον κόσμο (π.χ., στον ΧΥΤΑ της *Bandung* στην Ινδονησία και στον χώρο υγειονομικής ταφής *Payatas* στις Φιλιππίνες), που αποδεικνύουν ότι πρέπει να γίνουν περισσότερες έρευνες στην ανάλυση της υγειονομικής ταφής, για την αποφυγή της απώλειας ανθρώπινων ζώων και σημαντικών περιβαλλοντικών και οικονομικών επιβαρύνσεων. Επίσης, και στη Βόρεια Αμερική υπήρξαν μεγάλες αστοχίες στη κλίση των χώρων υγειονομικής ταφής (π.χ., *Rumpke*, *Kettleman* και *Maine*). Ευτυχώς, αυτές οι αστοχίες δεν προκάλεσαν απώλειες ζωής, αλλά προκάλεσαν σοβαρά περιβαλλοντικά προβλήματα, όπως η εισβολή των αποβλήτων των χώρων υγειονομικής ταφής σε χαμηλότερα εδάφη, ο αποκλεισμός των οδών και η μόλυνση των ποταμών κατάντη λόγω διήθησης, η οποία επηρέασε τη ζωή χιλιάδων κατοίκων των κοντινών περιοχών (*Seed et al.*, 1990; *Stark and Eid*, 2000; *Koerner and Snoog*, 2000).

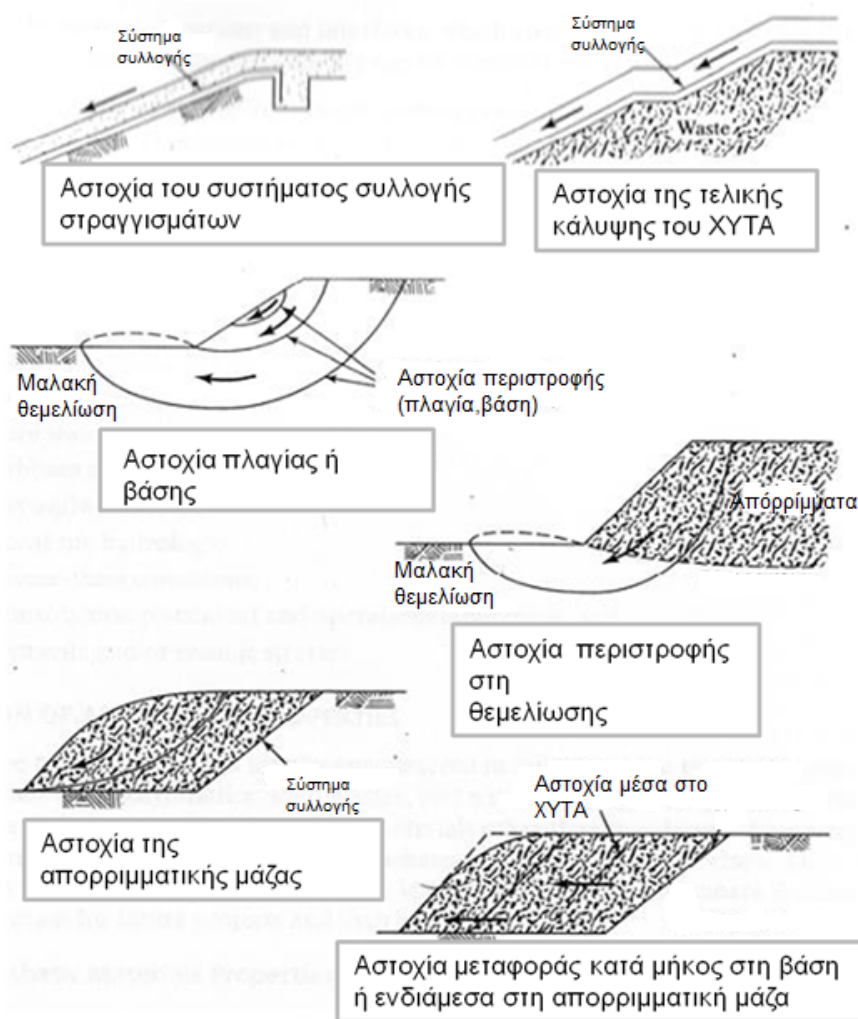
Αστοχίες σε ΧΥΤΑ έχουν συμβεί κατά τη διάρκεια της κατασκευής τους, του χρόνου λειτουργίας τους ή μετά το κλείσιμό τους. Οι επιφάνειες αστοχίας ήταν κυρίως στα απορρίμματα, στη γεωσυνθετική μόνωση του εδάφους ή και ανάμεσα στις στρώσεις των αστικών αποβλήτων. Αυτές οι αστοχίες έχουν καταστροφικά αποτελέσματα, συμπεριλαμβανομένης της απώλειας περιουσίας και ρύπανσης του περιβάλλοντος, της μόλυνσης των υπόγειων και επιφανειακών υδάτων.

Η αστοχία ενός χώρου υγειονομικής ταφής αρχίζει συνήθως με μια τεράστια συρόμενη μάζα και στη συνέχεια παραμορφώνεται και διασπάται σε πολλά ανεξάρτητα κομμάτια (Stark, 1999). Η αστοχία μπορεί να ξεκινήσει από τις αδύναμες επιφάνειες μέσα στο υλικό των αποβλήτων ή τη διεπαφή αποβλήτων-επένδυσης. Οι αδύναμες επιφάνειες εντός των αποβλήτων μπορούν να είναι εκείνες που διαχωρίζουν τα απορρίμματα σε καλοκαιρινές-χειμερινές στρώσεις. Η Εικόνα 2.7 δείχνει τις πιθανές περιπτώσεις αστοχίας λόγω των εποχιακών μεταβολών στη σύνθεση αποβλήτων στον χώρο υγειονομικής ταφής (Blight, 2008). Η διαφορετική αντοχή διατμήσεως μεταξύ των αποβλήτων και των επενδύσεων μπορεί να δικαιολογήσει την αστοχία στη διεπαφή, στις στρώσεις των αποβλήτων και του μονωτικού υλικού.



Εικόνα 2.7: Αλλαγές στα απορρίμματα ανάλογα τη εποχή (S: καλοκαίρι, W: χειμώνας) πιθανή αστοχία AAA ή BBAA (Blight, 2008).

Οι Qian *et al.* (2001) απεικόνισε έξι κύριες αστοχίες των ΧΥΤΑ εντός της επένδυσης καλύμματος, των αποβλήτων και του εδάφους θεμελίωσης ή των διεπαφών τους, οι οποίες χαρακτηριστικές αστοχίες παρουσιάζονται στην Εικόνα 2.8. Οι αρχικές δύο αστοχίες, αν και εξαιρετικά σημαντικές, μπορούν να αποφευχθούν απλά με ανάλυση και να διορθωθούν με λογικό κόστος σε περίπτωση αστοχίας. Οι άλλοι τρόποι αστοχίας έχουν πιο σοβαρή φύση (Εικόνα 2.8). Συγκεκριμένα, κάποιες αστοχίες είναι οι πιο κρίσιμες και τέτοιες είναι οι περιπτώσεις μαζικών αστοχιών που σημειώθηκαν στους ΧΥΤΑ με μεγάλο κόστος.



Εικόνα 2.8: Αστοχίες ΧΥΤΑ (Qian, 2001).

Παράμετροι (παρατηρούμενο ύψος και κλίση του χώρου υγειονομικής ταφής) που διευκολύνουν την ολισθαίνουσα επιφάνεια και αυξάνουν την πιθανότητα αστοχίας, είναι η πίεση των πόρων, οι συνθήκες που επικρατούν στον χώρο υγειονομικής ταφής, το ειδικό βάρος, πως γίνεται η κάλυψη και η αποκατάσταση του χώρου υγειονομικής ταφής, εάν χρησιμοποιούνται ενδιάμεσα στρώματα κάλυψης εδάφους ή όχι, κ.λπ. Αυτά θα πρέπει να καθορίζονται όσο το δυνατόν ακριβέστερα για να διεξαχθεί μια ρεαλιστική και αξιόπιστη ανάλυση.

Ως εκ τούτου, είναι ζωτικής σημασίας να εκτελείται μια εκτεταμένη έρευνα αναγνώρισης πεδίου, αμέσως μετά την αστοχία, συμπεριλαμβανομένης της καταγραφής των αυτόπτων μαρτύρων. Επίσης, βασικοί παράμετροι είναι τα στοιχεία της πρόσφατης ιστορίας της τοποθέτησης των αποβλήτων, των βροχοπτώσεων, κ.λπ. Περισσότερες αναλύσεις περιπτώσεων και εργαστηριακές δοκιμές και δοκιμές πεδίου έχουν δείξει ότι είναι απαραίτητη η γνώση της

διατμητικής αντοχής για τα νέα απορρίμματα και τα υποβαθμισμένα (παλιά) απορρίμματα, διότι βοηθάει στην καλύτερη κατανόηση της συμπεριφοράς των ΑΣΑ έναντι διατμητικής καταπόνησης. Από την εργασία των *Stark et al.* (2007) προτείνεται $c' = 6\text{kPa}$ και $\phi' = 35^\circ$ για κανονικές καταπονήσεις μικρότερες από 200kPa, και $c' = 30\text{kPa}$ και $\phi' = 30^\circ$ για κανονικές καταπονήσεις περισσότερο από 200kPa.

2.5.1 Αστάθεια ΧΥΤΑ λόγω νερού

Η υπερβολική πίεση νερού των πόρων είναι ο πιο σημαντικός λόγος στη αστάθεια των ΧΥΤΑ (*Merry et al., 2005; Koerner and Snoog, 2000; Bauer et al., 2008; Blight, 2008; Koelsch, 2005*). Η ανύψωση της στάθμης του νερού προκαλεί την υπερβολική πίεση του νερού των πόρων και συνεπώς τη μείωση της ενεργής τάσης και κινητοποιεί την αστοχία λόγω διάτμησης. Η ανύψωση της στάθμης του νερού μπορεί να συμβεί λόγω:

α. Έντονης βροχόπτωσης: έχουν παρατηρηθεί σε πολλούς ΧΥΤΑ με μεγάλες αστοχίες, μηχανισμοί ενεργοποίησης της αστοχίας λόγω της υπερβολικής πίεσης του νερού των πόρων (*Bauer et al., 2008*). Παράδειγμα, στο *Payatas* των Φιλιππίνων παρατηρήθηκαν δέκα ημέρες βροχόπτωσης πριν από την αστοχία του ΧΥΤΑ. Στη *Bandung* της Ινδονησίας τρεις ημέρες βροχόπτωσης πριν από την αστοχία.

β. Προβλημάτων στο σύστημα διήθησης: λόγω των προβλημάτων αποστράγγισης ή ακατάλληλης επανακυκλοφορίας, τα στραγγίσματα συσσωρεύονται σε συγκεκριμένα σημεία στους ΧΥΤΑ που 'λειτούργούν' ως μηχανισμοί ενεργοποίησης της αστοχίας της υγειονομικής ταφής (*Koerner και Snoog, 2000*).

γ. Συσσωρεμένου αερίου μέσα στον ΧΥΤΑ: Οι *Merry et al.* (2005) πίστευαν ότι η βιοαποικοδόμηση των αποβλήτων μπορεί να παράγει παγιδευμένο αέριο (βιοαέριο) σε ΧΥΤΑ και να αυξήσει την πίεση του νερού των πόρων σε υψηλό επίπεδο κορεσμού των απορριμμάτων.

δ. Των συσκευασιών από πλαστικές σακούλες: παραδόξως, η αστοχία του ΧΥΤΑ στη Μπογκοτά στην Κολομβία (1997), οδηγεί στο συμπέρασμα ότι οι πλαστικές σακούλες στα σώματα των απορριμμάτων στις στρώσεις των ΧΥΤΑ μπορούν να συγκρατήσουν το νερό και να επηρεάσουν την αντοχή διάτμησης (*Blight, 2008*). Η χρήση πλαστικών σακούλων οδήγησε σε υψηλότερη οριζόντια διαπερατότητα και όχι σε κατακόρυφη, με αποτέλεσμα τη συγκράτηση

νερού. Επιπλέον, η αντοχή διατμήσεως θα μπορούσε ενδεχομένως να μειωθεί στη διεπιφάνεια των πλαστικών με τα απορρίμματα.

Ένας πρακτικός τρόπος υπολογισμού της πίεσης του νερού των πόρων στην επιφάνεια ολίσθησης είναι ο λόγος πίεσης πόρων (R_u) που είναι ίσος με:

$$R_u = (\gamma_{\text{νερού}} * h_{\text{νερού}}) / (\gamma_{\text{αποβλ.}} * h_{\text{αποβλ.}}) \quad \text{Εξίσωση (2.3)}$$

όπου

$\gamma_{\text{νερού}}$: είναι το μοναδιαίο βάρος του νερού,

$h_{\text{νερού}}$: είναι το ύψος του νερού στην επιφάνεια ολίσθησης,

$\gamma_{\text{αποβλ.}}$: είναι το μοναδιαίο βάρος του ΑΣΑ, και

$h_{\text{αποβλ.}}$: είναι το ύψος των ΑΣΑ από την επιφάνεια ολίσθησης στην κορυφή του χώρου υγειονομικής ταφής.

Για παράδειγμα, ο λόγος πίεσης του νερού που μετράται από τον πόρο σε μια κορεσμένη κλίση των αποβλήτων στη θέση του *Brock West* στο Οντάριο έχει δείξει ότι η τιμή είναι περίπου ίση με 0,2 για σταθερή κλίση (*Dewaele et al.*, 2005).

2.5.2 Γεωμετρία του ΧΥΤΑ

Το ύψος και η κλίση του πρανούς αποτελούν τις κύριες γεωμετρικές παραμέτρους της χωματερής που επηρεάζουν τη ευστάθειά της (*Omari*, 2012). Βασικά, η αντοχή διατμήσεως των απορριμμάτων εξαρτάται από τη γεωμετρία της θέσης. Η αστοχία του χώρου υγειονομικής ταφής θα συμβεί όταν η κλίση και το ύψος έχουν τιμές μεγαλύτερες από τις επιτρεπόμενες (*Koelsch*, 2007). Παραδείγματος χάριν, η αστοχία σε ΧΥΤΑ των ΗΠΑ (*Rampke*, 1996) συνέβη όταν το ύψος του ΧΥΤΑ υπερέβει το ανεκτό ύψος κατά 13 έως 15m (*Stark and Eid*, 2000). Επίσης, η κλίση του ΧΥΤΑ γύρω από τη ζώνη αστοχίας στο ΧΥΤΑ του *Payatas*, των Φιλιππινών εκτιμήθηκε σε 1.5 H: 1V (*Merry et al.*, 2005). Γενικά, η απουσία μελέτης ή η έλλειψη ορθού σχεδιασμού, είναι εμφανείς στην αστοχία των ΧΥΤΑ με μεγάλο ύψος και απότομη πλευρική κλίση.

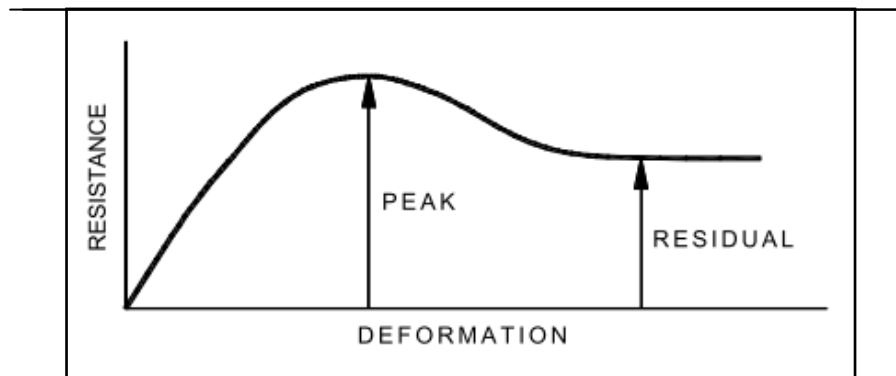
Οι χώροι υγειονομικής ταφής των σύγχρονων αστικών στερεών αποβλήτων πρέπει να είναι ευσταθείς, παρόλο που συνεχώς αυξάνεται το μέγεθός τους για να καλυφθούν οι αυξανόμενες ποσότητες και η μεγιστοποίηση της ικανότητας περιορισμού των αποβλήτων. Έτσι, γίνεται όλο και πιο συνηθισμένο να φτάνουν οι ΧΥΤΑ το ύψος των 100m ή περισσότερο. Οι ΧΥΤΑ με μεγάλο ύψος πρέπει να παραμείνουν ευσταθείς υπό στατικά και δυναμικά φορτία. Παρά ταύτα, οι αστάθειες των ΧΥΤΑ συνεχίζουν να εμφανίζονται (π.χ., *Eid et al.*, 2000; *Huvaj-Sarihan and Stark*, 2008; *Jafari et al.*, 2013; *Zekkos et al.*, 2014).

Πιθανώς η πιο κρίσιμη αρχική παράμετρος εισόδου για την αξιολόγηση της ευστάθειας των πρανών ΧΥΤΑ είναι η διατμητική αντοχή των ΑΣΑ. Γι' αυτό το θέμα έχει διεξαχθεί ένας μεγάλος αριθμός μελετών για την εκτίμηση της διατμητικής αντοχής των ΑΣΑ στο εργαστήριο, χρησιμοποιώντας πειραματικές δοκιμές μεγάλου μεγέθους. Δοκιμές που έχουν διάμετρο δείγματος ή πλάτος που είναι τουλάχιστον 300mm ανήκουν σε αυτή την κατηγορία σύμφωνα με πολλές έρευνες (Bray *et al.* 2009, Αθανασόπουλος 2011, Zekkos 2017). Δοκιμές μικρών δειγμάτων ΑΣΑ συνήθως δεν συνιστώνται, επειδή τα τμήματα των αποβλήτων θα πρέπει να εξαιρεθούν ή να τεμαχιστούν για να πραγματοποιηθεί η δοκιμή (Zekkos *et al.* 2008, Αθανασόπουλος 2011). Σε διάφορες δοκιμές, έχει διεξαχθεί δοκιμή άμεσης διατμήσεως μεγάλης κλίμακας (π.χ., Landva και Clark 1990, Edinçiler *et al.* 1996, Kavazanjian *et al.* 1999, Mazzucato *et al.* 1999, Pelkey *et al.* 2001, Caicedo *et al.* 2002, Mahler και DeLamareNetto 2003, Dixon *et al.* 2008, Singh *et al.* 2009, Zekkos *et al.* 2010α, 2013, Bareither *et al.* 2012). Επίσης, έχουν γίνει δοκιμές τριαξονικής διατμήσεως μεγάλης κλίμακας (π.χ., Jessberger και Kockel 1993, Grisolia *et al.* 1995, Bauer *et al.* 1999, Harris *et al.* 2006, Zekkos *et al.* 2012, Ramaiah *et al.* 2014).

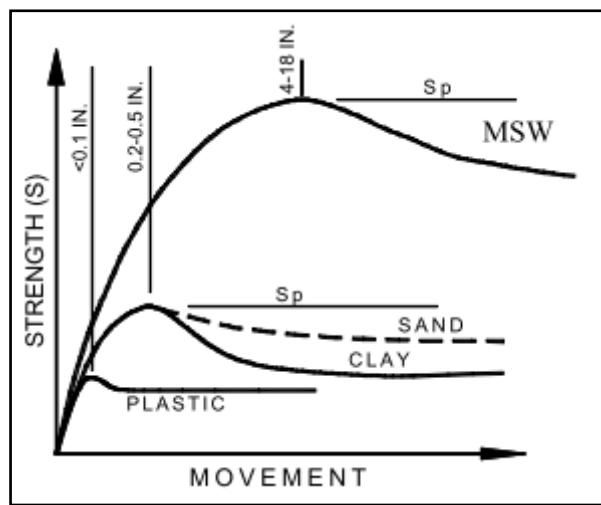
2.5.3 Διατμητική αντοχή απορριμμάτων

Η αντοχή σε διάτμηση όλων των γεωυλικών εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τον στερεό σκελετό τους. Το υλικό θα παραμορφωθεί ως αποτέλεσμα της αύξησης του φορτίου. Τα περισσότερα φορτία παίρνουν περισσότερη παραμόρφωση μέχρι η αντίστασή τους να φτάσει στη μέγιστη τιμή της αντοχής. Μετά το σημείο διαροής, η παραμόρφωση αυξάνεται ενώ η αντοχή του υλικού παραμένει σταθερή ή μειώνεται (Boutwell, 2004), όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 2.8.

Η διατμητική αντοχή αυξήθηκε με την αύξηση της μετατόπισης, επειδή τα αστικά απορρίμματα ενισχύθηκαν από πλαστικά, σχοινιά, υφάσματα και παρόμοια υλικά (Stark *et al.*, 2009). Παρόλα αυτά, οι Blight και Fourie (2003) ισχυρίζονταν ότι οι αστοχίες των χωματερών της Κωνσταντινούπολης, της Μπογκοτά, του Ντέρμπαν και του Ραγας οφείλεται στην απομείωση της αντοχής 'μαλάκωμα' τμήματος απορριμμάτων. Εφαρμόζοντας τη θεωρία απομείωσης της αντοχής (*strain-softening*) για τα απορρίμματα, ο Boutwell (2004) συνέκρινε αυτό το χαρακτηριστικό για τα απορρίμματα, το έδαφος και τα πλαστικά (γεωσυνθετικά) υλικά (Διάγραμμα 2.9).



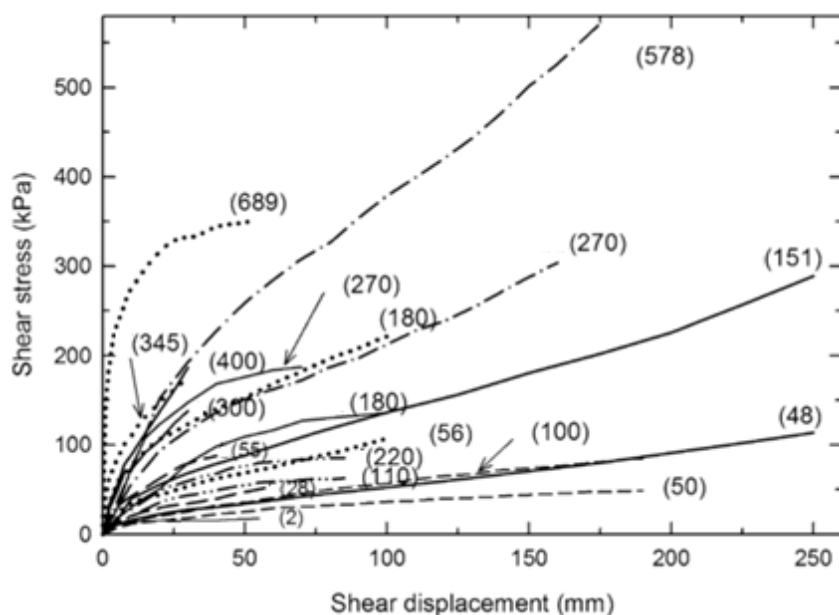
Διάγραμμα 2.8: Αντίσταση- Παραμόρφωση (Boutwell, 2004).



Διάγραμμα 2.9: Μετατόπιση - αντοχή για πλαστικά/έδαφος/ΑΣΑ (Boutwell, 2004).

Αν το γεωσυνθετικό φτάσει στην μέγιστη παραμόρφωση 0.1 ίντσες, τότε τα απορρίμματα είναι στο 1% έως 5% της αντοχής τους και η αντοχή του εδάφους είναι πιθανώς στο μισό της μέγιστης αντοχής της. Λόγω της ετερογένειας των αστικών αποβλήτων και της ινώδους υφής τους, τα χαρακτηριστικά τους αλλάζουν με την ηλικία και την υποβάθμιση, όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω. Οι Stark *et al.* (2009) δημοσίευσαν τη σχέση διατμητικής τάσης και μετατόπισης, συγκεντρώνοντας τα αποτελέσματα αρκετών ερευνητικών μελετών (Διάγραμμα 2.10).

Η διατμητική αντοχή των ΑΣΑ αξιολογείται χρησιμοποιώντας διάφορες τεχνικές που περιλαμβάνουν: (1) την αντίστροφη ανάλυση της αστοχίας πρανών, (2) την επιτόπια δοκιμή μεγάλης κλίμακας (άμεσες δοκιμές διάτμησης ή φέρουσας ικανότητας) και (3) εργαστηριακή δοκιμή ανασυνταχθέντων ΑΣΑ. Χρησιμοποιούνται συσκευές τριαξονικής συμπίεσης (TXC), απλή διάτμηση (SS) και συσκευή άμεσης διάτμησης (DS) για την αξιολόγηση των παραμέτρων διατμητικής αντοχής και δυσκαμψίας των ΑΣΑ.



Διάγραμμα 2.10: Σχέσεις διατμητική μετατόπισης- τάσης από άμεσες δοκιμές διάτμησης σε ΑΣΑ. Οι αριθμοί σε παρένθεση είναι οι δοκιμές σε ορθή τάση σε kPa (Stark *et.al.*, 2009).

Η πιο συνηθισμένη μέθοδος για τον υπολογισμό των ιδιοτήτων είναι η τριαξονική θλίψη υπό ξηρές συνθήκες. Τα αποτελέσματα από αυτή τη μέθοδο μας δείχνουν ότι το σώμα των απορριμμάτων μπορεί να χωριστεί σε διάφορα στρώματα ανάλογα την ηλικία της εναπόθεσης. Κάθε στρώμα έχει διαφορετική σύνθεση και χαρακτηριστικά διατμητικής αντοχής. Οι τριαξονικές δοκιμές μπορούν να δείξουν τη συμπεριφορά σε θλίψη στη μάζα των απορριμμάτων και την παραμόρφωσή τους. Για παράδειγμα, σύμφωνα με σχετικές μελέτες, όσο η ηλικία του γεμίσματος του ΧΥΤΑ αυξανόταν από 1,7 σε 11 χρόνια, η συνοχή βρέθηκε να μειώνεται από 23,3kPa σε 0kPa και η γωνία τριβής από 9,9° σε 26°. Σε επίπεδα τάσεων περιορισμού πάνω από 50kPa, η διατμητική αντοχή των πρόσφατα τοποθετημένων απορριμμάτων βρέθηκε να είναι χαμηλότερη από εκείνη των παλαιότερων. Αυτή η συμπεριφορά ήρθε σε συμφωνία με τα αποτελέσματα της δοκιμής κωνικής διάτμησης, που πραγματοποιήθηκε. Οι μετρήσεις πεδίου για την εσωτερική πίεση των πόρων αποκάλυψε μια συγκέντρωση στραγγίσματος εσωτερικά της μάζας πάνω από ένα στρώμα χώματος και άλλο ένα κοντά στο κατώτερο υπόστρωμα. Οι μετρήσεις των ιδιοτήτων της διατμητικής αντοχής και της εσωτερικής πίεσης των πόρων χρησιμοποιήθηκαν για να εκτιμήσουν την ευστάθεια του πρανούς του ΧΥΤΑ στο *Suzhou* της Κίνας.

Όπως έχει προαναφερθεί, η διακύμανση της αντοχής σε διάτμηση των απορριμμάτων, οφείλεται γενικά στην ετερογένεια της σύνθεσης αυτών, στον βαθμό παραμόρφωσης, στην αστοχία της επιλογής των δειγμάτων και των μεθόδων αξιολόγησης. Ένας επιπλέον παράγοντας

είναι η ηλικία των στρωμάτων εναπόθεσης, λόγω της βιοδιάσπασης των οργανικών στοιχείων και του βαθμού συγκέντρωσης των στραγγισμάτων που βρίσκονται εσωτερικά της μάζας των ΧΥΤΑ.

Το ειδικό βάρος και ο τύπος των απορριμμάτων είναι οι πιο σημαντικές παράμετροι στη διατμητική αντοχή των αποβλήτων. Ο *Koelsch* (2007) θεωρεί την πυκνότητα των αποβλήτων ως βασικό λόγο για την αστοχία του ΧΥΤΑ στο Payatas στις Φιλιππίνες (2000). Καταρχάς, η απουσία συμπίεσης των απορριμμάτων μειώνει την επιφάνεια της βροχόπτωσης και αυξάνει τον ρυθμό διήθησης των υδάτων στα απορρίμματα. Το διηθημένο νερό συμβάλλει στην υπερβολική πίεση του νερού και μειώνει την αντοχή διάτμησης των αποβλήτων. Ο *Blight* (2008) συμπέρανε ότι η υψηλή συμπίεση των αποβλήτων μπορεί να οδηγήσει σε συνεκτικό απόβλητο υψηλής αντοχής και αντίστροφα. Ωστόσο, ο *Koelsch* (2007) τόνισε ότι ο βασικός λόγος της χαμηλής πυκνότητας αποβλήτων στην αστοχία στο Payatas ήταν η σύνθεση των αποβλήτων. Υλικά υψηλής αντοχής όπως ξύλο, μέταλλο, χαρτόνι, άθικτα μπουκάλια, διαχωρίστηκαν αφήνοντας τα οργανικά απορρίμματα και λίγα πλαστικά τμήματα. Η ακατάλληλη σύνθεση των αποβλήτων δεν περιορίζεται μόνο στις αναπτυσσόμενες χώρες. Για παράδειγμα, στην αστοχία του ΧΥΤΑ *Rumpke* στις ΗΠΑ (1996), η αστοχία οφείλεται στον συνδυασμό ελαφρών αποβλήτων και στην λανθασμένη κυκλοφορία των στραγγισμάτων (*Koelsch*, 2007).

	Χαμηλή οικονομικά κοινότητα	Ανεπτυγμένη οικονομικά κοινότητα
<u>Σύσταση αστικών αποβλήτων</u>		
Σκόνη, τέφρα, λάσπη	0,66	Αμελητέο
Χαρτί, χαρτόνι και κλωστοϋφαντουργικά προϊόντα	0,04	0,25
Πλαστικά	0,03	0,12
Μέταλλα	0,01	0,1
Γυαλί	0,01	0,09
Υπολείμματα τροφών και κήπου	0,2	0,41
Διάφορα άλλα	0,05	0,03

Πίνακας 2.3: Διαφορές στη σύσταση των αποβλήτων με βάση την οικονομική κατάσταση (*Blight*, 2008).

Η μεγαλύτερη διαφορά ανάμεσα σε χαμηλές οικονομικά περιοχές και οικονομικά ανεπτυγμένες κοινότητες είναι το μεγάλο περιεχόμενο τέφρας, σκόνης και λάσπης σε περιοχές με χαμηλή οικονομία, ενώ αυτά τα στοιχεία είναι αμελητέα σε πλούσια κοινότητα. Επίσης, στην ίδια περίοδο, μια φτωχή κοινότητα παράγει δύο έως τέσσερις φορές περισσότερα απορρίμματα σε σύγκριση με μια πλούσια κοινότητα (Πίνακας 2.3). Ως εκ τούτου, είναι λογικό τα παχιά στρώματα

απορριμμάτων φτωχής κοινότητας και τα λεπτά στρώματα απορριμμάτων πλούσιας κοινότητας να αποτελέσουν τα στρώματα χωματερών, ένα προς ένα. Παρόμοια κατάσταση μπορεί να συμβεί και στις εποχιακές αλλαγές.

2.5.4 Διατμητική αντοχή επενδύσεων ΧΥΤΑ

Οι επενδύσεις των ΧΥΤΑ είναι διαφορετικές ως προς τους τύπους, τα στρώματα και τη λειτουργία τους. Η πλέον απλή ταξινόμηση οδηγεί σε συμπυκνωμένο στρώμα αργιλίου (CCL) και γεωσυνθετικό στρώμα αργιλίου (GCL). Όπως αναφέρθηκε, η μέγιστη τιμή αντοχής διατμήσεως για το πλαστικό (γεωσυνθετικό) και το έδαφος είναι μικρότερη από αυτή των απορριμμάτων. Το γεγονός αυτό αυξάνει την πιθανότητα αστοχίας σε σύγκριση με την περιστροφική αστοχία στις χωματερές. Παραδείγματος χάριν, όπως υποστήριξε ο *Kettleman*, στην αστοχία του ΧΥΤΑ των ΗΠΑ το 1988, εμφανίστηκε αστοχία στο μήκος της βασικής στρώσης λόγω της ανεπαρκούς αντοχής των γεωσυνθετικών (*Adamczyk*, 2005). Σε άλλη μελέτη, οι *Koerner* και *Snoog* (2000) κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η υγρή άργιλος κάτω από τη γεωμεμβράνη και το υπερβολικά υγρό έδαφος θεμελίωσης είναι οι μηχανισμοί που σχετίζονται με το νερό και ενεργοποίησαν την αστοχία του ΧΥΤΑ.

2.5.5 Κλίμα

Η επίδραση του τοπικού κλίματος στην ευστάθεια των ΧΥΤΑ είναι ένα αμφισβητήσιμο ζήτημα με δύο τρόπους:

1. Οι τροπικές χώρες που παρουσιάζουν αστοχίες στις χωματερές (Φιλιππίνες, Ινδονησία) έχουν συχνά έντονες βροχοπτώσεις τις υγρές εποχές και προβλήματα πυρκαγιάς τις ξηρές εποχές. Η αστοχία του χώρου υγειονομικής ταφής στην Μπανγκόκ της Ινδονησίας (2005), οφείλεται σε ασταμάτητη βροχόπτωση για τρεις ημέρες και στα προηγούμενα προβλήματα πυρκαγιάς (*Bauer et al.*, 2008).

2. Οι ψυχρές περιοχές θα μπορούσαν ενδεχομένως να υποφέρουν από 'κατάψυξη' και τοποθέτηση νέων στρώσεων πάνω σε απορρίμματα που έχουν ήδη 'παγώσει'. Το φαινόμενο αυτό επηρεάζει τη ευστάθεια των ΧΥΤΑ (*Omari*, 2012). Η 'κατάψυξη' στη βάση του χώρου υγειονομικής ταφής και η τοποθέτηση νέων απορριμμάτων στη κορυφή της πλαγιάς αυξάνει την πίεση των πόρων και μειώνει την αντοχή διάτμησης. Επιπλέον, η ψύξη-απόψυξη μπορεί να επηρεάσει καταστροφικά την υδραυλική αγωγιμότητα του συμπαγούς υλικού. Ωστόσο, δεν υπάρχει καταγεγραμμένο γεγονός για την αστοχία ενός ΧΥΤΑ με άμεση αιτία το φαινόμενο της ψύξης και απόψυξης.

Κεφάλαιο 3

Μεθοδολογίες Ανάλυσης Σεισμικής Απόκρισης ΧΥΤΑ

3.1 Γραμμική ανάλυση εδαφών

Η μηχανική συμπεριφορά των υλικών εκφράζεται με βάση τους καταστατικούς νόμους συμπεριφοράς, οι οποίοι καθορίζουν τη σχέση τάσεων-παραμορφώσεων, δηλαδή τα μεγέθη των τάσεων που αναπτύσσονται κατά την παραμόρφωση του υλικού. Οι καταστατικοί νόμοι είναι απαραίτητοι κατά την αναλυτική ή αριθμητική επίλυση προβλημάτων που αφορούν φορτίσεις των υλικών, όπως π.χ., κατά τον υπολογισμό των μετακινήσεων (υποχωρήσεων) του εδάφους όταν επιβληθούν εξωτερικά φορτία. Σε ορισμένες περιπτώσεις η μηχανική συμπεριφορά των υλικών εξαρτάται από το χρόνο, οπότε στους καταστατικούς νόμους περιγραφής της συμπεριφοράς υπεισέρχεται και ο χρόνος. Οι καταστατικοί νόμοι δεν είναι φυσικοί νόμοι, δεν έχουν δηλαδή τη γενική εφαρμογή των φυσικών νόμων, αλλά είναι συσχετίσεις που βασίζονται στα θερμοδυναμικά αξιώματα (με κάποιες παραδοχές) (Καραμπάτσος, 2009).

Λόγω της πολυπλοκότητας των εδαφικών υλικών και κυρίως λόγω της παρουσίας νερού στους πόρους το οποίο αλληλοεπιδρά με τον εδαφικό σκελετό (όπως για παράδειγμα κατά τη στερεοποίηση), οι καταστατικές σχέσεις των εδαφικών υλικών αναφέρονται στον εδαφικό σκελετό, δηλαδή συσχετίζουν τις παραμορφώσεις του εδαφικού σκελετού (που ταυτίζονται με τις μακροσκοπικές παραμορφώσεις του εδάφους) με τις ενεργές τάσεις, τις τάσεις δηλαδή που αναλαμβάνονται από τον εδαφικό σκελετό.

Η ανάλυση απόκρισης των χώρων υγειονομικής ταφής αναμένεται να είναι διαφορετική από τις συνήθεις μελέτες απόκρισης στο έδαφος, καθώς υπάρχει μια σημαντική αλλαγή στις δυναμικές ιδιότητες των αστικών απορριμμάτων και στα δυναμικά μοντέλα σε σύγκριση με τα εδάφη. Παρόλο που απαιτούνται δυναμικές παράμετροι απόκρισης για τον ασφαλή σχεδιασμό

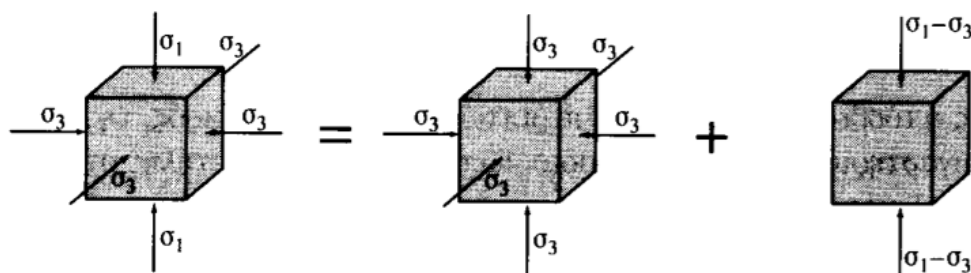
των χώρων υγειονομικής ταφής και των σχετικών εγκαταστάσεων, η συστηματική ανάλυση δυναμικής αντίδρασης των χώρων των αστικών απορριμμάτων είναι πολύ περιορισμένη.

Στην περίπτωση ενός ΧΥΤΑ η σεισμική ανάλυση πραγματοποιείται μέσω ενός απλού ελέγχου ευστάθειας του απορριμματικού πρηνούς μέσω ψευδοστατικών αναλύσεων που βασίζονται στη μέγιστη τιμή της αναμενόμενης επιτάχυνσης του αντισεισμικού κανονισμού (επιτάχυνσης σχεδιασμού). Συνήθως, προηγείται μία απλή μονοδιάστατη ανάλυση σεισμικής απόκρισης των υπεδαφικών στρώσεων, η οποία μεταβάλλει (συνήθως αυξητικά) την τιμή της επιτάχυνσης σχεδιασμού και κατόπιν εφαρμόζονται οι ψευδοστατικές αναλύσεις ευστάθειας. Τα τελευταία χρόνια πραγματοποιούνται δυναμικές αναλύσεις για τον προσδιορισμό μέγιστων οριζοντίων επιταχύνσεων.

Οι *Psarropoulos et al.* (2007) τόνισαν ότι η δυναμική απόκριση των ΧΥΤΑ αποτελεί μια περίπλοκη δυναμική ανάλυση λόγω της δομής του εδάφους το πρόβλημα αλληλεπίδρασης και ο σωστός σεισμικός σχεδιασμός των ΧΥΤΑ απαιτεί την εξέταση βασικών παραγόντων, όπως είναι οι τοπικές σεισμολογικές συνθήκες, τις ειδικές συνθήκες εγκατάστασης και τα μεμονωμένα χαρακτηριστικά κάθε ΧΥΤΑ. Οι *Choudhury* και *Savoikar* (2009) πραγματοποίησαν ισοδύναμη γραμμική ανάλυση των τυπικών ΧΥΤΑ με διαφορετική επιτάχυνση υπό περιοδικές κινήσεις του εδάφους.

Η μονοδιάστατη ανάλυση (1D) της περιοχής δείχνει πως επηρεάζεται η διάδοση των σεισμικών κυμάτων (*Idriss 1968, Roeset 1977, Idriss 1990, Kramer 1996, Hashash and Park 2001, Rathje and Bray 2001, Borja et al. 2002*). Τα κατακόρυφα οριζόντια κύματα διάτμησης (SH κύματα) προσεγγίζουν τη κίνηση του εδάφους που μπορεί να προσομοιωθεί ως οριζόντιο πρηνές, που αντιπροσωπεύει τη στρωματογραφία του τόπου. Η συμπεριφορά του εδάφους προσεγγίζεται ως στερεό *Kelvin-Voigt* με γραμμικό ελαστικό συντελεστή διάτμησης και ιξώδη απόσβεση. Στη μονοδιάστατη ανάλυση γίνεται η υπόθεση ότι η επιφάνεια του εδάφους καθώς και όλοι οι εδαφικοί ορίζοντες κάτω απ' αυτή είναι οριζόντιοι και εκτείνονται πλευρικά σε άπειρη απόσταση. Συνεπώς, μέσω αυτής της μεθόδου δεν λαμβάνεται υπόψη η γεωμορφία του βραχώδους υποβάθρου, αλλά και η τοπογραφία της περιοχής.

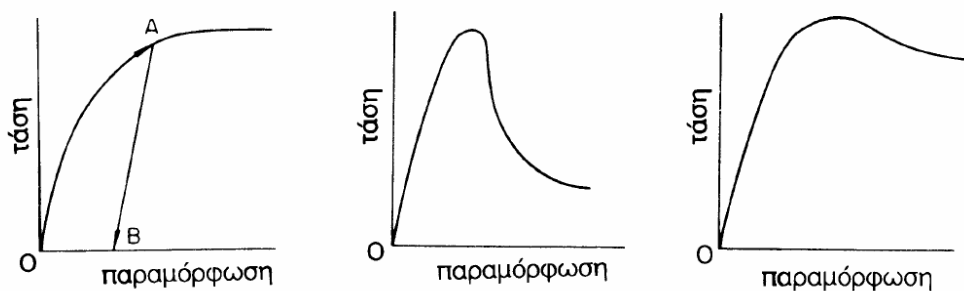
Η τυχαία φόρτιση ενός εδαφικού στοιχείου μπορεί να αναλυθεί σε μια ισότροπη φόρτιση και σε μία αποκλίνουσα, η οποία και προκαλεί διατμητικές τάσεις – παραμορφώσεις (Διάγραμμα 3.1).



Διάγραμμα 3.1 : Ανάλυση εδαφικής φόρτισης.

Για χαμηλές παραμορφώσεις τις τάξεις του $10^{-6} < \gamma < 10^{-5}$ η ελαστική συμπεριφορά του εδάφους είναι ανεξάρτητη από τη συχνότητα και τους κύκλους φόρτισης. Η σεισμική συμπεριφορά του εδάφους εξαρτάται από το μέγιστο μέτρο διάτμησης, $G_{max} = \rho \cdot V_s^2$. Ο λόγος απόσβεσης είναι πολύ μικρός, της τάξης του 0.03. Για μέσες παραμορφώσεις τις τάξεις του $10^{-5} < \gamma < 10^{-3}$ παρουσιάζεται μια υστερητική συμπεριφορά (βισκοελαστική) και τα G και ξ εξαρτώνται από το γ . Η συμπεριφορά αυτή είναι ανεξάρτητη από την συχνότητα αλλά εδώ οι κύκλοι φόρτισης μπορεί να επιδράσουν ιδιαίτερα στις μαλακές αργίλους και στις κορεσμένες άμμους. Τέλος για μεγάλες παραμορφώσεις με $\gamma > 10^{-3}$ έχουμε μη γραμμική ανελαστική συμπεριφορά. Ο αριθμός των κύκλων της φόρτισης έχει μεγάλη σημασία ενώ η συχνότητα της φόρτισης έχει αμελητέα επίδραση (Καραμπάτσος, 2009).

Εκτεταμένες έρευνες της μηχανικής συμπεριφοράς εδαφικών σχηματισμών στο εργαστήριο, αλλά και σε φυσική κλίμακα, αποδεικνύουν ότι η καμπύλη τάσεων-παραμορφώσεων των εδαφικών υλικών είναι έντονα μη-γραμμική. Επίσης, ένα σημαντικό τμήμα της παραμόρφωσης είναι ανελαστικό, δηλαδή δεν αναιρείται με την αφαίρεση του φορτίου. Τυπικές μορφές των καμπύλων τάσεων-παραμορφώσεων εδαφικών υλικών φαίνονται στο Διάγραμμα 3.2 όπου είναι εμφανής η πολυπλοκότητα της μηχανικής συμπεριφοράς του εδάφους.



Διάγραμμα 3.2: Καμπύλες τάσεων-παραμορφώσεων εδαφών.

Στη μη γραμμική ανάλυση, η δυναμική εξίσωση της κίνησης ενσωματώνεται στο χρόνο και η μη γραμμική συμπεριφορά του εδάφους μπορεί να διαμορφωθεί με ακρίβεια. Ωστόσο, οι ήδη υπάρχοντες τύποι της ανάλυσης της απόκρισης μη γραμμικής θέσης περιέχουν ένα επιπλέον ιξώδες, που δεν δίδεται από το ακριβές αποτέλεσμα της προσομοίωσης διάδοσης του εδάφους σε βαθιές αποθέσεις εδάφους. Αυτός ο περιορισμός είναι σημαντικός για μη γραμμική ανάλυση απόκρισης χώρου για περιοχές με πυκνές αποθέσεις εδάφους. Η προσέγγιση της μη γραμμικής ανάλυσης βασίζεται στην αριθμητική ολοκλήρωση της εξίσωσης της κίνησης σε μικρά χρονικά βήματα με την χρήση μοντέλου τάσεων - παραμορφώσεων (Νικολακόπουλος, 2012).

Για ισχυρές δονήσεις (μεσαίους και μεγάλους σεισμούς), η γραμμική συμπεριφορά δεν είναι πλέον ρεαλιστική, δεδομένου ότι η συμπεριφορά του εδάφους είναι μη γραμμική. Για τον λόγο αυτό, έχει αναπτυχθεί μια απλοποιητική ισοδύναμη γραμμική ανάλυση, για την προσέγγιση της μη γραμμικής συμπεριφοράς του εδάφους (*Schnabel and Idriss, 1972*). Η διάδοση της διέγερσης παρέχεται με ακρίβεια μέσω γραμμικής ανάλυσης όταν η απόκριση του εδάφους είναι γραμμική. Η ισοδύναμη γραμμική μέθοδος προσεγγίζει τη μη γραμμική συμπεριφορά του εδάφους με την ενσωμάτωση ενός μέτρου διάτμησης που εξαρτάται από την καμπύλη διάτμησης-απόσβεσης του εδάφους. Το μέτρο διάτμησης και η απόσβεση που χρησιμοποιείται σε κάθε βήμα της ανάλυσης εξαρτάται από τη διατμητική παραμόρφωση.

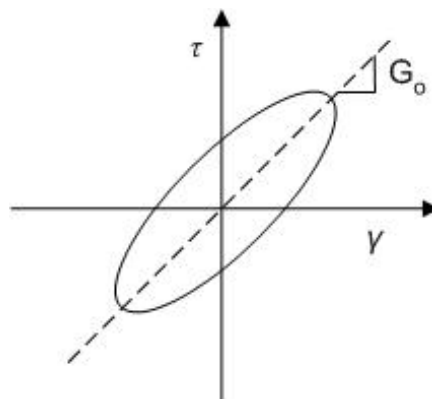
Η ανάλυση της εδαφικής απόκρισης γίνεται συνήθως είτε με την ισοδύναμη γραμμική μέθοδο είτε με μη γραμμική ανάλυση. Η ισοδύναμη γραμμική μέθοδος είναι γραμμική μέθοδος στην οποία το μέτρο διάτμησης και ο συντελεστής απόσβεσης προσαρμόζονται ώστε να είναι οι τιμές τους συμβατές με τις παραμορφώσεις του εδάφους. Η μη γραμμική μέθοδος λαμβάνει υπόψη της τη μη γραμμικότητα του εδάφους κατά τη διάρκεια της σεισμικής φόρτισης και χρησιμοποιεί κατάλληλα μαθηματικά εργαλεία (πεπερασμένες διαφορές ή πεπερασμένα στοιχεία) για την επίλυση των μη γραμμικών εξισώσεων. Η ισοδύναμη γραμμική μέθοδος χρησιμοποιεί τη συνάρτηση μεταφοράς για να συσχετίσει παραμέτρους, όπως η επιτάχυνση στην επιφάνεια της εδαφικής στήλης, με την επιτάχυνση στο σεισμικό υπόβαθρο. Η συνάρτηση μεταφοράς επηρεάζεται από παράγοντες όπως το πάχος των στρώσεων, και οι βασικές τους παράμετροι (G , ξ).

Πιο αναλυτικά, η ισοδύναμη γραμμική ανάλυση είναι μία μέθοδος προσέγγισης της μη-γραμμικής συμπεριφοράς των εδαφικών υλικών. Όπως είναι γνωστό, στην περιοχή των μικρών παραμορφώσεων η συμπεριφορά των εδαφών είναι σχεδόν ελαστική, ενώ με την αύξηση των παραμορφώσεων γίνεται μη γραμμική και αποκτά υστερητικά χαρακτηριστικά. Έτσι, σε ένα χώρο

υγειονομικής ταφής απορριμμάτων (ΧΥΤΑ) χρησιμοποιείται ανάλυση μη γραμμικής απόκρισης για να περιγραφεί η υστερητική απόκριση του εδάφους και η μη γραμμικότητα λόγω μεσαίων και μεγάλων κινήσεων εδάφους. Όμως, η δυναμική απόκριση των ΧΥΤΑ 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 με τα διάφορα συστήματα επικάλυψης. Επίσης, οι ΧΥΤΑ χαρακτηρίζονται από επιφανειακές (τοπογραφικές) και άλλες χωρικές ανωμαλίες (*Sharma and Lewis, 1994* και *Bray and Repetto, 1994*).

Οι επιφανειακές ανωμαλίες των ΧΥΤΑ 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). Οι επιφανειακές ανωμαλίες αφορούν την τοπογραφία, δηλαδή πιο συγκεκριμένα τα πρανή, τους λόφους και τις φυσικές κοιλάδες. Αντιστοίχως, οι μη επιφανειακές ανωμαλίες αφορούν τη γεωμορφολογία του υπεδάφους, δηλαδή τις κοιλάδες αποθέσεων, τα γεωλογικά ρήγματα, κ.λπ. (*Kawase, 1993*). Η σεισμική απόκριση των ΧΥΤΑ είναι συνάρτηση του ύψους της πλήρωσής του με αστικά απορρίμματα, της ακαμψίας, των δυναμικών ιδιοτήτων των απορριμμάτων, της παρουσίας των επενδύσεων αργίλου, της γεωμετρίας απορριμμάτων και των χαρακτηριστικών του ΧΥΤΑ (*Singh and Sun, 1995*). Αυτά τα ευρήματα επίσης επιβεβαιώθηκαν από τους *Bray et al. (1995)* μέσω ισοδύναμης γραμμικής ανάλυσης από διάφορες τοποθεσίες ΑΣΑ με διαφορετικές συνθήκες θεμελίωσης και διαφορετικές σεισμικές κινήσεις.

Η απόσβεση του εδάφους γίνεται κυρίως μέσω της απόσβεσης της υστερητικής ενέργειας. Η συμπεριφορά των εδαφών χαρακτηρίζεται από το βρόγχο υστέρησης που φαίνεται στο Διάγραμμα 3.3.



Διάγραμμα 3.3: Βρόγχος υστέρησης εδαφικών υλικών.

Η κλίση του εδάφους εξαρτάται από τη δυσκαμψία του εδαφικού υλικού που μπορεί να προσεγγιστεί μέσω της τιμής του μέσου μέτρου διάτμησης G_0 που ενώνει τα άκρα του βρόγχου. Η επιφάνεια του βρόγχου εκφράζεται μέσω του λόγου απόσβεσης ξ , ο οποίος εκφράζει την ενέργεια που απορροφήθηκε από το υλικό σύμφωνα με την σχέση:

$$\xi = \frac{W_D}{4\pi W_S} = \frac{1}{\pi} \frac{A}{G_0 \gamma^2}, \quad \text{Εξίσωση (3.1)}$$

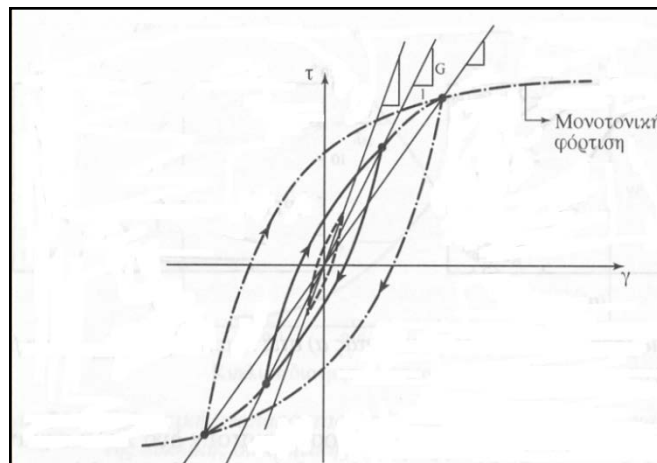
όπου, W_D = η ενέργεια που αποδόθηκε στο υλικό (J),

W_S = η μέγιστη ενέργεια παραμόρφωσης (J),

A = το εμβαδόν της επιφάνειας του βρόγχου (m^2),

γ = διατμητική παραμόρφωση.

Με την αύξηση των κύκλων φόρτισης δημιουργούνται διαφορετικοί βρόγχοι υστέρησης. Το G ελαττώνεται από κύκλο σε κύκλο, ενώ το εμβαδόν του βρόγχου W_D αυξάνεται και η ελαστική ενέργεια W_S μειώνεται, με αποτέλεσμα ο λόγος απόσβεσης ξ να αυξάνεται (Διάγραμμα 3.4).



Διάγραμμα 3.4: Διάφοροι βρόγχοι υστέρησης

Η ισοδύναμη γραμμική ανάλυση αποτελεί μία επαναληπτική διαδικασία, στην οποία:

α. Υπολογίζονται αρχικές τιμές G και ξ . Συνήθως χρησιμοποιούνται οι τιμές που αναφέρονται στην ίδια (χαμηλή) τιμή διατμητικής παραμόρφωσης γ_1 .

β. Με βάση αρχικές τιμές G και ξ , υπολογίζεται η εδαφική απόκριση (χρονοϊστορίες της διατμητικής παραμόρφωσης για κάθε εδαφική στρώση).

γ. Υπολογίζεται η τιμή της ισοδύναμης διατμητικής παραμόρφωσης μέσω της σχέσης $\gamma_{ισοδ.} = \gamma(2) = R_1^* \gamma_1$ όπου,

$R\gamma$: ο λόγος της ισοδύναμης διατμητικής παραμόρφωσης προς τη μέγιστη διατμητική παραμόρφωση, ο οποίος εξαρτάται από το μέγεθος της διέγερσης και δίνεται από τη σχέση:

$$R\gamma = \frac{M-1}{10}, \quad \text{Εξίσωση (3.2)}$$

όπου,

M: το μέγεθος του σεισμού.

δ. Από τις τιμές της γ_2 υπολογίζονται τα G^{i+1} και ξ^{i+1} που χρησιμοποιούνται στην επόμενη επανάληψη.

Συνήθως, οι αποκλίσεις στα ξ και G είναι λιγότερο από 5%-10% σε 3 με 5 επαναλήψεις, όπου και σταματάει η διαδικασία.

Στην ιξώδη απόσβεση, προστίθεται συχνά η απόσβεση *Rayleigh* που αντιπροσωπεύει την απόσβεση όπου τα μοντέλα εδάφους είναι κυρίως γραμμικά. Η απόσβεση *Rayleigh* οδηγεί σε απόσβεση που εξαρτάται από τη συχνότητα, σε αντίθεση με τα πειράματα που δείχνουν ότι η απόσβεση του εδάφους είναι ως επί το πλείστον ανεξάρτητη από την συχνότητα. Τεχνητά υψηλή απόσβεση εισάγεται εκτός μιας περιορισμένης περιοχής συχνοτήτων που μειώνει την υψηλή συχνότητα της κίνησης του εδάφους. Με την κατάλληλη επιλογή της κλίμακας συχνοτήτων και οι δύο συνθέσεις παρέχουν παρόμοια απόκριση, όταν αντιπροσωπεύονται από το φάσμα ελαστικής απόκρισης με απόσβεση της τάξης του 5%.

3.2 Ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία

Κατά τις τελευταίες δεκαετίες, η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων έχει χρησιμοποιηθεί εκτενώς για την ανάλυση των προβλημάτων ελαστικότητας λόγω της ακρίβειας, της ευκολίας και της ευελιξίας της. Το βασικό κομμάτι της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων είναι, όπως και στη μητρωική ανάλυση, η δυνατότητα προσομοίωσης της πραγματικής κατασκευής με συστατικά στοιχεία τα οποία συνδέονται σε ένα πεπερασμένο αριθμό κόμβων. Σε μία συνεχή όμως κατασκευή όπου δεν υπάρχουν φυσικοί διαχωρισμοί (όπως για παράδειγμα σε ένα πλαίσιο), απαιτείται να γίνει τεχνητός διαχωρισμός σε στοιχεία, τα οποία να συνδέονται κατά μήκος των άκρων (πλευρών) τους. Τα τεχνητά αυτά στοιχεία, ή πεπερασμένα στοιχεία είναι συνήθως τετράπλευρα ή τριγωνικά και οι κόμβοι συνήθως βρίσκονται στα άκρα.

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (*Finite Element Method–FEM*) αποτελεί την πιο συνηθισμένη μέθοδο για την επίλυση προβλημάτων στις δύο και τις τρεις διαστάσεις και βασίζεται στη διακριτοποίηση ενός φορέα μέσω της διαίρεσής του σε στοιχεία πεπερασμένων διαστάσεων. Η λογική της μεθόδου είναι η διατύπωση και η επίλυση των εξισώσεων ισορροπίας

για κάθε στοιχείο και τελικά, από την κατάλληλη υπέρθεση αυτών, ο σχηματισμός και η επίλυση της εξίσωσης ισορροπίας όλου του προβλήματος.

3.3 Ανάλυση με το λογισμικό QUAD4M

Όπως είναι γνωστό, η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιείται ευρύτατα στην επίλυση προβλημάτων συνεχών μέσων, όπως είναι τα γεωτεχνικά προβλήματα. Ο κώδικας QUAD4M έχει συνταχθεί σε γλώσσα προγραμματισμού FORTRAN και αναπτύχθηκε για την εν-χρόνω επίλυση διδιάστατων προβλημάτων της γεωτεχνικής μηχανικής. Αποτελεί μία εξέλιξη του κώδικα QUAD, ο οποίος συντάχθηκε το 1973 από τους *Idriss et al.* προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν τα σφάλματα που οφείλονται στις συνοριακές συνθήκες. Το στοιχείο QUAD4 τέθηκε σε λειτουργία το 1976 και αναφέρθηκε σύντομα η μη δυνατότητα εκτέλεσης αναλύσεων για πρηνή με γωνίες κλίσης μεγαλύτερες από 30°. Αυτό διορθώθηκε το 1977 με τη σύζευξη των τιμών των γ_x και γ_y στα τέσσερα σημεία ενοποίησης.

Το QUAD4M χρησιμοποιεί τη μέθοδο της ισοδύναμα γραμμικής ανάλυσης, σύμφωνα με την οποία η μη γραμμική συμπεριφορά των υλικών μπορεί να προσεγγιστεί μέσω μίας επαναληπτικής διαδικασίας όπου οι τιμές της διατμητικής αντοχής και της απόσβεσης των υλικών είναι ανάλογες με τα επίπεδα της μέγιστης διατμητικής παραμόρφωσης. Επίσης, δίνεται η δυνατότητα υπολογισμού των σεισμικών συντελεστών προκειμένου να χρησιμοποιηθούν στην ανάλυση ευστάθειας για τον υπολογισμό των μετατοπίσεων μίας συγκεκριμένης μάζας αστοχίας. Τέλος, προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν τα σφάλματα εξαιτίας των συνοριακών συνθηκών, έχει ενσωματωθεί η δυνατότητα εφαρμογής ειδικών συνοριακών συνθηκών (*transmitting boundaries*) στα προσομοιώματα.

Για την επίλυση ενός φορέα απαιτείται καταρχάς η διακριτοποίησή του με την χρήση ενός αλγόριθμου διακριτοποίησης πεδίου με πεπερασμένα στοιχεία (*mesh generator*). Στο QUAD4M χρησιμοποιούνται τετραεδρικά-τετρακομβικά στοιχεία. Ωστόσο, μπορούν να εισαχθούν και τριγωνικά-τριομβικά στοιχεία, αν ο τέταρτος κόμβος κάθε στοιχείου συμπίπτει με τον τρίτο κόμβο αυτού. Η μέθοδος αυτή ακολουθήθηκε και στην παρούσα εργασία. Οι συντεταγμένες των κόμβων που προκύπτουν από τη διακριτοποίηση εισάγονται στο βασικό αρχείο εισόδου του QUAD4M, το οποίο συντάσσεται σε έναν κοινό κειμενογράφο με βάση τις προκαθορισμένες απαιτήσεις του προγράμματος. Επίσης, ορίζεται το κάθε στοιχείο με βάση τους κόμβους από τους οποίους αποτελείται και για το κάθε στοιχείο εισάγονται οι βασικές μηχανικές και δυναμικές

ιδιότητες των υλικών που χρησιμοποιούνται: λόγος *Poisson*, ειδικό βάρος, καθώς και οι τιμές της απόσβεσης και του λόγου διατμητικής αντοχής για χαμηλές τιμές παραμόρφωσης.

Το κάθε στοιχείο ή ομάδα στοιχείων που ορίζει μία εδαφική περιοχή, συνδέεται με ένα δεύτερο αρχείο εισόδου. Το αρχείο αυτό περιέχει τις τιμές της μεταβολής του μέτρου διατμητικής αντοχής και της απόσβεσης σε συνάρτηση με την διατμητική παραμόρφωση για κάθε εδαφική περιοχή ανάλογα τη διατομή και τις εδαφικές στρώσεις. Τέλος, στο αρχείο εισόδου καθορίζονται παράμετροι όπως ο αριθμός των επαναλήψεων στην ισοδύναμη γραμμική ανάλυση, το είδος των αποτελεσμάτων (χρονοϊστορίες επιταχύνσεων, ή/και τάσεων, ή/και σεισμικών συντελεστών), τα σημεία πάνω στο δοκίμιο για τα οποία επιθυμούμε να εμφανίζονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων, κ.α. Ακόμα, αν επιθυμεί ο χρήστης τον υπολογισμό των σεισμικών συντελεστών για συγκεκριμένα τμήματα ή σημεία του φορέα, τότε θα πρέπει στο αρχείο εισόδου να οριστούν οι εκτιμώμενες επιφάνειες αστοχίας της γεωκατασκευής, ανά κόμβο, δηλαδή σημεία (κόμβοι) που θα εμφανίζονται.

Όπως έχει αναφερθεί παραπάνω, η διαδικασία των πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιεί ένα σύστημα εξίσωσης κίνησης το οποίο εκφράζεται σε μητρωϊκή μορφή. Για την επίλυση της καθολικής εξίσωσης της κίνησης, το QUAD4M χρησιμοποιεί τη μέθοδο της εν-χρόνω ολοκλήρωσης κατά *Newmark* και συγκεκριμένα την μέθοδο της μέσης επιτάχυνσης (κανόνας τραπεζίου). Σύμφωνα με την μέθοδο αυτή, τα διανύσματα των κομβικών μετατοπίσεων και ταχυτήτων του στοιχείου τη χρονική στιγμή $t_{n+1} = (n+1)dt$, δίνονται από τις σχέσεις της Εξίσωσης (3.3):

$$\begin{aligned} u_{n+1} &= u_n + dt \dot{u}_n + \frac{dt^2}{2} \left[(1-2\beta) \ddot{u}_n + 2\beta \ddot{u}_{n+1} \right] \\ \dot{u}_{n+1} &= \dot{u}_n + dt \left[(1-\gamma) \ddot{u}_n + \gamma \ddot{u}_{n+1} \right] \end{aligned} \quad \text{Εξίσωση (3.3)}$$

όπου,

dt : το χρονικό βήμα ολοκλήρωσης, και

β, γ : οι συντελεστές οι οποίοι επιλέγονται κατάλληλα ανάλογα με την ευστάθεια και ακρίβεια της μεθόδου.

Οι εξισώσεις κίνησης για το σύνολο των στοιχείων, οδηγούν στην κατασκευή της καθολικής εξίσωσης της κίνησης, η οποία για την περίπτωση της σεισμικής κίνησης έχει τη μορφή:

$$[M]^* \{u\} + [C]^* \{u\} + [K]^* \{u\} = [M]^* [I]^* \{u\}_b(t), \quad \text{Εξίσωση (3.4)}$$

όπου,

[M]: είναι το καθολικό μητρώο μάζας,

[C] : το καθολικό μητρώο απόσβεσης,

[K]: το καθολικό μητρώο δυσκαμψία, {u}: το καθολικό διάνυσμα επικόμβιων επιταχύνσεων.

Με αντικατάσταση στην Εξίσωση (3.3) των Εξισώσεων (3.4) για την μετατόπιση και ταχύτητα προκύπτει :

$$\left([m_e] + dt\gamma[b_e] + \frac{dt^2}{2} 2\beta[k_e] \right) \ddot{u}_{n+1} + \left(dt(1-\gamma)[b_e] + \frac{dt^2}{2} (1-2\beta)[k_e] \right) \ddot{u}_n + ([b_e] + dt[k_e]) \dot{u}_n + [k_e] u_n = \{R_e\}_{n+1}$$

Εξίσωση (3.5)

Σύμφωνα με τη μέθοδο της μέσης επιτάχυνσης, οι συντελεστές β και γ έχουν τις τιμές 0.25 και 0.5, αντίστοιχα. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται απόλυτη σταθερότητα, μηδενική αριθμητική απόσβεση και ακρίβεια δευτέρας τάξης (δηλαδή με υποδιπλασιασμό του χρονικού βήματος το σφάλμα μειώνεται στο ένα τέταρτο). Με βάση τον κανόνα τραπεζίου, η μετατόπιση, η ταχύτητα και η επιτάχυνση για κάθε χρονικό βήμα, υπολογίζονται με βάση τις παρακάτω εξισώσεις:

$$u_{n+1} = [K]^{-1} [R]_{n+1}$$

Εξίσωση (3.6)

$$\ddot{u} = \frac{4}{dt^2} (u_{n+1} - u_n) - \frac{4}{dt} \dot{u}_n - \ddot{u}_n$$

(Εξίσωση 3.7)

$$\dot{u}_{n+1} = \dot{u}_n - \frac{dt}{2} (\ddot{u}_n + \ddot{u}_{n+1})$$

(Εξίσωση 3.8)

$$[\bar{K}] = \frac{4}{dt^2} [M] + \frac{2}{dt} [C] + [K]$$

$$[\bar{R}]_{n+1} = [R]_{n+1} + [M] A_{n+1} + [C] B_{n+1} + [K] a u_n$$

$$A_{n+1} = \frac{4}{dt^2} \left(u_n + dt \dot{u}_n + \frac{dt^2}{4} \ddot{u}_n \right)$$

$$B_{n+1} = \frac{2}{dt} u_n + \dot{u}_n$$

Εξίσωση (3.9)

Το μητρώο απόσβεσης υπολογίζεται στο QUAD4M με τη μέθοδο *Rayleigh* ως συνάρτηση της απόσβεσης του κάθε στοιχείου:

$$[C]_q = \alpha_q [M]_q + \beta_q [K]_q$$

(Εξίσωση 3.10)

όπου,

α : ο συντελεστής αναλογικής απόσβεσης του μητρώου δυσκαμψίας,

β : ο συντελεστής αναλογικής απόσβεσης του μητρώου μάζας, και

η : ο αριθμός του κάθε στοιχείου.

Στη μέθοδο *Rayleigh* η απόσβεση ξ εξαρτάται από τη συχνότητα ω με βάση τη σχέση:

$$\xi = \frac{1}{2} \left(\frac{\alpha}{\omega} + \beta \omega \right) \quad \text{Εξίσωση (3.11)}$$

Ωστόσο, στα εδάφη ο λόγος απόσβεσης είναι γνωστός και δεν εξαρτάται από τη συχνότητα. Επομένως είναι δυνατόν να υπολογιστεί ο λόγος απόσβεσης από την Εξίσωση (3.27), με τη χρήση δύο -γνωστών- ιδιοσυχνοτήτων ω_1 και ω_2 . Στο QUAD4M η πρώτη συχνότητα που χρησιμοποιείται είναι η θεμελιώδης γωνιακή ιδιοσυχνότητα της εδαφικής στρώσης (ή της γεωκατασκευής). Η δεύτερη συχνότητα δίδεται από τη σχέση :

$$\omega_2 = n \omega_1 \quad \text{Εξίσωση (3.12)}$$

όπου,

n : μονός ακέραιος αριθμός που είναι πλησιέστερος και μεγαλύτερος από ω_i/ω_1 ,

ω_i : η δεσπόζουσα συχνότητα της εδαφικής κίνησης.

Η επιλογή των συχνοτήτων αυτών για την εύρεση των συντελεστών α και β , έγινε μετά από αναλύσεις σε απλά μονοδιάστατα προσομοιώματα προκειμένου να επιτευχθεί η μέγιστη δυνατή ακρίβεια:

$$\alpha = 2\xi \frac{\omega_1 \omega_2}{\omega_1 + \omega_2} \quad \text{Εξίσωση (3.13)}$$

$$\beta = 2\xi \frac{1}{\omega_1 + \omega_2} \quad \text{Εξίσωση (3.14)}$$

Με την προαναφερθείσα διαδικασία επιτυγχάνεται η μείωση της απόσβεσης ανάμεσα στις συχνότητες ω_1 και ω_2 και η αύξησή της εκτός του διαστήματος των δύο αυτών συχνοτήτων. Με αυτόν τον τρόπο, το προσομοίωμα αποκρίνεται στη δεσπόζουσα περίοδο της κίνησης με μεγαλύτερο ρεαλισμό, δηλαδή χωρίς να υπόκειται σε υψηλά επίπεδα απόσβεσης.

Κατά την διακριτοποίηση ενός φορέα θα πρέπει, για λόγους που σχετίζονται με την αποδοτικότητα της προσομοίωσης, να επιδιώκεται η ελαχιστοποίηση του αριθμού των στοιχείων

του φορέα χωρίς να επηρεάζεται σημαντικά η ακρίβεια των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης. Από τη στιγμή που το μέγεθος των στοιχείων εξαρτάται από την ταχύτητα των διατμητικών κυμάτων, η μείωση του αριθμού των στοιχείων εξαρτάται κυρίως από τη μείωση των διαστάσεων του φορέα. Επομένως, τα σφάλματα λόγω ανακλάσεων των σεισμικών κυμάτων που παρατηρούνται συνήθως στα σύνορα του προσομοιώματος, μπορούν να παίξουν καθοριστικό ρόλο στην ακρίβεια των αποτελεσμάτων.

Στην περίπτωση των γεωτεχνικών έργων η ακρίβεια αυτή μπορεί να επηρεασθεί ιδιαίτερα από ανακλάσεις (του σεισμικού κύματος) που παρατηρούνται στα όρια του βραχώδους υποβάθρου. Όπως είναι γνωστό, μέρος της σεισμικής ενέργειας αντανακλάται από τις επιφανειακές εδαφικές στρώσεις πίσω στο βραχώδες υπόβαθρο και «απορροφάται» από το έδαφος. Είναι επομένως σημαντική η ανάγκη προσομοίωσης της ύπαρξης του ημιχώρου (*half-space*) κάτωθεν του προσομοιώματος και συνεπακόλουθα της απόσβεσης λόγω απορρόφησης της σεισμικής ενέργειας (*radiation damping*) η οποία παρατηρείται στη φύση, με την εφαρμογή ειδικών συνοριακών συνθηκών στους κόμβους που βρίσκονται στα όρια του προσομοιώματος.

Στα προγράμματα γεωτεχνικής σεισμικής μηχανικής, η προσομοίωση των συνοριακών συνθηκών επιτυγχάνεται με την εφαρμογή αποσβεστήρων (*dampers*) στους κόμβους που βρίσκονται στα όρια του δοκιμίου/γεωκατασκευής. Στο QUAD4M αυτό επιτυγχάνεται μέσω της εφαρμογής ενός “μηχανισμού βάσης” (*compliant base*) ο οποίος συμπεριφέρεται κατά τον ίδιο τρόπο με τους αποσβεστήρες. Η μαθηματική έκφραση της εισαγωγής αποσβεστήρων στο προσομοίωμα πραγματοποιείται μέσω της εισαγωγής επιπρόσθετων όρων απόσβεσης, στα μητρώα των στοιχείων που βρίσκονται στα όρια του προσομοιώματος.

Επίσης, ο σεισμικός συντελεστής ορίζεται ως ο λόγος της διατμητικής δύναμης που προκαλείται από τον σεισμό σε ένα τμήμα του φορέα, προς το βάρος του τμήματος αυτού. Το QUAD4M δίνει τη δυνατότητα του ορισμού συγκεκριμένου τμήματος του φορέα για το οποίο ο χρήστης επιθυμεί τον υπολογισμό του σεισμικού συντελεστή. Η δύναμη που ασκείται σε κάθε στοιχείο (κόμβο) και συνεπώς και ο σεισμικός συντελεστής υπολογίζονται για κάθε χρονικό βήμα.

Κεφάλαιο 4

Αριθμητική Προσομοίωση Σεισμικής Απόκρισης ΧΥΤΑ

4.1 Απόκριση ΧΥΤΑ σε εδαφικές διεγέρσεις

Όπως σε κάθε τεχνικό έργο, έτσι και στους ΧΥΤΑ μπορούν να καταγραφούν σημαντικά προβλήματα και βλάβες λόγω εδαφικών μετακινήσεων. Οι χώροι υγειονομικής ταφής που βρίσκονται σε ζώνες υψηλής σεισμικής επικινδυνότητας εκτίθενται σε κυκλικά φορτία κατά τη διάρκεια σεισμών και η μελέτη δυναμικής συμπεριφοράς υπό τέτοιες συνθήκες, είναι απαραίτητη για τον σχεδιασμό του χώρου υγειονομικής ταφής. Σε σεισμογενείς χώρες, όπως η Ελλάδα, οι ΧΥΤΑ φέρουν τα στατικά φορτία από τα απορρίμματα και από τις εγκαταστάσεις στο χώρο του ΧΥΤΑ αλλά υπόκεινται και στον ιδιαίτερα σοβαρό κίνδυνο δυναμικής καταπόνησης κατά τη διάρκεια ενός ισχυρού σεισμικού γεγονότος. Η επιπρόσθετη αυτή καταπόνηση δύναται να επιβληθεί :

α) λόγω αδρανειακών καταπονήσεων (επιταχύνσεων και κατά συνέπεια δυνάμεων), οι οποίες αναπτύσσονται στο σώμα της απορριμματικής μάζας και στις υπόλοιπες εγκαταστάσεις, λόγω σεισμικής διέγερσης στο υπόβαθρο του ΧΥΤΑ,

β) λόγω κινηματικών καταπονήσεων (διατμητικών κυρίως παραμορφώσεων) οι οποίες ενδέχεται να επιβληθούν στη βάση του απορριμματικού πρανούς, είτε λόγω επιφανειακής διάρρηξης ενεργών σεισμοτεκτονικών ρηγμάτων, είτε λόγω δυναμικής αστοχίας του εδάφους (λόγω ρευστοποίησης ή διατμητικής αστοχίας του εδάφους λόγω ρευστοποίησης ή διατμητικής συνίζησης).

Είναι προφανές ότι και στις δύο περιπτώσεις οι συνέπειες ενδέχεται να είναι σημαντικές, τόσο όσον αφορά την ασφάλεια, όσο και τη λειτουργικότητα του ΧΥΤΑ. Στην πρώτη περίπτωση, ο κίνδυνος τοπικής ή και καθολικής αστάθειας του απορριμματικού πρανούς είναι μεγάλος, ενώ στη δεύτερη οι επιβαλλόμενες παραμορφώσεις στη βάση του ΧΥΤΑ ενδέχεται να προκαλέσουν βλάβες στις στεγανωτικές μεμβράνες του πυθμένα καθώς και στα συστήματα συλλογής και

μεταφοράς των στραγγισμάτων. Και στις δύο περιπτώσεις ο περιβαλλοντικός κίνδυνος είναι τεράστιος, ενώ οι οικονομικές και κοινωνικές συνέπειες ενδέχεται να είναι ανυπολόγιστες. Πολλές φορές τέτοιες ζημιές είναι δύσκολο να παρατηρηθούν, διότι τα παραπάνω μέρη του ΧΥΤΑ είναι καλυμμένα λόγω απορριμματικής μάζας με αποτέλεσμα να είναι αδύνατο να πραγματοποιηθούν οι κατάλληλοι έλεγχοι και να είναι εμφανείς μόνο επιφανειακές ρηγματώσεις (Εικόνα 4.1).



Εικόνα 4.1: Ρηγμάτωση ΧΥΤΑ στο *Sunshine Canyon* (*Forest Daily News*).

Επίσης, βλάβες μπορούν να προκληθούν στα συστήματα συλλογής και διαφυγής των αερίων είτε λόγω πτώσης ισχύος στον σταθμό καύσης αερίων είτε γιατί εμφανίζονται ρωγμές στα φρεάτια και στις γραμμές συλλογής των αερίων. Υπάρχει πιθανότητα καταστροφής υποδομών του ΧΥΤΑ όπως των υδατοδεξαμενών, όπου γίνεται επεξεργασία των στραγγισμάτων, καθώς και κατάρρευσης των κτιρίων διοίκησης. Τέλος, μπορεί και να υπάρξουν αστοχίες στο εσωτερικό του ΧΥΤΑ που είναι δύσκολο να γίνουν αντιληπτές, και να μετρηθούν σε σύντομο χρονικό διάστημα, ειδικά όταν δεν προϋπάρχουν κατάλληλα όργανα μετρήσεων εγκαταστημένα στον ΧΥΤΑ (Νικολακόπουλος, 2012).

4.2 Σεισμική απόκριση ΧΥΤΑ

Όπως έχει αναφερθεί και στο προηγούμενο κεφάλαιο, οι πιο σημαντικές παράμετροι των ΑΣΑ που απαιτούνται για την εκτέλεση ανάλυσης σεισμικής απόκρισης είναι η ταχύτητα των διατμητικών κυμάτων (V_s), το ειδικό βάρος των ΑΣΑ, η κανονικοποιημένη μείωση του συντελεστή διάτμησης (G/G_{max}) και ο συντελεστής απόσβεσης υλικού. Το μέτρο διάτμησης (G), το οποίο αναφέρεται στις διατμητικές τάσεις, είναι μια σημαντική ιδιότητα του υλικού στην αξιολόγηση της δυναμικής απόκρισης των ΑΣΑ. Οι δυναμικές ιδιότητες των ΑΣΑ είναι ιδιαίτερες σε κάθε ΧΥΤΑ

και ποικίλλουν χωρικά μέσα στο σώμα του ΧΥΤΑ και ο υπολογισμός τους γίνεται με τις κατάλληλες τεχνικές. Πολλοί ερευνητές (*Augello et al. 1998, Matasovic και Kanazanjian 1998, Zekkos et al. 2008*) έχουν μελετήσει την απόκριση των ΑΣΑ στους ΧΥΤΑ με δοκιμές ή με αντίστροφους υπολογισμούς σε διάφορα μέρη του κόσμου.

Οι δυναμικές ιδιότητες των ΑΣΑ που είναι απαραίτητες στη σεισμική ανάλυση των ΧΥΤΑ, συμπεριλαμβανομένης της μικρής διατμητικής δυσκαμψίας, της ισοδύναμης μείωσης του γραμμικού μέτρου και της απόσβεσης, έχουν αποτελέσει αντικείμενο ιδιαίτερης προσοχής τα τελευταία 15 χρόνια. Ωστόσο, οι περισσότερες μελέτες δυναμικών ιδιοτήτων των ΑΣΑ επεξεργάζονται τα απορρίμματα ως μοναδικό υλικό με ένα σύνολο δυναμικών ιδιοτήτων που είναι ανεξάρτητες από τη σύνθεση των απορριμμάτων ή το ειδικό βάρος τους.

Η παρούσα εργασία εστιάζει σε αυτό το σημείο. Πιο συγκεκριμένα, εξετάζει με περισσότερη ακρίβεια τη μεταβολή της επιτάχυνσης στο σώμα του ΧΥΤΑ λόγω των τοπικών εδαφικών συνθηκών και ερευνά τη σχέση ανάμεσα σε αυτήν τη μεταβολή και την εν δυνάμει μη-γραμμική συμπεριφορά των εδαφικών και απορριμματικών υλικών. Έγιναν σεισμικές αναλύσεις σε έναν ΧΥΤΑ, στον οποίο τα χαρακτηριστικά των απορριμμάτων μεταβάλλονται ανά στρώση. Αυτά τα χαρακτηριστικά που μεταβάλλονται ανά στρώση είναι η ταχύτητα V_s , που το εύρος της προτείνεται από τον Zekkos (2008) και κυμαίνεται στο διάστημα των 125-400m/sec, όπως έχει αναφερθεί και αναλυτικότερα στο Κεφάλαιο 2. Παρατηρείται μια παρόμοια σκέδαση για τις προτεινόμενες καμπύλες της μείωσης του μέτρου διάτμησης και αύξησης του συντελεστή απόσβεσης (Διάγραμμα 2.1), όπως χρησιμοποιήθηκαν στο πρώτο κομμάτι των αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν.

Για την επίτευξη αυτού του στόχου πραγματοποιήθηκαν παραμετρικές διδιάστατες, ισοδύναμα γραμμικές αναλύσεις κατάλληλων αριθμητικών προσομοιωμάτων με τη χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων, προκειμένου να εξεταστεί η επίδραση των τοπικών εδαφικών συνθηκών στην δυναμική απόκριση ενός τυπικού ΧΥΤΑ. Οι βασικές παράμετροι που εξετάστηκαν είναι:

(α) οι εδαφικές συνθήκες κάτωθεν του ΧΥΤΑ,

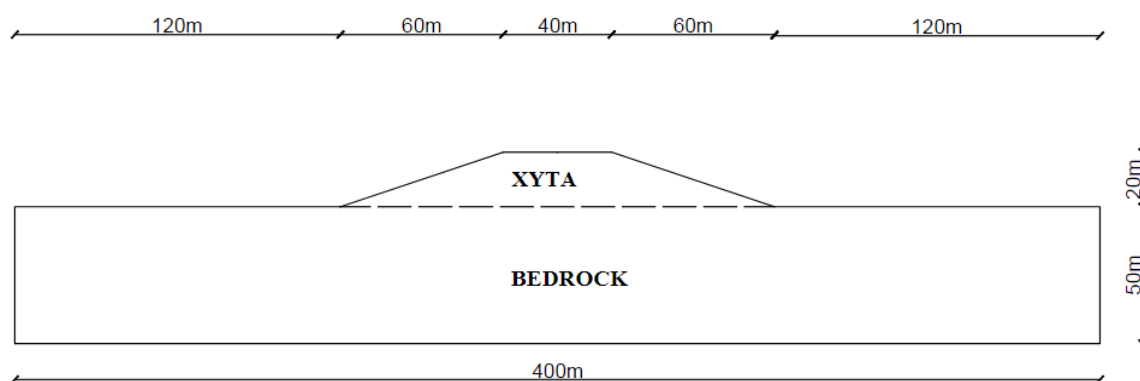
(β) οι ιδιότητες των υλικών του ΧΥΤΑ, και

(γ) τα χαρακτηριστικά και το επίπεδο της εδαφικής κίνησης στο επίπεδο του βραχώδους υποβάθρου.

Ο ΧΥΤΑ εξετάστηκε ως ένα τραπεζοειδές επίχωμα θεμελιωμένο πάνω σε βράχο. Με αυτόν τον τύπο προσομοίωσης και με τη χρήση απλών αναλυτικών σχέσεων έγινε δυνατός ο συντονισμός τόσο της εδαφικής στρώσης, όσο και επιχώματος σε μικρές παραμορφώσεις και άρα γραμμική συμπεριφορά των υλικών. Η αύξηση του πλάτους της διέγερσης οδήγησε σε χρήσιμα συμπεράσματα για τον ρόλο της μη-γραμμικής συμπεριφοράς των υλικών στη σεισμική απόκριση της κατασκευής.

4.3 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά ΧΥΤΑ - Δυναμικές ιδιότητες

Προκειμένου να εξεταστεί η δυναμική απόκριση των ΧΥΤΑ σε συνδυασμό με μία σειρά παραμέτρους, όπως είναι οι τοπικές εδαφικές συνθήκες και οι ιδιότητες των απορριμματικών υλικών, εξετάσθηκαν παραλλαγές της τυπικής εκδοχής υπέργειου τραπεζοειδούς διδιάστατου ΧΥΤΑ. Η γεωμετρία του ΧΥΤΑ που επιλέχθηκε είναι αυτή που φαίνεται στην Εικόνα 4.2.



Εικόνα 4.2: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά του ΧΥΤΑ.

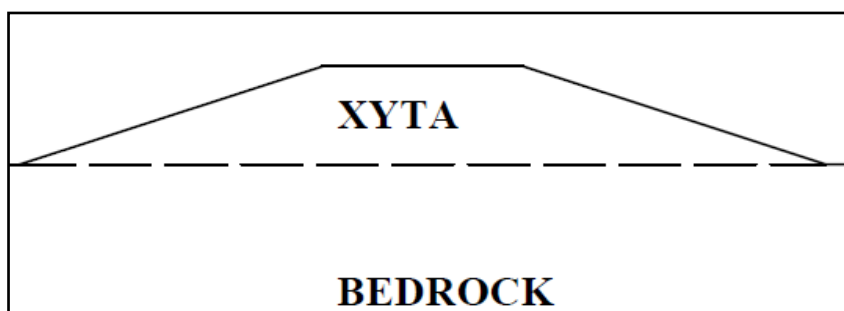
Αρχικά εξετάστηκαν τέσσερα διδιάστατα αριθμητικά προσομοιώματα ενός τυπικού ΧΥΤΑ σχετικά μικρού μεγέθους. Καθώς η γεωμετρία του προσομοιώματος παρέμεινε η ίδια, οι βασικές παράμετροι που εξετάστηκαν ήταν οι ιδιότητες των εδαφικών και απορριμματικών υλικών, καθώς και τα χαρακτηριστικά της εδαφικής διέγερσης.

Οι δυναμικές ιδιότητες του απορριμματικού υλικού παρουσιάζουν μεγάλη διασπορά, και για τον λόγο αυτό εξετάστηκε η επίδρασή τους στην εκτιμώμενη δυναμική απόκριση. Δεδομένου ότι το ύψος της διατομής είναι σχετικά μικρό συγκριτικά με τους αντίστοιχους Χ.Υ.Τ.Α., στους οποίους αναφέρονται οι δημοσιευμένες εργασίες που πραγματεύονται τον υπολογισμό του ειδικού βάρους και της ταχύτητας διάδοσης του διατμητικού κύματος, θεωρείται ομοιόμορφη η

κατανομή και των δύο παραμέτρων με το βάθος για τη πρώτη δοκιμή που έγινε, όπως φαίνεται στο προσομοίωμα 1 στην Εικόνα 4.3.

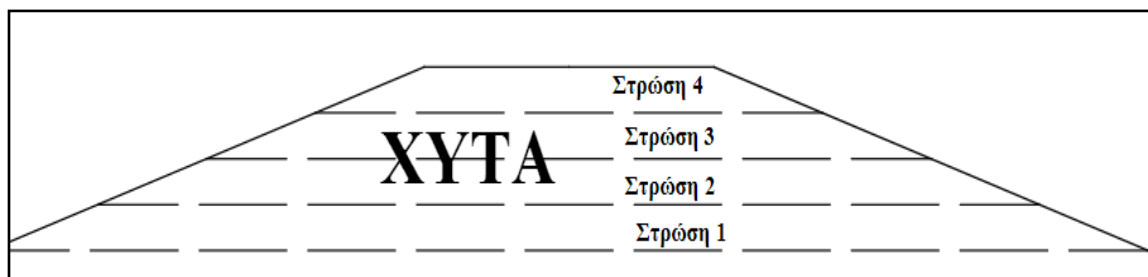
Για την ταχύτητα διάδοσης του διατμητικού κύματος επιλέχθηκαν τρεις τιμές οι οποίες καλύπτουν επαρκώς το προτεινόμενο εύρος των τιμών της παραμέτρου για το αντίστοιχο βάθος. Συγκεκριμένα το ειδικό βάρος αναφέρεται ότι λαμβάνει τιμές από 5kN/m^3 έως 20kN/m^3 , όπως έχει αναφερθεί αναλυτικά στο Κεφάλαιο 2, ενώ αποδείχθηκε ότι εξαρτάται από πολλές παραμέτρους, συμπεριλαμβανομένων της σύστασης και της ηλικίας των απορριμμάτων, της ποσότητας καθημερινής κάλυψης του εδάφους, του ποσοστού υγρασίας, της πίεσης συμπίκνωσης και του βάθους. Μία μέση αντιπροσωπευτική τιμή που ανταποκρίνεται σε αντίστοιχη εκτίμηση των παραμέτρων αυτών θεωρείται η τιμή 10kN/m^3 , για τον τύπο 1.

Το προσομοίωμα 1 αναφέρεται σε έναν ΧΥΤΑ θεμελιωμένο σε βράχο, ο οποίος χαρακτηρίζεται από ταχύτητα διάδοσης διατμητικών κυμάτων V_s ίση με 200m/s και $\xi=5\%$ που χρησιμοποιήθηκαν στη πρώτη δοκιμή, που αναφέρεται ως περίπτωση 1.



Εικόνα 4.3: Προσομοίωμα 1 ΧΥΤΑ ενιαίο (Τύπος 1).

Για τις άλλες δοκιμές χρησιμοποιήθηκαν τα προσομοιώματα 2 και 3 (Εικόνα 4.4.) που αναφέρονται σε ΧΥΤΑ που το εδαφικό υλικό είναι χωρισμένο σε τέσσερις στρώσεις ίδιου ύψους $12,5\text{m}$, με διαφορετική ταχύτητα διάδοσης κυμάτων V_s που επιλέχθηκε με βάση τον Πίνακα 4.1. Η V_s επιλέχθηκε από τη μελέτη των *Zekkos et al.* (2006) που διεκπεραίωσαν την εκτέλεση φασματικών αναλύσεων επιφανειακών κυμάτων (SASW) στο ΧΥΤΑ ΟΙΙ, όπως έχει αναφερθεί στην ενότητα 2.2.1. Από τα αποτελέσματα των μετρήσεων εκτιμήθηκε ο μέσος όρος της ταχύτητας διάδοσης διατμητικού κύματος, η οποία λαμβάνει τιμές από 100m/sec στην επιφάνεια έως και 500m/sec σε βάθος ίσο με 35m . Σε αυτό το φάσμα τιμών επιλέχθηκαν και οι τιμές των V_s στις στρώσεις του ΧΥΤΑ που εξετάσθηκε.



Εικόνα 4.4: Τύπος 2-3 ΧΥΤΑ στρώσεις απορριμματικού υλικού.

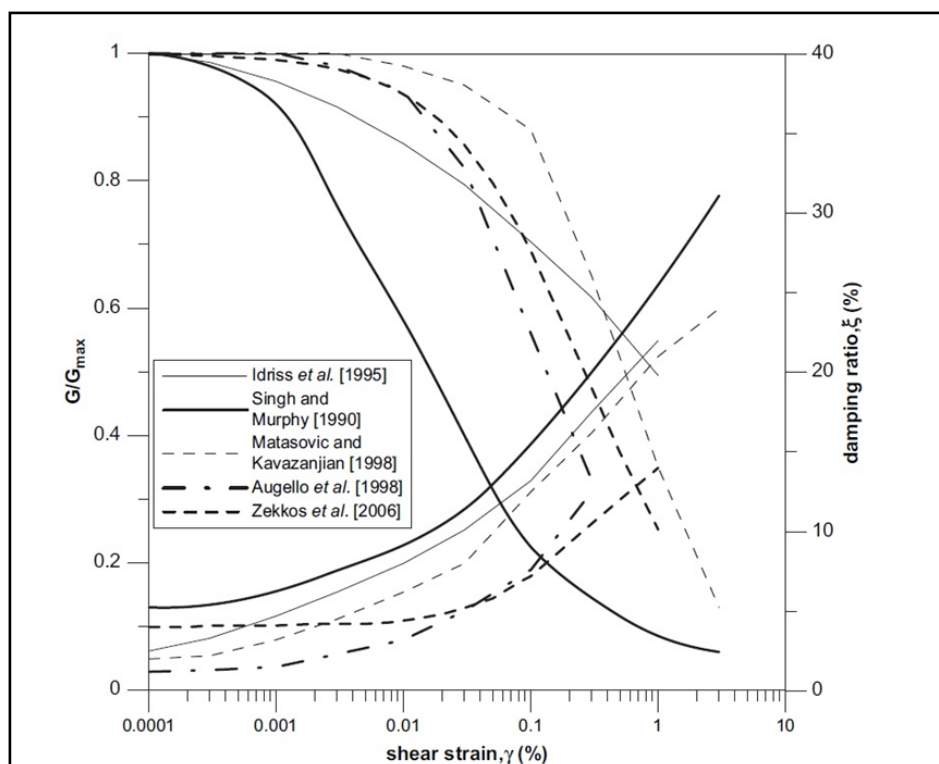
	Vs (m/s)	G (kN/m²)
Στρώση 4	125	15625
Στρώση 3	188	35344
Στρώση 2	250	62500
Στρώση 1	325	105625

Πίνακας 4.1: Δυναμικές ιδιότητες απορριμματικού υλικού ανά στρώση.

Το βασικό στοιχείο στον προσδιορισμό της δυναμικής συμπεριφοράς του απορριμματικού υλικού περιγράφεται όπως και στα εδάφη από την ταχύτητα διάδοσης των διατμητικών κυμάτων (V_s) και από την καμπύλη απομείωσης του μέτρου διάτμησης (G/G_{max}) - αύξησης του λόγου απόσβεσης (ξ), όπου $G_{max} = \rho \cdot V_s^2$, όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 2.

Για τη δεύτερη περίπτωση (Προσομοίωμα 2-Τύπος 2), θεωρήθηκε ότι το ειδικό βάρος είναι ενιαίο, ενώ μεταβάλλεται η ταχύτητα διάδοσης του διατμητικού κύματος V_s . Το ειδικό βάρος του απορριμματικού υλικού θεωρήθηκε $\gamma=10\text{kN/m}^3$. Για τον υπολογισμό του G στον Πίνακα 4.1 χρησιμοποιήθηκε η Εξίσωση (2.1).

Τόσο για το έδαφος όσο και για τα απορρίμματα, η μη-γραμμική συμπεριφορά των υλικών ελήφθη υπόψη προσεγγιστικά, μέσω μιας επαναληπτικής διαδικασίας σύμφωνα με την οποία οι τιμές της διατμητικής αντοχής και της απόσβεσης των υλικών είναι ανάλογες με τα επίπεδα της διατμητικής παραμόρφωσης. Η μείωση της διατμητικής αντοχής και η αύξηση του ποσοστού της απόσβεσης για το έδαφος βασίστηκαν στις καμπύλες που προτάθηκαν από τον *Idriss* (1995), ενώ οι αντίστοιχες καμπύλες που χρησιμοποιήθηκαν για τα απορρίμματα ήταν από την έρευνα των *Zekkos et al.* (2006) (Διάγραμμα 4.1) για τον δεύτερο τύπο και για τις δοκιμές στην περίπτωση 2, Πίνακας 4.2.



Διάγραμμα 4.1: Καμπύλες $\gamma(\%) - \xi(\%) - G/G_{\max}$ (Zekkos *et al.*, 2006).

ΤΥΠΟΣ 2 – τιμές από Διάγραμμα 4.1			
	γ	G/G_{\max}	$\xi(\%)$
1	0,0002	1,0	4,2
2	0,0003	0,998	4,21
3	0,002	0,98	4,3
4	0,003	0,981	4,31
5	0,02	0,89	4,99
6	0,03	0,86	5,1
7	0,2	0,67	9,0
8	0,3	0,46	10,7
9	0,4	0,42	12,0
10	0,5	0,36	13,5

Πίνακας 4.2: Τιμές από Διάγραμμα 4.1.

Για την περίπτωση 3 στη τρίτη δοκιμή, ο τύπος 3 θεωρήθηκε μεταβαλλόμενο ειδικό βάρος (γ) και ταχύτητα διάδοσης των διατμητικών κυμάτων (V_s) ανάλογα με το μέσο βάθος κάθε στρώσης. Χρησιμοποιήθηκαν οι παραπάνω καμπύλες απομείωσης ενώ δεν χρησιμοποιήθηκε κοινή πυκνότητα του απορριμματικού υλικού όπως στη δεύτερη δοκιμή, αλλά με βάση την ενότητα 2.3 όπου αναφέρονται αναλυτικά, χρησιμοποιήθηκαν οι ιδιότητες που υπολογίστηκαν με βάση τους Zekkos *et al.* 2006a, που πρότειναν ένα μοντέλο για το προφίλ του ειδικού βάρους με τη υπερβολική μορφή, η οποία εκφράζεται από την Εξίσωση (4.1). Κατά τη χρήση αυτού θα

πρέπει να επιλεγεί το αντιπροσωπευτικό προφίλ με βάση την αναμενόμενη επιφάνεια της κατανομής της τιμής του ειδικού βάρους με το βάθος:

$$\gamma_{msw} = \gamma_{\varepsilon} + \frac{z}{a_{\gamma} + \beta_{\gamma} \cdot z} \quad \text{Εξίσωση (4.1)}$$

όπου:

γ_{msw} : ειδικό βάρος απορριμμάτων,

γ_i : ειδικό βάρος κοντά στην επιφάνεια (kN/m^3),

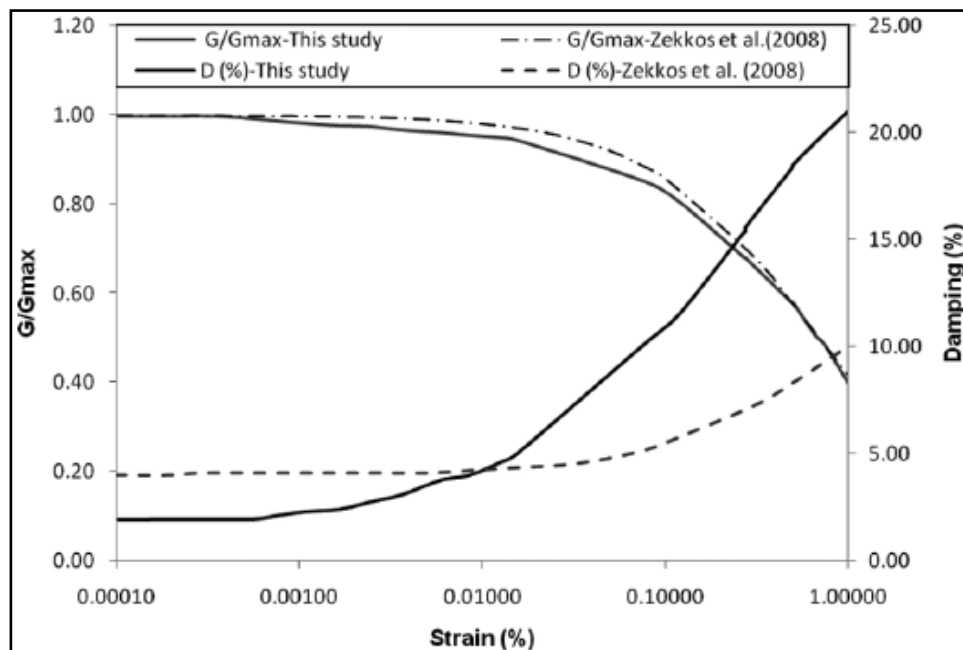
z : βάθος (m),

a_{γ} : m^4/kN , β_{γ} : m^3/kN παράμετροι μοντελοποίησης.

Η ποσότητα του εδάφους θεωρήθηκε τυπική, άρα $\alpha = 3$ και $\beta = 0,2$. Συνεπώς, στην τρίτη δοκιμή χρησιμοποιήθηκαν οι ιδιότητες του απορριμματικού υλικού με βάση τον Πίνακα 4.2.

	V_s (m/s)	Z (m)	$\gamma(\text{kN}/\text{m}^3)$	G (kPa)
Στρώση 4	125	5	11,25	1758,1
Στρώση 3	188	10	12	42412
Στρώση 2	250	15	12,5	78125
Στρώση 1	325	20	12,857	135803,6

Πίνακας 4.3: Ταχύτητα διάδοσης V_s και ειδικό βάρος γ (kN/m^3) για περίπτωση 3, προσομοίωμα 3 (τύπος 3).



Διάγραμμα 4.2: Καμπύλες $\gamma(\%) - \xi(\%) - G/G_{max}$ (Anbazhagan, 2016).

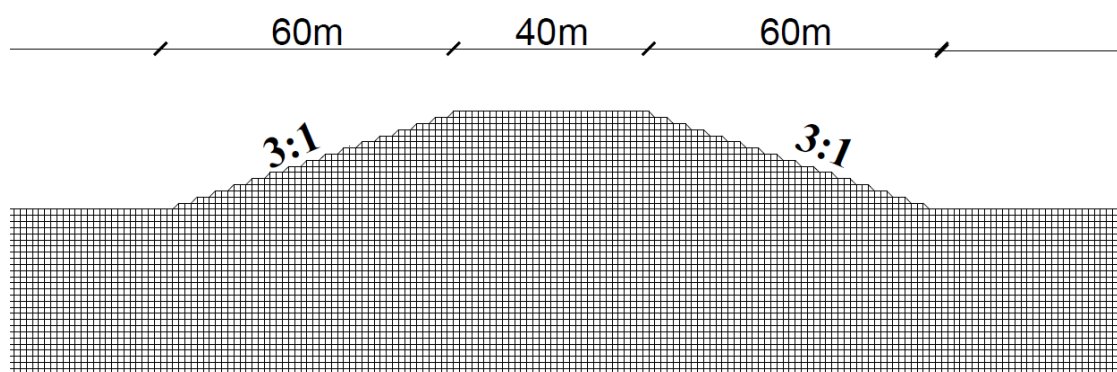
ΤΥΠΟΣ 2 – τιμές από Διάγραμμα 4.2				
		γ	G/Gmax	ξ (%)
1		0.0002	0.99	2.010
2		0.0003	0.989	2.011
3		0.002	0.987	2.200
4		0.003	0.969	2.38
5		0.02	0.929	5.1
6		0.03	0.901	6.25
7		0.2	0.701	14.01
8		0.3	0.649	16.0
9		0.4	0.57	16.5
10		0.5	0.559	18.2

Πίνακας 4.4: Τιμές από Διάγραμμα 4.2.

Επίσης, έγιναν οι παραπάνω δοκιμές για τους τύπους 2, 3 των ΧΥΤΑ αλλάζοντας τις αντίστοιχες καμπύλες απομείωσης που χρησιμοποιήθηκαν για τα απορρίμματα από την έρευνα των *Anbazhagan et al.* (2016) (Διάγραμμα 4.2). Η διατομή για τα προσομοιώματα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν ακριβώς ίδια, σύμφωνα με την Εικόνα 4.4, αλλά και οι ιδιότητες του απορριμματικού υλικού σύμφωνα με τους Πίνακες 4.3 και 4.4 που είναι όμοιες.

4.4 Διακριτοποίηση προσομοιωμάτων

Θεωρώντας συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης (*plane strain*), η σεισμική απόκριση του ΧΥΤΑ που εξετάζεται υπολογίσθηκε με τη χρήση του κώδικα *QUAD4M*. Το πρόγραμμα αυτό πραγματοποιεί διδιάστατες ισοδύναμα γραμμικές αναλύσεις με τη χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων. Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 4.5 τα προσομοιώματα που χρησιμοποιήθηκαν αποτελούνται από τετρακομβικά στοιχεία.



Εικόνα 4.5: Διακριτοποίηση διατομής ΧΥΤΑ.

Σύμφωνα με τον *Kramer (1996)*, η χρήση στοιχείων μεγάλου μεγέθους στην διακριτοποίηση ενός προσομοιώματος μπορεί να οδηγήσει σε φιλτράρισμα των υψηλών συχνοτήτων επειδή η επιρροή των κυμάτων μικρού μήκους ενδέχεται να μην λαμβάνεται υπόψη λόγω της μεγάλης απόστασης μεταξύ των κόμβων του δικτύου. Έτσι, συνίσταται η μέγιστη διάσταση οποιουδήποτε στοιχείου, να έχει μήκος τουλάχιστον ίσο με το ένα πέμπτο περίπου του μικρότερου μήκους κύματος που μπορεί να υπάρξει. Ως εκ τούτου και δεδομένου ότι η ταχύτητα διάδοσης των διατμητικών κυμάτων δίνεται από τη σχέση:

$$V_s = \lambda / T \Rightarrow V_s = \lambda * f \Rightarrow \lambda = V_s / f \quad \text{Εξίσωση (4.2)}$$

Δηλαδή το μήκος κύματος λ είναι ανάλογο της ταχύτητας διάδοσης V_s και αντιστρόφως ανάλογο της συχνότητας f . Συνεπώς, με βάση τα παραπάνω η μέγιστη αποδεκτή διάσταση του κάθε στοιχείου h ισούται με:

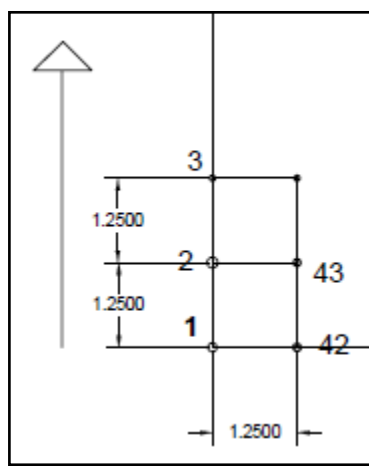
$$h = \lambda / 5 = V_s / (5 * f) \quad \text{Εξίσωση (4.3)}$$

Οι ταχύτητες διάδοσης των διατμητικών κυμάτων διαφέρουν σε κάθε περιοχή του προσομοιώματος (βράχος-έδαφος-ΧΥΤΑ) και το μέγεθος του κάθε στοιχείου προσαρμόστηκε έτσι ώστε να καλύπτει το μήκος κύματος που αντιστοιχεί σε κάθε περιοχή. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα την πύκνωση του δικτύου από τον βράχο προς τον ΧΥΤΑ, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.5. Ιδιαίτερη προσοχή δόθηκε στην ομαλή μετάβαση της πυκνότητας του δικτύου από περιοχή σε περιοχή, προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν τα αριθμητικά σφάλματα. Κατά προσέγγιση και με βάση την Εξίσωση (4.3), τις ιδιότητες των υλικών που επιλέχθηκαν, αλλά και τις ιδιοσυχνότητες των σεισμικών διεγέρσεων που χρησιμοποιήθηκαν, τα μήκη των πλευρών των στοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν ήταν ίδια για το βραχώδες υπόβαθρο και τον ΧΥΤΑ. Για την καλύτερη προσέγγιση των αποτελεσμάτων έγινε κοινή διακριτοποίηση (1.25m x 1.25m) με τετράκομβρα στοιχεία για ολόκληρη την διατομή και επιλέχθηκαν μόνο τετράκομβρα στοιχεία και καθόλου τριγωνικά.

Η εδαφική κίνηση επιβλήθηκε στην βάση του προσομοιώματος, ενώ τα πλαϊνά όρια ήταν ελεύθερα να κινηθούν στην οριζόντια διεύθυνση. Προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν τα προβλήματα ανακλάσεων των σεισμικών κυμάτων στα όρια του προσομοιώματος, χρησιμοποιήθηκαν, μετά από δοκιμές και αξιοποιώντας τις δυνατότητες του συγκεκριμένου προγράμματος, οι εξής τεχνικές: (α) για τον περιορισμό των ανακλάσεων από τα πλαϊνά, τα κατακόρυφα όρια στο πλέγμα εκτείνονται σε ικανοποιητική απόσταση από την περιοχή ενδιαφέροντος, χωρίς να χρησιμοποιηθούν αποσβεστήρες (*dampers*), και (β) για να περιοριστούν

οι ανακλάσεις στη βάση, χρησιμοποιήθηκε μία στρώση βραχώδους υποβάθρου αρκετού ύψους (25m) έτσι ώστε το σεισμικό κύμα να απορροφάται από αυτή και να μην ανακλάται στην εδαφική στρώση ή στον ΧΥΤΑ.

Όλα τα παραπάνω (πύκνωση, συντομικές συνθήκες, κλπ.) επιλέχθηκαν μετά από εκτεταμένη εφαρμογή του κώδικα *QUAD4M* σε απλά μονοδιάστατα προσομοιώματα οριζόντιας εδαφικής στρώσης και με διασταύρωση των αποτελεσμάτων με αναλυτικές λύσεις.



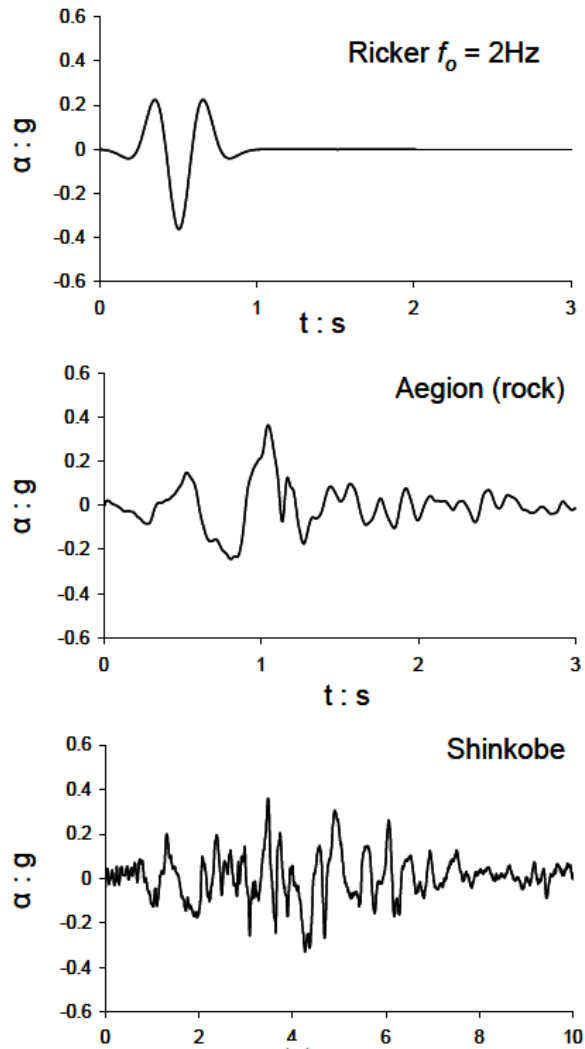
Εικόνα 4.6: Αρίθμηση κόμβων κάναβου διατομής.

Η αρίθμηση των κόμβων έγινε όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.6 από κάτω προς τα πάνω γιατί έτσι ελαχιστοποιήθηκε ο χρόνος επεξεργασίας από το λογισμικό *QUAD4M*, επειδή μειώνεται το υπολογιστικό κόστος των επιλύσεων των εξισώσεων.

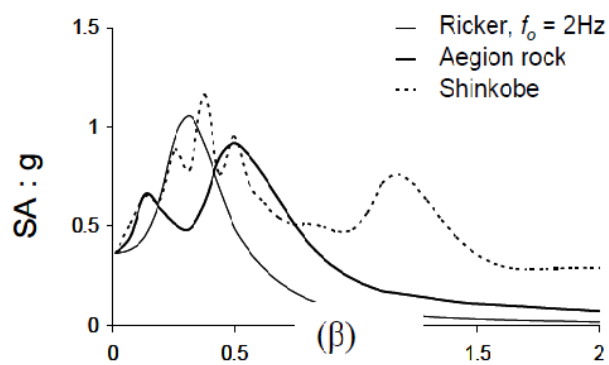
4.5 Χαρακτηριστικά εδαφικής κίνησης

Οι σεισμικές διεγέρσεις που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτήν τη μελέτη αποτελούνται από τρία επιταχυνσιογραφήματα: τα δύο αποτελούν καταγραφές πραγματικών σεισμικών γεγονότων και το τρίτο αποτελεί έναν εξιδανικευμένο παλμό. Το πρώτο επιταχυνσιογράφημα (*Shinkobe*) αποτελεί καταγραφή από τον ισχυρό σεισμό του 1995 στο *Kobe* της Ιαπωνίας. Το δεύτερο επιταχυνσιογράφημα είναι ένα «τροποποιημένο» επιταχυνσιογράφημα στο κτίριο του ΟΤΕ από τον σεισμό του Αιγίου το 1995 (*Aegion Rock excitation*), στο οποίο έχει απαλειφθεί η επίδραση των επιφανειακών εδαφικών στρώσεων. Το τελευταίο επιταχυνσιογράφημα είναι ένας απλός παλμός *Ricker* με χαρακτηριστική συχνότητα $f_0 = 2\text{Hz}$. Απλοί παλμοί (ημιτονοειδείς, *Ricker*, κ.λπ.) χρησιμοποιούνται πολύ συχνά στη σεισμική μηχανική επειδή είναι πιο εύκολο να κατανοηθεί και

να επεξηγηθεί η απόκριση ενός σύνθετου συστήματος, απ' ότi αν χρησιμοποιηθεί μία πραγματική καταγραφή. Εξ' άλλου, παρά την απλοποιημένη του μορφή, ο παλμός *Ricker* καλύπτει ένα ευρύ πεδίο συχνοτήτων που φτάνει έως και τα $3f_0$.



(a)



(b)

Εικόνα 4.7: (a) Επιταχυνσιογραφήματα (b) και φάσματα ελαστικής απόκρισης.

Προκειμένου να καλυφθεί ένα επαρκές πεδίο μη-γραμμικής συμπεριφοράς (παραμόρφωσης) τόσο του εδάφους όσο και των απορριμματικών υλικών έγινε αναγωγή των επιταχυνσιογραφημάτων έτσι ώστε η μέγιστη εδαφική επιτάχυνση (*Peak Ground Acceleration-PGA*) της κάθε χρονοϊστορίας να ισούται είτε 0.1g, είτε 0.36g. Εξετάσθηκαν δύο περιπτώσεις:

- Περίπτωση Ι (γραμμική περίπτωση): $PGA = 0.1g$.
- Περίπτωση ΙΙ (υψηλό επίπεδο μη γραμμικότητας): $PGA = 0.36g$.

Οι χρονοϊστορίες που χρησιμοποιήθηκαν είναι τρεις και καλύπτουν ένα εύρος διαφορετικών διεγέρσεων. Πιο συγκεκριμένα, ο παλμός *Ricker* είναι μία διέγερση χαμηλής περιόδου η οποία εξασθενεί πλήρως μετά τα 0.5s, ενώ οι άλλες δυο καταγεγραμμένες εδαφικές κινήσεις στο *Kobe* και στο Αίγιο καλύπτουν ένα φάσμα υψηλότερων περιόδων. Επίσης, αξίζει να σημειωθεί πως η διέγερση από τον σεισμό του *Kobe* έχει περισσότερους κύκλους φόρτισης από τις άλλες δύο χρονοϊστορίες και πιο πλούσιο συχνοτικό περιεχόμενο, όπως φαίνεται και στα φασματά (Εικόνα 4.7).

4.6 Δημιουργία αρχείων εισόδου στο QUAD4M

Για την εισαγωγή των δεδομένων στο *QUAD4M* και την επεξεργασία αυτών είναι απαραίτητη η δημιουργία τριών αρχείων ανά περίπτωση. Το πρώτο αρχείο είναι το αρχείο του σεισμού με τις επιταχύνσεις των σεισμών που χρησιμοποιήθηκαν, δηλαδή για το Αίγιο 0.1g (Εικόνα 4.8) και 0.36g, για το *Kobe* 0.1g και 0.36g και για τον *Ricker* 0.1g και 0.36g.

aigio earthquake accelerogram 0.005								
*								
xyta								
0.00000	0.01926	0.02117	0.02232	0.02234	0.02100	0.01840	0.01498	
0.01135	0.00810	0.00557	0.00378	0.00245	0.00118	-0.00033	-0.00220	
-0.00438	-0.00676	-0.00931	-0.01213	-0.01535	-0.01899	-0.02281	-0.02633	
-0.02898	-0.03036	-0.03044	-0.02962	-0.02856	-0.02790	-0.02799	-0.02875	
-0.02981	-0.03077	-0.03151	-0.03226	-0.03356	-0.03590	-0.03948	-0.04400	
-0.04879	-0.05316	-0.05669	-0.05948	-0.06205	-0.06506	-0.06890	-0.07346	
-0.07817	-0.08227	-0.08521	-0.08690	-0.08773	-0.08826	-0.08880	-0.08913	
-0.08846	-0.08573	-0.08004	-0.07110	-0.05944	-0.04619	-0.03278	-0.02045	
-0.01002	-0.00176	0.00438	0.00862	0.01120	0.01239	0.01257	0.01232	
0.01230	0.01311	0.01499	0.01773	0.02074	0.02332	0.02501	0.02585	
0.02635	0.02727	0.02922	0.03234	0.03630	0.04050	0.04441	0.04789	
0.05129	0.05517	0.06000	0.06580	0.07210	0.07819	0.08354	0.08818	
0.09277	0.09840	0.10603	0.11597	0.12757	0.13932	0.14936	0.15607	
0.15862	0.15720	0.15279	0.14680	0.14052	0.13473	0.12962	0.12476	
0.11938	0.11255	0.10337	0.09116	0.07559	0.05677	0.03538	0.01256	
-0.01028	-0.03184	-0.05123	-0.06822	-0.08319	-0.09688	-0.11003	-0.12298	
-0.13557	-0.14723	-0.15722	-0.16501	-0.17043	-0.17369	-0.17517	-0.17532	
-0.17441	-0.17266	-0.17030	-0.16775	-0.16565	-0.16478	-0.16584	-0.16921	

Εικόνα 4.8 : Ενδεικτικές τιμές επιταχύνσεων από το αρχείο για Αίγιο 0.1g.

Το δεύτερο αρχείο είναι το αναλυτικό αρχείο του κάθε προσομοιώματος ΧΥΤΑ, όπου τοποθετούνται τα στοιχεία όπως ο αριθμός των κόμβων και αναλυτικά οι κόμβοι, το ειδικό βάρος του εδάφους, ο αριθμός *Poisson*, το ειδικό βάρος, η απόσβεση (ξ), το μέτρο διάτμησης (G) και οι βαθμοί ελευθερίας του κάθε κόμβου (Εικόνες 4.9 και 4.10).

Το τρίτο αρχείο (Εικόνα 4.11) περιέχει τα δυναμικά χαρακτηριστικά ολόκληρης της διατομής, όχι μόνο του απορριμματικού υλικού αλλά και του εδάφους κάτω από αυτό, και σε αυτό τοποθετούνται οι τιμές από τις καμπύλες απομοίωσης. Η μείωση της διατμητικής αντοχής και η αύξηση του ποσοστού της απόσβεσης για το έδαφος βασίστηκαν στις καμπύλες που προτάθηκαν από τον *Idriss* (1972) ενώ οι αντίστοιχες καμπύλες που χρησιμοποιήθηκαν για τα απορρίμματα ήταν από την έρευνα των *Zekkos et al.* (2006).

```

Seismic Analysis of Quad4M AIGIO 0.1G GEO1
UNITS (E for English. S for SI):          *** (A1)          ***
S
  DRF    PRM  ROCKVP  ROCKVS  ROCKRHO          *** (5F10.0)      ***
  1.00   0.65
NELM NDPT NSLP          *** (315)      ***
1406414409  0
KGMAX KGEQ N1EQ N2EQ N3EQ NUMB  KV KSAV          *** (815)      ***
600 600  1  1 600  8  2  1
  DTEQ  EQMUL1  EQMUL2  UGMAX1  UGMAX2 HDRX HDRY NPLX NPLY  PRINPUT *** (5F10.0.4I5.F10.0)
  0.005 0.2581778  1          3  3  8  1  0.498
EARTHQUAKE INPUT FILE NAME(S) & FORMAT(S) (* for FREE FORMAT) *** (A)          ***
aigio.prn
*
accely.txt
*
SOUT AOUT KOUT          *** (315)      ***
  0  1  1
ACCELERATION OUTPUT FORMAT (M or C). FILE PREFIX. AND SUFFIX: *** (A)          ***
COMBINED
ACCELN
Q4A
SEISMIC COEFF OUTPUT FORMAT (M or C). FILE PREFIX. AND SUFFIX: *** (A)          ***
COMBINED
SEISCOEF
Q4K
SYSTEM STATE OUTPUT FILE:          *** (A)
TELIKO.q4r
  N NP1 NP2 NP3 NP4 TYPE  DENS  PO  GMX  G  XL LSTR *** (6I5.5F10.0.I5) ***
  1  2  1  42  43  5  22000  0.30 19800000 19800000 0.01
  2  3  2  43  44  5  22000  0.30 19800000 19800000 0.01
  3  4  3  44  45  5  22000  0.30 19800000 19800000 0.01
  4  5  4  45  46  5  22000  0.30 19800000 19800000 0.01
  5  6  5  46  47  5  22000  0.30 19800000 19800000 0.01
  6  7  6  47  48  5  22000  0.30 19800000 19800000 0.01
  7  8  7  48  49  5  22000  0.30 19800000 19800000 0.01
  8  9  8  49  50  5  22000  0.30 19800000 19800000 0.01
  9 10  9  50  51  5  22000  0.30 19800000 19800000 0.01
 10 11 10  51  52  5  22000  0.30 19800000 19800000 0.01

```

Εικόνα 4.9: Αρχείο ΧΥΤΑ για τον σεισμό Αίγιο με 0.1g.

N	XORD	YORD	BC OUT	X2IH	X1IH	XIH	X2IV	X1IV	XIV	***
1	0.00	0.00	2							
2	0.00	1.25	2							
3	0.00	2.50	2							
4	0.00	3.75	2							
5	0.00	5.00	2							
6	0.00	6.25	2							
7	0.00	7.50	2							
8	0.00	8.75	2							
9	0.00	10.00	2							
10	0.00	11.25	2							
11	0.00	12.50	2							
12	0.00	13.75	2							
13	0.00	15.00	2							
14	0.00	16.25	2							
15	0.00	17.50	2							
16	0.00	18.75	2							
17	0.00	20.00	2							
18	0.00	21.25	2							
19	0.00	22.50	2							

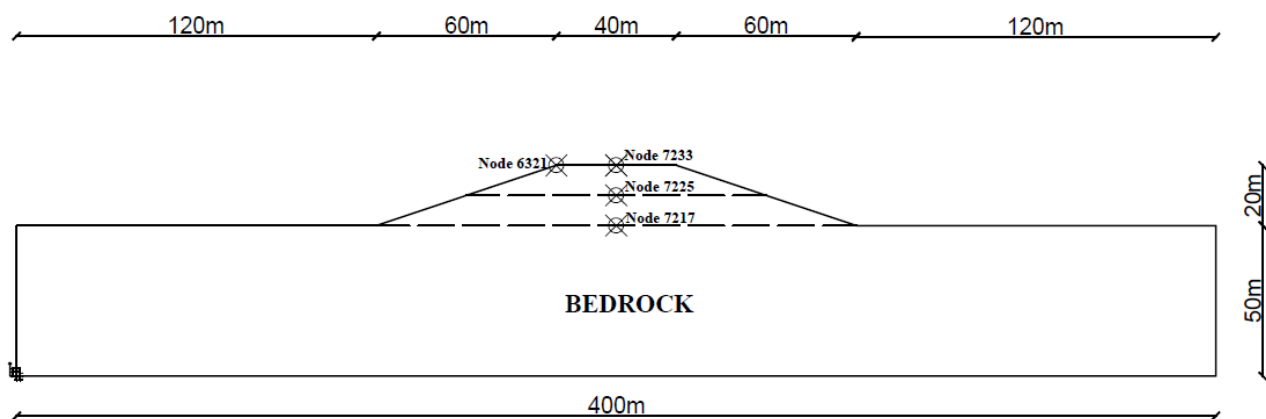
Εικόνα 4.10: Δεδομένα κόμβων.

6
10 #1 MODULUS FOR WASTE (Zekkos et al) 62-76%
.0001 .0003 .001 .003 .01 .03 0.1 0.3
1. 3.
1.0 0.99 0.99 0.98 0.94 0.86 0.689 0.475
0.252 0.121
10 DAMPING FOR WASTE (Zekkos et al) 62-76%
.0001 .0003 .001 .003 .01 .03 0.1 0.3
1. 3.
4.00 4.10 4.10 4.20 4.40 5.20 7.20 10.5
14.0 21.0
10 #2 MODULUS FOR WASTE2
.0002 .0003 .002 .003 .02 .03 0.2 0.3
0.4 0.5
0.99 0.989 0.987 0.969 0.929 0.901 0.701 0.649
0.57 0.559
10 DAMPING FOR WASTE2
.0002 .0003 .002 .003 .02 .03 0.2 0.3
0.4 0.5
2.01 2.011 2.20 2.38 5.10 6.25 14.01 16.0
16.5 18.2

Εικόνα 4.11: Αρχείο μεταβολής δυναμικών παραμέτρων.

4.7 Αριθμητικά αποτελέσματα

Στη συνέχεια, γίνεται η παρουσίαση και ο σχολιασμός των βασικών αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τις αριθμητικές προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσιο αυτής της εργασίας. Οι κόμβοι που εξετάστηκαν είναι οι κόμβοι στο μέσον της διατομής του ΧΥΤΑ: Node 7217 στη βάση του ΧΥΤΑ και ο κόμβος Node 7233 στην κορυφή του ΧΥΤΑ σύμφωνα με την Εικόνα 4.12.

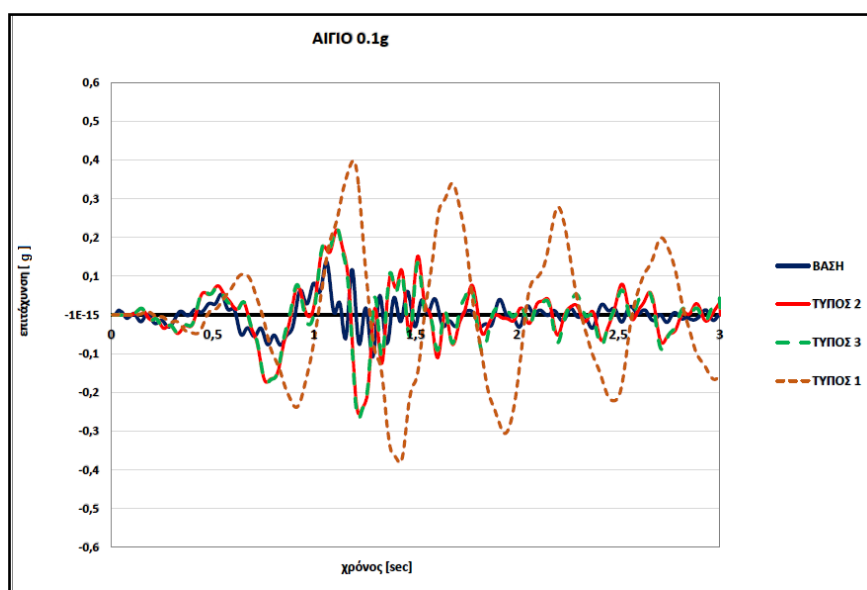


Εικόνα 4.12: Υπό εξέταση κόμβοι.

A) Με τη χρήση των καμπυλών απομείωσης από Zekkos 2006

i) Αίγιο 0,1 g

Στη δοκιμή με βάση τη σεισμική καταγραφή από το Αίγιο με μέγιστη επιτάχυνση 0,1g, παρατηρείται διαφορά στις χρονοϊστορίες επιτάχυνσης, τόσο στη βάση και στη στέψη του ΧΥΤΑ, αλλά και στις διάφορες περιπτώσεις προσομοίωσης. Στον τύπο 1, όπου θεωρήθηκε ενιαίο ειδικό βάρος (γ) σε όλο τον ΧΥΤΑ και ενιαία απομείωση στον λόγο απόσβεσης και στο G/G_{max} , παρατηρούνται μεγαλύτερες επιταχύνσεις σε σχέση με τον τύπο 2 και 3, όπου έχουμε διαφορετικές ιδιότητες στο απορριμματικό υλικό (Διάγραμμα 4.3). Στους τύπους 2 και 3 παρατηρούνται μικρές διαφορές στις χρονοϊστορίες των επιταχύνσεων τους στη κορυφή του ΧΥΤΑ όπως φαίνεται και από τον Πίνακα 4.3.



Διάγραμμα 4.3: Χρονοϊστορίες επιτάχυνσης για Αίγιο 0,1g.

Όπως έχει αναφερθεί αναλυτικά στην ενότητα 4.3:

- Όπου τύπος 1 χρησιμοποιήθηκε ένας τύπος υλικού στον ΧΥΤΑ με ενιαίο $\gamma=10 \text{ kN/m}^3$ και καμπύλες απομείωσης $\gamma - \xi - G/G_{\max}$ από τους Zekkos *et al.* (2006) (Εικόνα 4.3).
- Στον τύπο 2 χρησιμοποιήθηκε ο Πίνακας 4.5 για τη δημιουργία των αρχείων.
- Στον τύπο 3 χρησιμοποιήθηκαν οι παραπάνω καμπύλες απομείωσης ενώ δεν χρησιμοποιήθηκε κοινό ειδικό βάρος του απορριμματικού υλικού. Τα αρχεία δημιουργήθηκαν με τη χρήση του Πίνακα 4.6.

	$V_s \text{ (m/s)}$	$G \text{ (kN/m}^2\text{)}$
Στρώση 4	125	15625
Στρώση 3	188	35344
Στρώση 2	250	62500
Στρώση 1	325	105625

Πίνακας 4.5: Δυναμικές ιδιότητες απορριμματικού υλικού ανά στρώση.

	$V_s \text{ (m/s)}$	$Z \text{ (m)}$	$\gamma \text{ (kN/m}^3\text{)}$
Στρώση 4	125	5	11,25
Στρώση 3	188	10	12,00
Στρώση 2	250	15	12,50
Στρώση 1	325	20	12,86

Πίνακας 4.6: Ταχύτητα διάδοσης V_s και ειδικό βάρος εδάφους γ (kN/m^3) για περίπτωση 3, προσομοίωμα 3(Τύπος 3).

ΑΙΓΙΟ 0.1g	2η περίπτωση ΤΥΠΟΣ 2 $\gamma=10 \text{ kN/m}^3$		3η περίπτωση ΤΥΠΟΣ 3 διάφορα γ		1η περίπτωση ΤΥΠΟΣ 1 ενιαίος ΧΥΤΑ	
	max	min	max	min	max	min
ΒΑΣΗ (Node 7217)	0,14	-0,11	0,14	-0,11	0,14	-0,11
ΚΟΡΥΦΗ (Node 7233)	0,22	-0,26	0,23	-0,27	0,40	-0,38

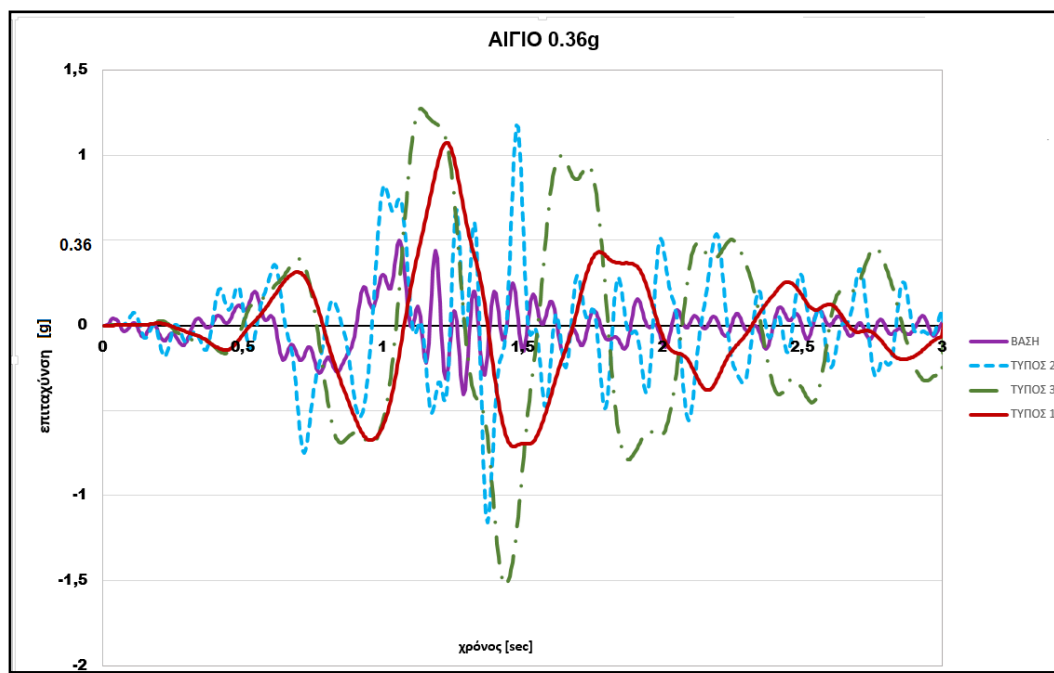
Πίνακας 4.7: Max/Min επιταχύνσεις βάσης - κορυφής για τις διάφορες περιπτώσεις για Αίγιο 0,1g.

Λόγος Ενίσχυσης		
1,85	$\gamma=10 \text{ kN/m}^3$	ΤΥΠΟΣ 2
1,95	Διαφορετικά γ	ΤΥΠΟΣ 3
2,88	ενιαίος ΧΥΤΑ	ΤΥΠΟΣ 1

Πίνακας 4.8: Λόγος ενίσχυσης κορυφής/βάσης για τις τρεις περιπτώσεις για Αίγιο 0,1g.

ii) Αίγιο 0,36g

Για τη σεισμική δόνηση από το Αίγιο με επιτάχυνση 0,36g που χρησιμοποιήθηκε, παρατηρείται διαφορά στις χρονοϊστορίες της επιτάχυνσης στην κορυφή του ΧΥΤΑ όπως φαίνεται στους Πίνακες 4.5 και 4.6. Μεγάλες διαφορές παρατηρούνται και στους τρεις τύπους δοκιμών όπως παρατηρείται στο Διάγραμμα 4.4 και σχετίζεται με τα χαρακτηριστικά και την ένταση του σεισμού (μη γραμμική απόκριση ΧΥΤΑ) για 0.36g.



Διάγραμμα 4.4: Χρονοϊστορίες επιτάχυνσης για Αίγιο 0,36g.

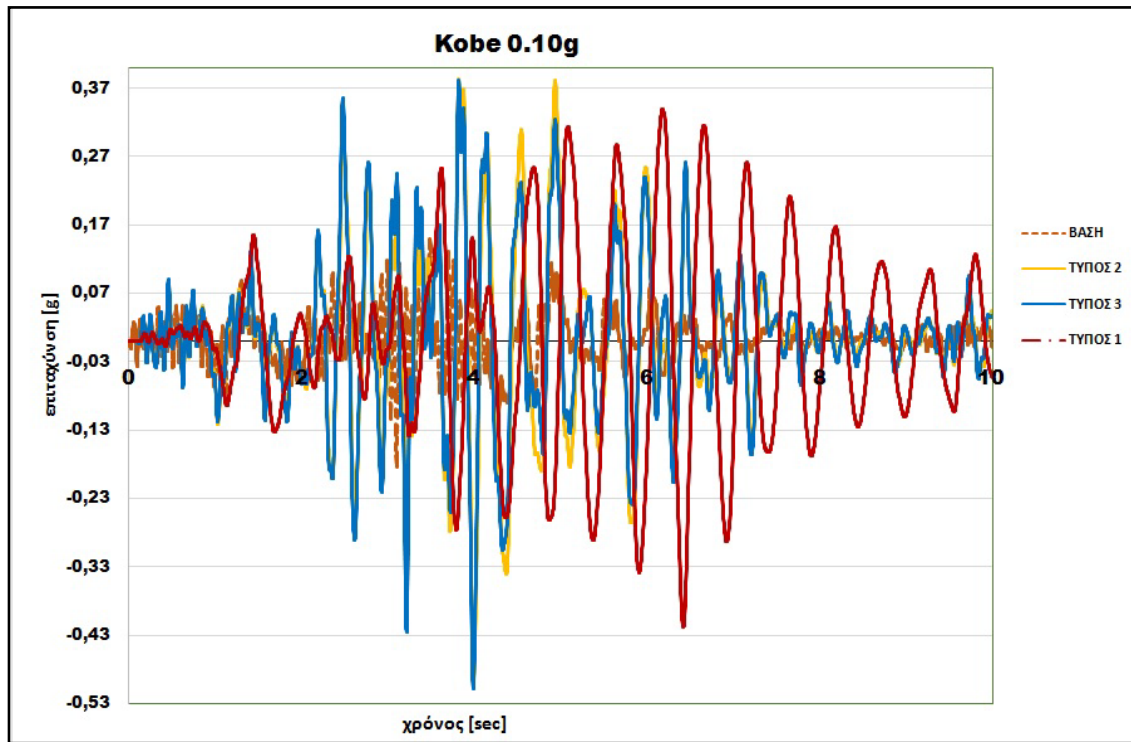
ΑΙΓΙΟ 0.36g	1η περίπτωση ΤΥΠΟΣ 1 Ενιαίος ΧΥΤΑ		2η περίπτωση ΤΥΠΟΣ 2 $\gamma=10 \text{ kN/m}^3$		3η περίπτωση ΤΥΠΟΣ 3 Διάφορα γ	
	<i>max</i>	<i>min</i>	<i>max</i>	<i>min</i>	<i>max</i>	<i>min</i>
ΒΑΣΗ (Node 7217)	0,36	-0,34	0,36	-0,34	0,36	-0,34
ΚΟΡΥΦΗ (Node 7233)	1,08	-0,71	1,18	-1,16	1,18	-1,16

Πίνακας 4.9: Max/Min επιταχύνσεις βάσης - κορυφής για τις τρεις περιπτώσεις για Αίγιο 0,36g.

Λόγος Ενίσχυσης		
3,27	$\gamma=10 \text{ kN/m}^3$	ΤΥΠΟΣ 2
3,23	διαφ. γ	ΤΥΠΟΣ 3
2,99	ενιαίο ΧΥΤΑ	ΤΥΠΟΣ 1

Πίνακας 4.10: Λόγος ενίσχυσης κορυφής/βάσης για τις τρεις περιπτώσεις για Αίγιο 0,36g.

iii) Kobe 0,1g



Διάγραμμα 4.5 Χρονοϊστορίες επιτάχυνσης για Kobe 0,1g.

ΚΟΒΕ 0,1g	1η περίπτωση ΤΥΠΟΣ 2 $\gamma=10 \text{ kN/m}^3$		2η περίπτωση ΤΥΠΟΣ 3 Διάφορα γ		3η περίπτωση ΤΥΠΟΣ 1 Ενιαίος ΧΥΤΑ	
	<i>max</i>	<i>min</i>	<i>max</i>	<i>min</i>	<i>max</i>	<i>min</i>
ΒΑΣΗ (Node 7217)	0,12	-0,13	0,12	-0,13	0,12	-0,13
ΚΟΡΥΦΗ (Node 7233)	0,38	-0,50	0,38	-0,51	0,34	-0,42

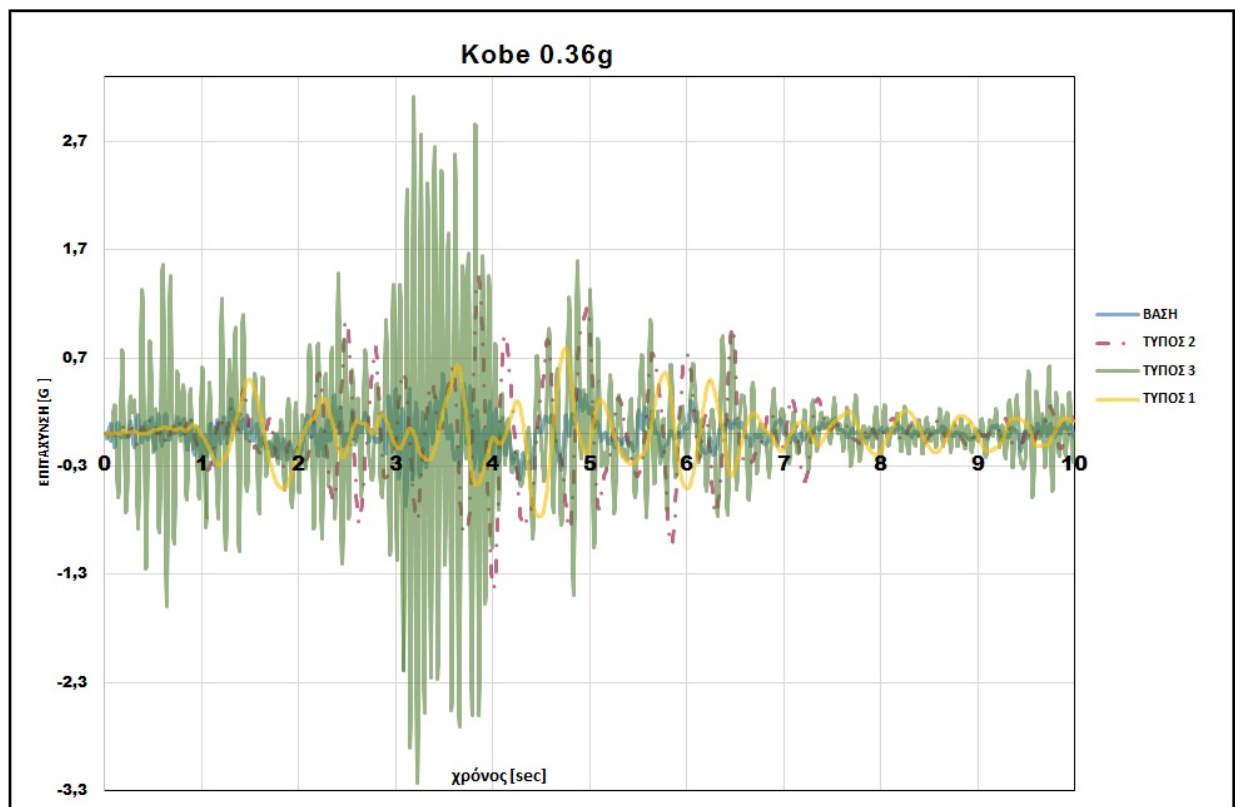
Πίνακας 4.11: Max/Min επιταχύνσεις βάσης - κορυφής για τις τρεις περιπτώσεις για Kobe 0,1g.

Παρατηρείται διαφορά στα διάγραμμα επιτάχυνσης-χρόνου στον τύπο 1 όπου θεωρήθηκε ενιαίο ειδικό βάρος (γ) σε όλο τον ΧΥΤΑ και ενιαία απομείωση στον λόγο απόσβεσης και στο G/G_{\max} και παρατηρούνται μεγαλύτερες επιταχύνσεις σε σχέση με τον τύπο 2 και 3, στην κορυφή του ΧΥΤΑ και όχι στη βάση του. Στους τύπους 2 και 3 παρατηρούνται μικρές διαφορές όπως φαίνεται και από τους Πίνακες 4.11 και 4.12. Παρατηρούνται επίσης μεγάλες τιμές επιταχύνσεων και στους τρεις τύπους. Με λόγους ενίσχυσης 3,5 για τον τύπο 2, 4,17 για τύπο 3 και 4,25 στον τύπο 1 των δοκιμών.

Λόγος Ενίσχυσης		
3,5	$\gamma=10 \text{ kN/m}^3$	ΤΥΠΟΣ 2
4,17	διαφ. γ	ΤΥΠΟΣ 3
4,25	ενιαίο ΧΥΤΑ	ΤΥΠΟΣ 1

Πίνακας 4.12: Λόγος ενίσχυσης κορυφής/βάσης για τις τρεις περιπτώσεις για Kobe 0,1g.

iv) Kobe 0,36g



Διάγραμμα 4.6: Χρονοϊστορίες επιτάχυνσης για Kobe 0,36g.

Για τη σεισμική διέγερση *Kobe* με επιτάχυνση 0,36g παρατηρείται διαφορά στις χρονοϊστορίες επιτάχυνσης όπως φαίνεται στους Πίνακες 4.13 και 4.14. Μεγάλες διαφορές παρατηρούνται και στους τρεις τύπους δοκιμών. Παρατηρούμε ότι ειδικά στον τύπο 3 πολύ μεγάλη διαφορά στις επιταχύνσεις σε σύγκριση με τον τύπο 1 και 2. Αυτή είναι η περίπτωση προσομοιώματος με διαφορετικό ειδικό βάρος ανά στρώση απορριμμάτων στον ΧΥΤΑ, που προσεγγίζει καλύτερα ένα πραγματικό προσομοίωμα και λόγω των χαρακτηριστικών του σεισμού του *Kobe* και των εντάσεων του σεισμού έχουμε μεγάλες επιταχύνσεις στον ΧΥΤΑ και κυρίως στην κορυφή του.

Kobe 0,36g	1η περίπτωση	ΤΥΠΟΣ 2 $\gamma=10 \text{ kN/m}^3$	2η περίπτωση	ΤΥΠΟΣ 3 Διάφορα γ	3η περίπτωση	ΤΥΠΟΣ 1 Ενιαίος ΧΥΤΑ
	<i>max</i>	<i>min</i>	<i>max</i>	<i>min</i>	<i>max</i>	<i>min</i>
ΒΑΣΗ (Node 7217)	0,55	-0,67	0,55	-0,67	0,55	-0,67
ΚΟΡΥΦΗ (Node 7233)	1,45	-1,42	3,11	-3,23	0,79	-0,76

Πίνακας 4.13: Max/Min επιταχύνσεις βάσης - κορυφής για τις τρεις περιπτώσεις για Kobe 0,36g.

Λόγος Ενίσχυσης		
2,15	$\gamma=10 \text{ kN/m}^3$	ΤΥΠΟΣ 2
4,79	διαφ. γ	ΤΥΠΟΣ 3
1,19	ενιαίο ΧΥΤΑ	ΤΥΠΟΣ 1

Πίνακας 4.14: Λόγος ενίσχυσης κορυφής/βάσης για τις τρεις περιπτώσεις για Kobe 0,36g.

ν) Ricker 0,1g

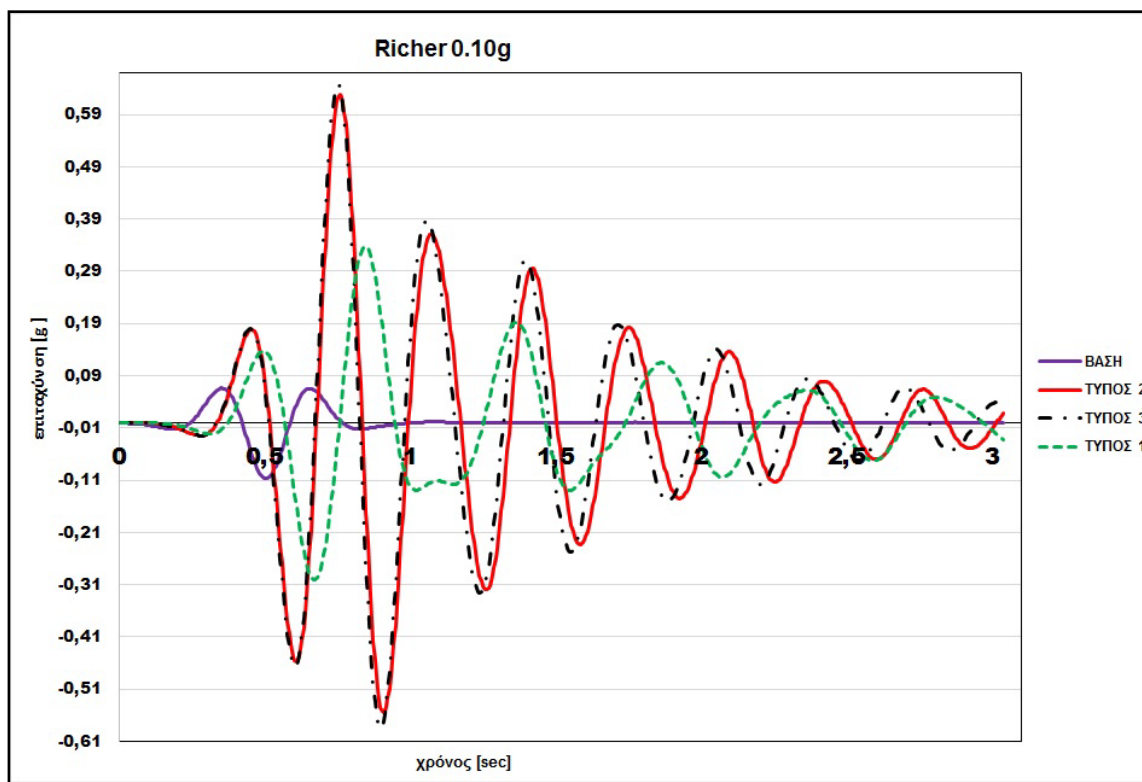
Για τον παλμό Ricker με μέγιστη επιτάχυνση 0,1g παρατηρείται διαφορά στις хроνοϊστορίες επιτάχυνσης όπως φαίνεται στους Πίνακες 4.15 και 4.16. Μικρές διαφορές παρατηρούνται και στους δύο τύπους δοκιμών, όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 4.7, δηλαδή στον ΧΥΤΑ τύπο 2 και 3 και μεγάλη διαφορά στον τύπο 1, όπου έχει θεωρηθεί ένας ενιαίος ΧΥΤΑ με κοινά χαρακτηριστικά σε όλη τη μάζα του.

Ricker 0,1g	1η περίπτωση	ΤΥΠΟΣ 2 $\gamma=10 \text{ kN/m}^3$	2η περίπτωση	ΤΥΠΟΣ 3 διάφορα γ	3η περίπτωση	ΤΥΠΟΣ 1 ενιαίος ΧΥΤΑ
	<i>max</i>	<i>min</i>	<i>max</i>	<i>min</i>	<i>max</i>	<i>min</i>
ΒΑΣΗ (Node 7217)	0,07	-0,11	0,07	-0,11	0,07	-0,11
ΚΟΡΥΦΗ (Node 7233)	0,63	-0,56	0,65	-0,59	0,34	-0,31

Πίνακας 4.15: Max/Min επιταχύνσεις βάσης - κορυφής για τις τρεις περιπτώσεις για Ricker 0,1g.

Λόγος Ενίσχυσης		
5,73	$\gamma=10 \text{ kN/m}^3$	ΤΥΠΟΣ 2
5,91	διαφ. γ	ΤΥΠΟΣ 3
3,09	Ενιαίος ΧΥΤΑ	ΤΥΠΟΣ 1

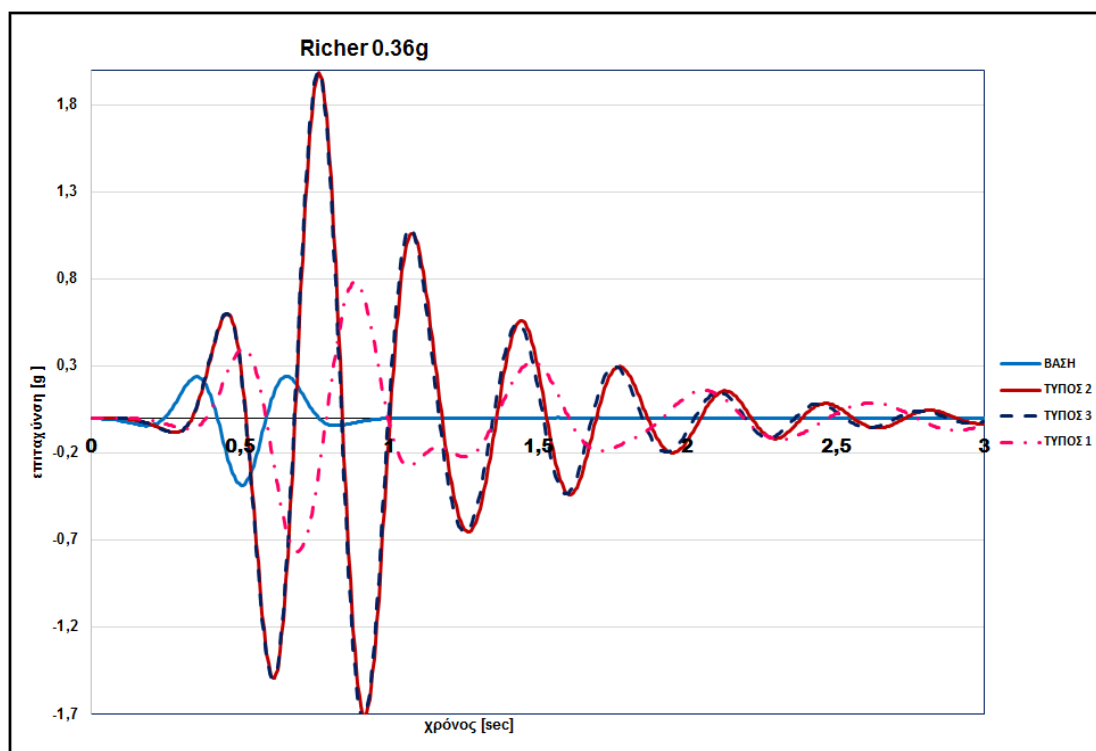
Πίνακας 4.16: Λόγος ενίσχυσης κορυφής/βάσης για τις τρεις περιπτώσεις για Ricker 0,1g.



Διάγραμμα 4.7: Χρονοϊστορίες επιτάχυνσης για Ricker 0,1g.

vi) Ricker 0,36g

Παρατηρείται διαφορά στις χρονοϊστορίες επιτάχυνσης όπως φαίνεται στους Πίνακες 4.17 και 4.18. Παρατηρείται αντίστοιχη συμπεριφορά με τον παλμό του *Ricker* 0,1g όπου στον τύπο 2 και 3 υπάρχουν μικρές διαφορές στις επιταχύνσεις, ενώ στον τύπο 1 οι επιταχύνσεις είναι μικρότερες. Καταγράφονται μέγιστες τιμές στη βάση του ΧΥΤΑ $\alpha_{\max} = 0,24 \text{ m/s}^2$ και στην κορυφή $\alpha_{\max} = 1,99 \text{ m/s}^2$ στον τύπο 3 του δοκιμίου, όπου έχουμε διαφορετικές πυκνότητες ανά στρώση, αλλά διαφορετικές ταχύτητες διάδοσης διατμητικών κυμάτων (V_s).



Διάγραμμα 4.8: Χρονοϊστορίες επιτάχυνσης για Ricker 0.36g.

Ricker 0.36g	1η περίπτωση	ΤΥΠΟΣ 2 $\gamma=10$ kN/m^3	2η περίπτωση	ΤΥΠΟΣ 3 διάφορα γ	3η περίπτωση	ΤΥΠΟΣ 1 ενιαίος ΧΥΤΑ
	<i>max</i>	<i>min</i>	<i>max</i>	<i>min</i>	<i>max</i>	<i>min</i>
ΒΑΣΗ (Node 7217)	0,24	-0,39				
ΚΟΡΥΦΗ (Node 7233)	1,98	-1,71	1,99	-1,74	0,78	-0,77

Πίνακας 4.17: Max/Min επιταχύνσεις βάσης - κορυφής για τις τρεις περιπτώσεις για Ricker 0.36g.

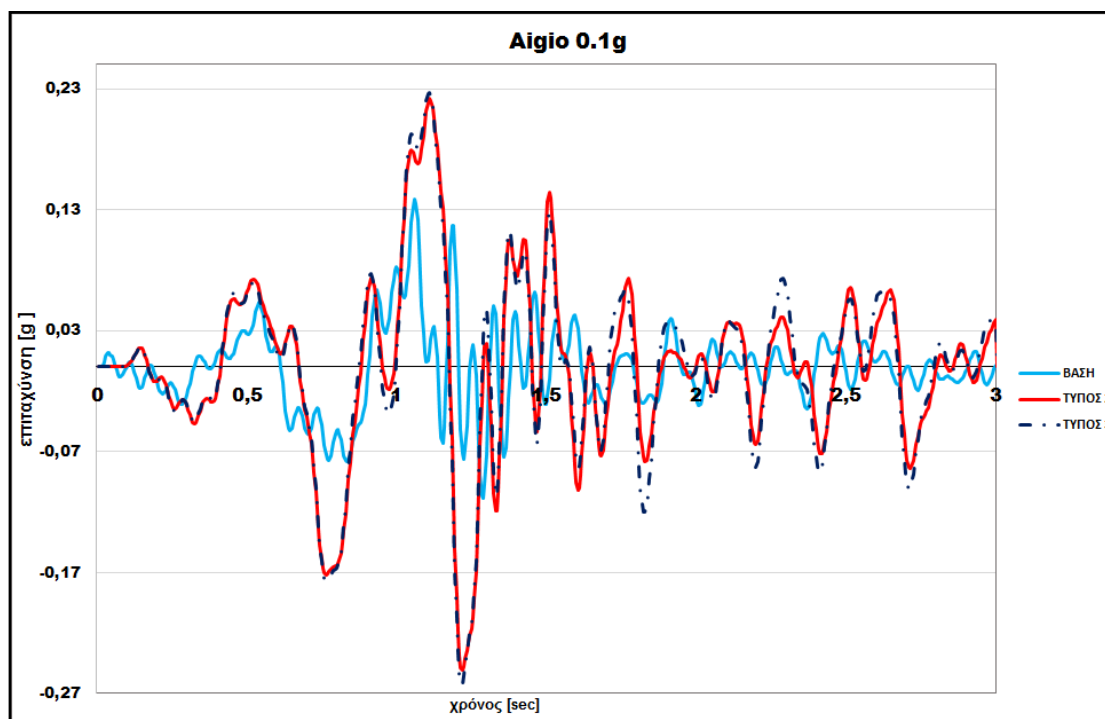
Λόγος Ενίσχυσης		
5,14	$\gamma=10 \text{ KN/m}^3$	ΤΥΠΟΣ 2
5,15	διαφ. γ	ΤΥΠΟΣ 3
2,03	ενιαίο ΧΥΤΑ	ΤΥΠΟΣ 1

Πίνακας 4.18: Λόγος ενίσχυσης κορυφής/βάσης για τις τρεις περιπτώσεις για Ricker 0,36g.

Β) 2^η δοκιμή: Με χρήση των καμπυλών απομείωσης από Anbazhagan et al. (2016)

Οι καμπύλες απομείωσης Anbazhagan et al. (2016) απεικονίζονται στο Διάγραμμα 4.3 στην ενότητα 4.3 όπου και αναφέρονται αναλυτικά. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών με τη χρήση αυτών των καμπυλών απομείωσης. Το προσομοίωμα που χρησιμοποιήθηκε ήταν τέσσερις στρώσεις για $\gamma=10\text{kN/m}^3$ (Τύπος 2) διάφορα γ (πυκνότητες) ανά στρώση απορριμμάτων στον ΧΥΤΑ (Τύπος 3).

i) Αίγιο 0,1g



Διάγραμμα 4.9: Χρονοϊστορίες επιτάχυνσης για Αίγιο 0,1g 2^η δοκιμή.

ΑΙΓΙΟ 0,10g	1η περίπτωση	ΤΥΠΟΣ 2 $\gamma=10\text{ kN/m}^3$	2η περίπτωση	ΤΥΠΟΣ 3 διάφορα γ
	<i>max</i>	<i>min</i>	<i>max</i>	<i>min</i>
ΒΑΣΗ (Node 7217)	0,14	-0,11		
ΚΟΡΥΦΗ (Node 7233)	0,23	-0,25	0,23	-0,26

Πίνακας 4.19: Max/Min επιταχύνσεις βάσης - κορυφής για τις τρεις περιπτώσεις για Αίγιο 0,1g.

Λόγος Ενίσχυσης		
1,82	$\gamma=10\text{ kN/m}^3$	ΤΥΠΟΣ 2
1,90	διαφ. γ	ΤΥΠΟΣ 3

Πίνακας 4.20: Λόγος ενίσχυσης κορυφής/βάσης για τις τρεις περιπτώσεις για Αίγιο 0,1g.

Για τη σεισμική καταγραφή από το Αίγιο με μέγιστη επιτάχυνση 0.1g παρατηρείται διαφορά στις επιταχύνσεις, για τους τύπους 2 και 3, όπου στην κορυφή του ΧΥΤΑ έχουμε μικρές αποκλίσεις. Καταγράφονται μέγιστες τιμές στη βάση του ΧΥΤΑ $\alpha_{\max} = 0,14 \text{ m/s}^2$ και στην κορυφή $\alpha_{\max} = 0,23 \text{ m/s}^2$ στον τύπο 3, όπου έχουμε διαφορετικά ειδικά βάρη (γ) ανά στρώση απορριμμάτων.

ii) Αίγιο 0,36g

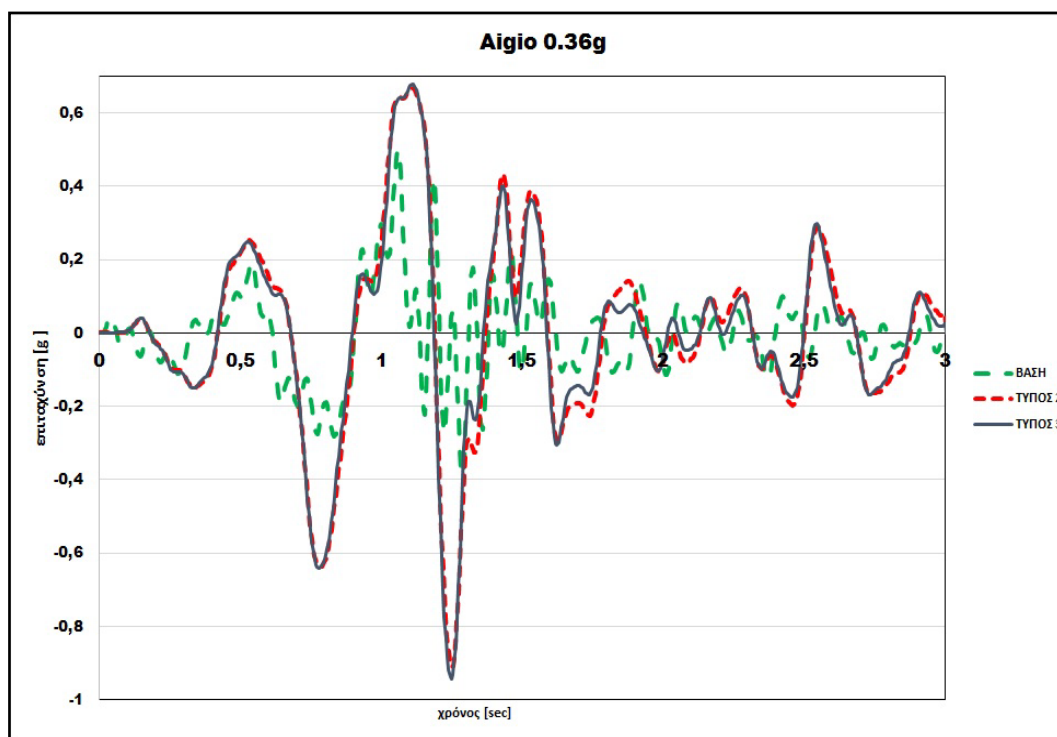
Για τη σεισμική δόνηση στο Αίγιο με επιτάχυνση 0,36g παρατηρείται διαφορά στα διαγράμματα επιτάχυνσης-χρόνου, όπου για τους ΧΥΤΑ τύπου 2 και 3 έχουμε μικρές αποκλίσεις των επιταχύνσεων όπως παρατηρείται στο Διάγραμμα 4.10. Με μέγιστες τιμές στη βάση του ΧΥΤΑ $\alpha_{\max} = 0,50 \text{ m/s}^2$ και κορυφής $\alpha_{\max} = 0,67 \text{ m/s}^2$ στον τύπο 3 και τύπο 2, η μέγιστη τιμή συμπίπτει.

ΑΙΓΙΟ 0.36g	1η περίπτωση	ΤΥΠΟΣ 2 $\gamma=10$ kN/m³	2η περίπτωση	ΤΥΠΟΣ 3 διάφορα γ
	<i>max</i>	<i>min</i>	<i>max</i>	<i>min</i>
ΒΑΣΗ (Node 7217)	0,38	-0,36		
ΚΟΡΥΦΗ (Node 7233)	0,67	-0,91	0,67	-0,91

Πίνακας 4.21: Max/Min επιταχύνσεις βάσης - κορυφής για τις τρεις περιπτώσεις για Αίγιο 0,36g.

Λόγος Ενίσχυσης		
2,53	$\gamma=10 \text{ kN/m}^3$	ΤΥΠΟΣ 2
2,53	διαφ. γ	ΤΥΠΟΣ 3

Πίνακας 4.22: Λόγος ενίσχυσης κορυφής/βάσης για τις τρεις περιπτώσεις για Αίγιο 0,36g.



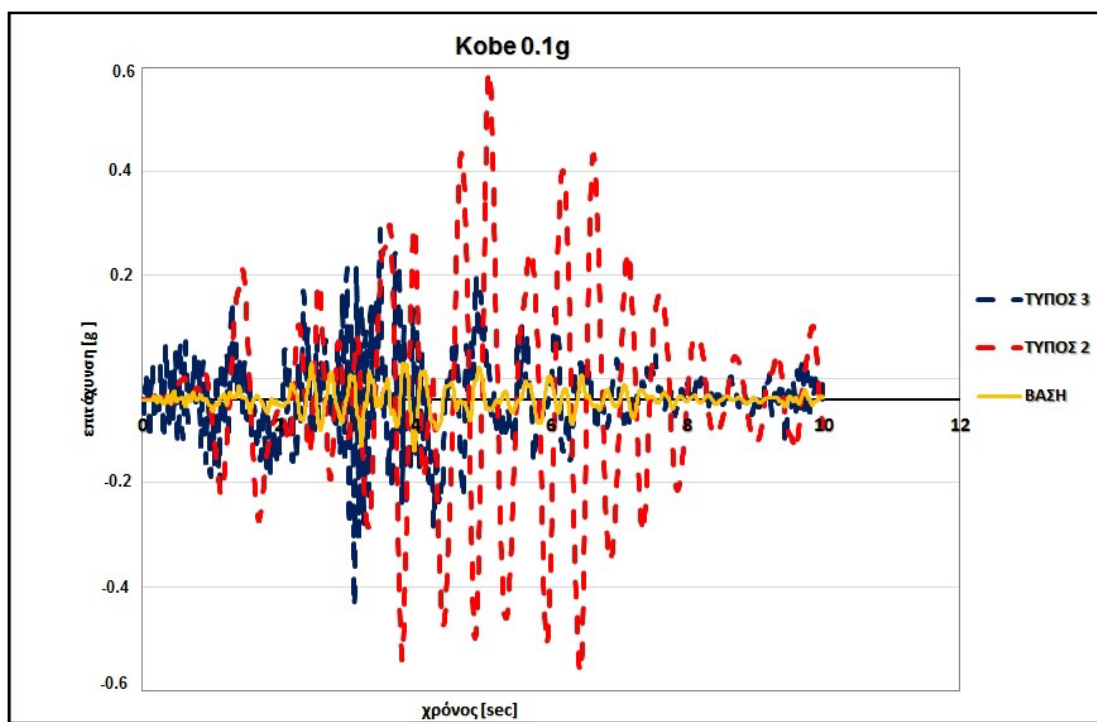
Διάγραμμα 4.10: Χρονοϊστορίες επιτάχυνσης για Αίγιο 0,36g 2^η δοκιμή.

iii) Kobe 0,1g

Για τη σεισμική καταγραφή από το Kobe με μέγιστη επιτάχυνση 0,1g παρατηρείται διαφορά στα διάγραμμα επιτάχυνσης-χρόνου όπως φαίνεται στους Πίνακες 4.18 και 4.19. Μεγάλες διαφορές παρατηρούνται και στους δύο τύπους δοκιμών, όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 4.11. Παρατηρούμε ότι ειδικά στον ΧΥΤΑ τύπου 2 υπάρχει πολύ μεγάλη διαφορά με μεγαλύτερες τιμές επιτάχυνσης στο διάγραμμα σε σχέση με τον ΧΥΤΑ τύπου 3. Αυτή είναι η περίπτωση με κοινό ειδικό βάρος $\gamma=10\text{kN/m}^3$ και διαφορετική ταχύτητα διάδοσης ανά στρώση απορριμμάτων στον ΧΥΤΑ. Με μέγιστες τιμές στη βάση του ΧΥΤΑ $\alpha_{\max}=1,65\text{ m/s}^2$ και κορυφής $\alpha_{\max}=3,17\text{ m/s}^2$ στον τύπο 2.

Kobe 0,10 g	1η περίπτωση	ΤΥΠΟΣ 2 $\gamma=10\text{ kN/m}^3$	2η περίπτωση	ΤΥΠΟΣ 3 διάφορα γ
	<i>max</i>	<i>min</i>	<i>max</i>	<i>min</i>
ΒΑΣΗ (Node 7217)	0,11	-0,12		-
ΚΟΡΥΦΗ (Node 7233)	0,61	-0.55	0,46	-0,50

Πίνακας 4.23: Max/Min επιταχύνσεις βάσης - κορυφής για τις τρεις περιπτώσεις για Kobe 0,1 g.



Διάγραμμα 4.11: Χρονοϊστορίες επιτάχυνσης για Kobe 0,1 g 2^η δοκιμή.

Λόγος Ενίσχυσης		
5	$\gamma=10.000$ KN/m ³	ΤΥΠΟΣ 2
4,17	Διάφορα γ	ΤΥΠΟΣ 3

Πίνακας 4.24: Λόγος ενίσχυσης κορυφής/βάσης για τις τρεις περιπτώσεις για Kobe 0,1g.

iv) Kobe 0,36g

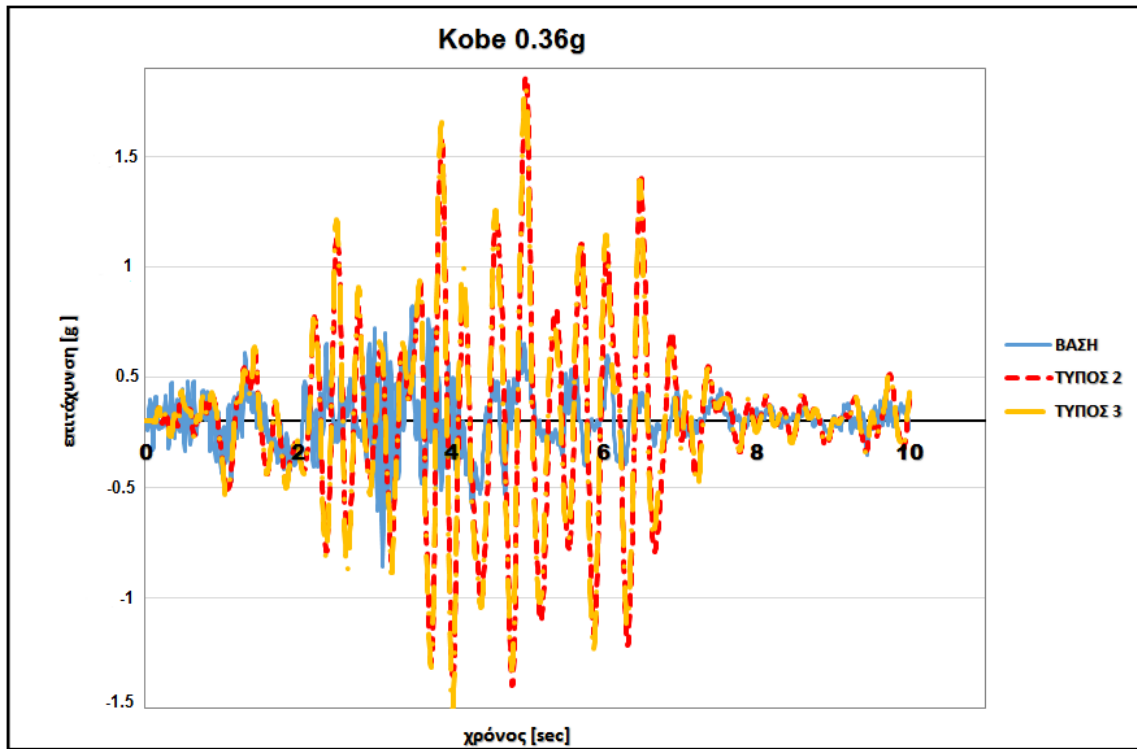
Για τη σεισμική διέγερση Kobe με 0,36g παρατηρείται διαφορά στα διαγράμματα επιτάχυνσης-χρόνου, για τους ΧΥΤΑ τύπου 2 και 3 όπου έχουμε μικρές αποκλίσεις στις επιταχύνσεις τους, όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 4.12 και στους Πίνακες 4.25 και 4.26. Καταγράφονται μέγιστες τιμές στη βάση του ΧΥΤΑ $\alpha_{\max}= 0,53 \text{ m/s}^2$ και στην κορυφή $\alpha_{\max}= 1,56 \text{ m/s}^2$ στον τύπο 2.

Kobe 0,36g	1η περίπτωση	ΤΥΠΟΣ 2 $\gamma=10 \text{ kN/m}^3$	2η περίπτωση	ΤΥΠΟΣ 3 διάφορα γ
	<i>max</i>	<i>min</i>	<i>max</i>	<i>min</i>
ΒΑΣΗ (Node 7217)	0,52	-0,66		
ΚΟΡΥΦΗ (Node 7233)	1,56	-1,20	1,53	-1,31

Πίνακας 4.25: Max/Min επιταχύνσεις βάσης - κορυφής για τις τρεις περιπτώσεις για Kobe 0,36 g.

Λόγος Ενίσχυσης		
2,34	$\gamma=10 \text{ kN/m}^3$	ΤΥΠΟΣ 2
2,32	διαφ. γ	ΤΥΠΟΣ 3

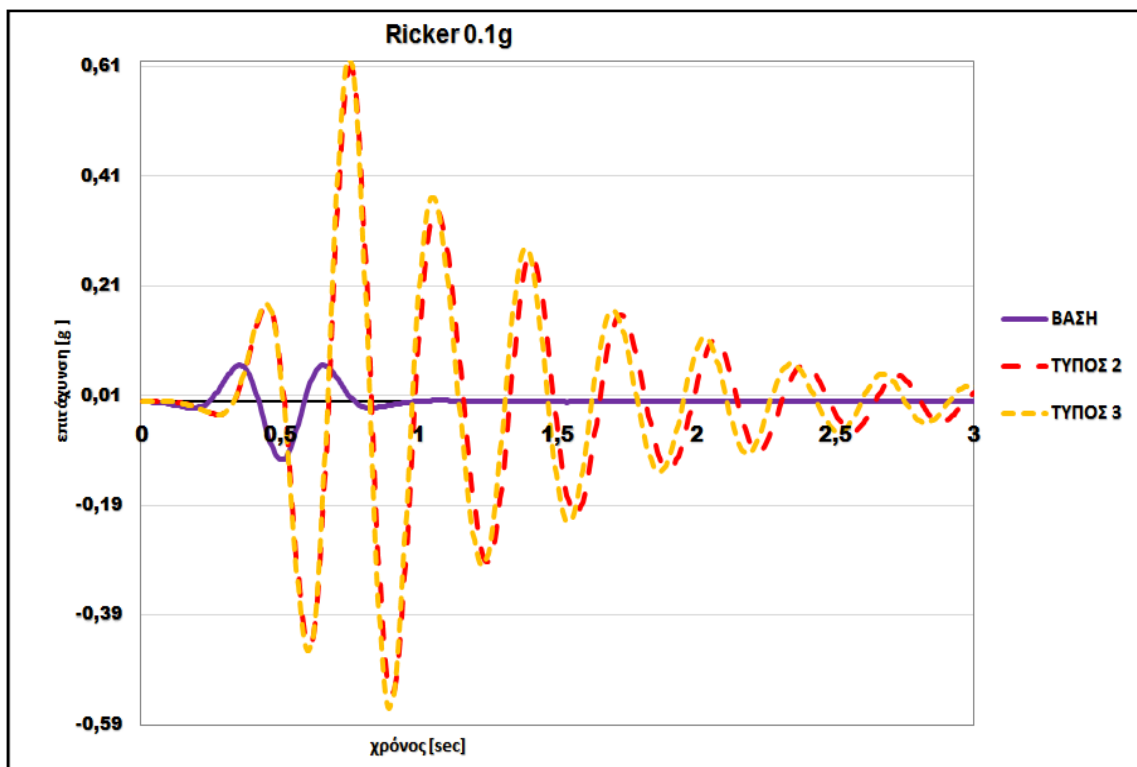
Πίνακας 4.26: Λόγος ενίσχυσης κορυφής/βάσης για τις τρεις περιπτώσεις για Kobe 0,36g.



Διάγραμμα 4.12: Χρονοϊστορίες επιτάχυνσης για Kobe 0.36 g 2^η δοκιμή.

ν) Ricker 0.1g

Για τον παλμό Ricker 0.1g παρατηρείται διαφορά στις χρονοϊστορίες επιτάχυνσης, όπου για τους ΧΥΤΑ τύπου 2 και 3 έχουμε μικρές αποκλίσεις στις επιταχύνσεις τους στην κορυφή του ΧΥΤΑ. Παρατηρούνται μέγιστες τιμές στη βάση του ΧΥΤΑ $a_{\max}=0,07 \text{ m/s}^2$ και κορυφής $a_{\max}=0,63 \text{ m/s}^2$ στον τύπο 3, όπου έχουν θεωρηθεί στο προσομοίωμα διαφορετικά ειδικά βάρη και διαφορετικές ταχύτητες διάδοσης ανά στρώση απορριμμάτων.



Διάγραμμα 4.13: Χρονοϊστορίες επιτάχυνσης για Ricker 0,1 g 2^η δοκιμή.

RICKER 0,1g	1η περίπτωση	ΤΥΠΟΣ 2 $\gamma=10 \text{ kN/m}^3$	2η περίπτωση	ΤΥΠΟΣ 3 διάφορα γ
	<i>max</i>	<i>min</i>	<i>max</i>	<i>min</i>
ΒΑΣΗ (Node 7217)	0,07	-0,11		
ΚΟΡΥΦΗ (Node 7233)	0,61	-0,54	0,63	-0,56

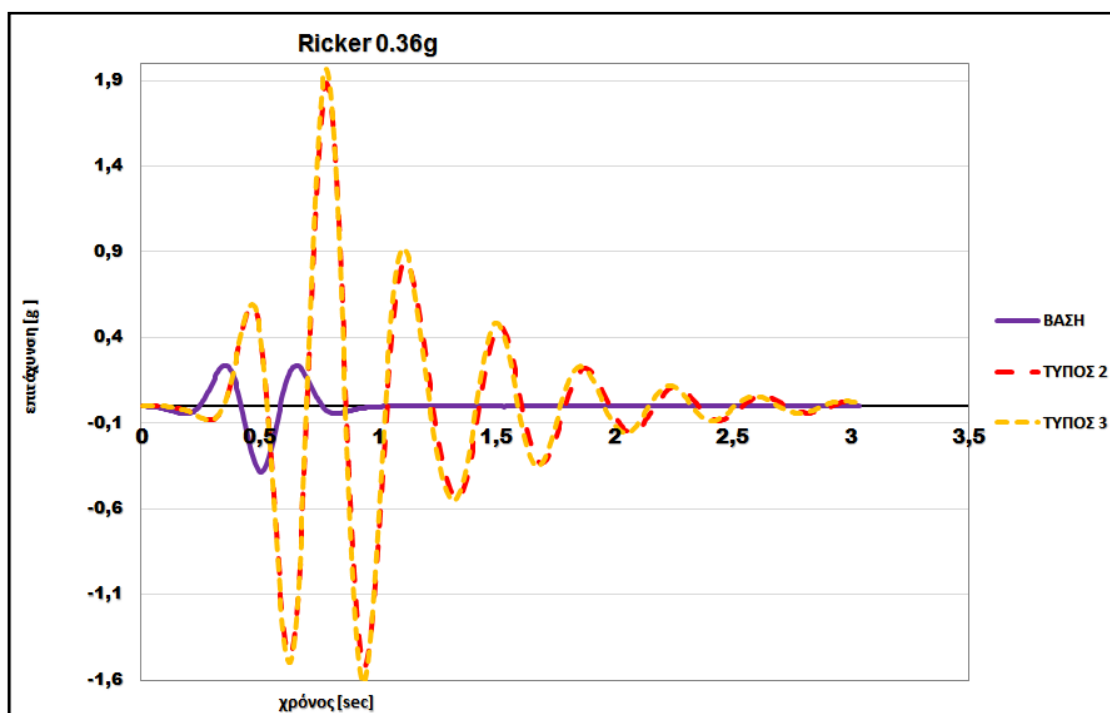
Πίνακας 4.27: Max/Min επιταχύνσεις βάσης - κορυφής για τις τρεις περιπτώσεις για Ricker 0.1 g.

Λόγος Ενίσχυσης		
5,71	$\gamma=10 \text{ kN/m}^3$	ΤΥΠΟΣ 2
5,88	Διάφορα γ	ΤΥΠΟΣ 3

Πίνακας 4.28: Λόγος ενίσχυσης κορυφής/βάσης για τις τρεις περιπτώσεις για Ricker 0.1 g.

vi) Ricker 0,36 g

Σε αυτήν την περίπτωση παρατηρείται μικρή διαφορά στις χρονοϊστορίες επιτάχυνσης για τους ΧΥΤΑ τύπου 2 και 3. Καταγράφονται μέγιστες τιμές στη βάση του ΧΥΤΑ $\alpha_{\max} = 0,24 \text{ m/s}^2$ και κορυφής $\alpha_{\max} = 1,97 \text{ m/s}^2$ στον τύπο 3, όπου υπάρχουν διαφορετικά ειδικά βάρη ανά στρώση απορριμμάτων, καθώς και διαφορετικές ταχύτητες διάδοσης.



Διάγραμμα 4.14: Χρονοϊστορίες επιτάχυνσης για Ricker 0.36g 2^η δοκιμή.

Ricker 0,36g	1η περίπτωση	ΤΥΠΟΣ 2 $\gamma=10 \text{ kN/m}^3$	2η περίπτωση	ΤΥΠΟΣ 3 διάφορα γ
	<i>max</i>	<i>min</i>	<i>max</i>	<i>min</i>
ΒΑΣΗ (Node 7217)	0,24	-0,38		
ΚΟΡΥΦΗ (Node 7233)	1,89	-1,52	1,97	-1,63

Πίνακας 4.29: Max/Min επιταχύνσεις βάσης - κορυφής για τις τρεις περιπτώσεις για Ricker 0.36g.

Λόγος Ενίσχυσης		
4,90	$\gamma=10 \text{ kN/m}^3$	ΤΥΠΟΣ 2
5,12	διάφορα γ	ΤΥΠΟΣ 3

Πίνακας 4.30: Λόγος ενίσχυσης κορυφής/βάσης για τις τρεις περιπτώσεις για Ricker 0.36 g.

4.8 Συγκεντρωτικοί πίνακες αποτελεσμάτων

1. Αίγιο

ΑΙΓΙΟ	Καμπύλες Zekkos et al. (2008)		Καμπύλες Anbazhagan et al. (2016)			
0.1g	Κορυφή		Κορυφή		Βάση	
	max	min	max	min	max	min
ΤΥΠΟΣ 1	0,40	-0,38	0,38	-0,38	0,14	-0,11
ΤΥΠΟΣ 2	0,22	-0,26	0,22	-0,25		
ΤΥΠΟΣ 3	0,23	-0,27	0,23	-0,26		
ΑΙΓΙΟ						
0.36g						
ΤΥΠΟΣ 1	1,07	-0,71	1,07	-0,71	0,37	-0,36
ΤΥΠΟΣ 2	1,18	-1,16	0,67	-0,91		
ΤΥΠΟΣ 3	1,18	-1,17	0,67	-0,91		

Πίνακας 4.31: Συνολικά αποτελέσματα για τη σεισμική καταγραφή από τον σεισμό του Αιγίου.

2. Kobe

ΚΟΒΕ	Καμπύλες Zekkos et al. (2008)		Καμπύλες Anbazhagan et al. (2016)			
0.1g	Κορυφή		Κορυφή		Βάση	
	max	min	max	min	max	min
ΤΥΠΟΣ 1	0,34	-0,42	0,43	-0,38	0,11	-0,12
ΤΥΠΟΣ 2	0,38	-0,50	0,61	-0,55	0,11	-0,12
ΤΥΠΟΣ 3	0,38	-0,51	0,46	-0,5	0,11	-0,12
ΚΟΒΕ						
0.36g						
ΤΥΠΟΣ 1	0,79	-0,76	0,79	-0,76	0,55	-0,67
ΤΥΠΟΣ 2	1,45	-1,43	1,56	-1,20	0,55	-0,67
ΤΥΠΟΣ 3	3,11	-3,23	1,52	-1,31	0,55	-0,67

Πίνακας 4.32: Συνολικά αποτελέσματα για τη σεισμική καταγραφή από τον σεισμό του Kobe.

3. Ricker

RICKER	Καμπύλες Zekkos et al. (2008)		Καμπύλες Anbazhagan et al. (2016)			
0.1g	Κορυφή		Κορυφή		Βάση	
	max	min	max	min	max	min
ΤΥΠΟΣ 1	0,34	-0,30	0,40	-0,38	0,07	-0,11
ΤΥΠΟΣ 2	0,63	-0,56	0,61	-0,54		
ΤΥΠΟΣ 3	0,65	-0,59	0,63	-0,56		
RICKER						
0.36g						
ΤΥΠΟΣ 1	1,07	-0,71	1,07	-0,71	0,24	-0,39
ΤΥΠΟΣ 2	1,98	-1,71	1,88	-1,52		
ΤΥΠΟΣ 3	1,99	-1,74	1,97	-1,62		

Πίνακας 4.33: Συνολικά αποτελέσματα για τη διέγερση Ricker.

Παρατηρείται ότι οι μεγαλύτεροι λόγοι ενίσχυσης είναι κυρίως στον παλμό Ricker. Επίσης, παρατηρείται σε όλες τις σεισμικές διεγέρσεις ότι η μεγαλύτερη ενίσχυση απαιτείται στους τύπους ΧΥΤΑ 2 και 3 που προσεγγίζουν καλύτερα την πραγματικότητα.

A	Επιλογή καμπυλών	Αίγιο	Kobe	Ricker
0,1g				
	Zekkos et al. (2008)	2,88 (τύπος 1)	2,75 (τύπος 3)	5,91 (τύπος 3)
	Anbazhagan et al. (2016)	2,72 (τύπος 1)	1,59 (τύπος 2)	5,88 (τύπος 2)
0,36g				
	Zekkos et al. (2008)	4,25 (τύπος 3)	4,79 (τύπος 3)	5,15 (τύπος 3)
	Anbazhagan et al. (2016)	1,83 (τύπος 2)	2,34 (τύπος 2)	5,12 (τύπος 3)

Πίνακας 4.34: Τελικά αποτελέσματα – Μέγιστοι Λόγοι ενίσχυσης.

Κεφάλαιο 5

Συμπεράσματα

Τα πάσης φύσεως τεχνικά έργα μπορούν να παρουσιάσουν προβλήματα όταν υποβληθούν σε ισχυρές σεισμικές διεγέρσεις. Ειδικά, οι Χώροι Υγειονομικής Ταφής Απορριμμάτων (ΧΥΤΑ) εμφανίζουν υψηλή πιθανότητα να αποδειχθούν ιδιαίτερα τρωτοί υπό σεισμική καταπόνηση. Η κατασκευή ενός χώρου ελεγχόμενης απόθεσης απορριμμάτων γίνεται με σκοπό τη μονωμένη αποθήκευση των απορριμμάτων καθώς και τη συλλογή και διαχείριση των υγρών και αέριων ρύπων. Σε περίπτωση πιθανών αστοχιών που μπορεί να προκληθούν από σεισμικές διεγέρσεις, τίθενται σε κίνδυνο η ασφάλεια του περιβάλλοντος και η δημόσια υγεία. Επιπρόσθετα, υπάρχει διεθνώς μία τάση αποκατάστασης και επανένταξης των χώρων αυτών. Αυτό κάνει πιο επιτακτική την ανάγκη για πρόγνωση της σεισμικής τους συμπεριφοράς προκειμένου να καταστεί δυνατή η μετέπειτα χρήση τους για ψυχαγωγικές ή οικιστικές δραστηριότητες. Τις τελευταίες δεκαετίες έχουν πραγματοποιηθεί έρευνες σε ΧΥΤΑ κυρίως στη βόρεια Αμερική από τις οποίες προκύπτει ότι η συμπεριφορά των ΧΥΤΑ σε ισχυρές σεισμικές διεγέρσεις είναι αρκετά ικανοποιητική.

Από τα παραπάνω εξάγεται το συμπέρασμα πως η μελέτη της σεισμικής απόκρισης και ο αντισεισμικός σχεδιασμός των ΧΥΤΑ αποτελεί σήμερα επιτακτική ανάγκη, ιδιαίτερα σε περιοχές με υψηλή σεισμικότητα όπως είναι η Ελλάδα. Η παρούσα έρευνα στην επιστημονική περιοχή των ΧΥΤΑ, βασίζεται σε απλοποιημένες μεθόδους και -ανεπαρκείς στο θέμα αυτό- σεισμικούς κανονισμούς που ισχύουν για τα εδαφικά επιχώματα. Συνεπώς, τεχνικά ζητήματα που αφορούν τον αντισεισμικό σχεδιασμό των ΧΥΤΑ και μέθοδοι ενίσχυσης αυτών δεν έχουν μελετηθεί σε βάθος. Επίσης, δεν έχει δοθεί μεγάλο βάρος στα δυναμικά χαρακτηριστικά των απορριμμάτων, τα οποία ποικίλουν, ένα πεδίο που τα τελευταία χρόνια έχει διερευνηθεί περισσότερο για να εξετασθούν ρεαλιστικότερα οι ιδιαιτερότητες και η ποικιλομορφία του απορριμματικού υλικού.

Η σεισμική απόκριση των ΧΥΤΑ, είναι ένα πολύπλοκο, δυναμικό πρόβλημα αλληλεπίδρασης του εδάφους με τον ΧΥΤΑ. Το φαινόμενο αυτό σχετίζεται άμεσα με τη γεωμετρία του ΧΥΤΑ, τις τοπικές εδαφικές συνθήκες (εδαφική στρώση κάτω από ΧΥΤΑ, ύπαρξη ή μη

υπόγειου νερού, κ.α.), τα χαρακτηριστικά της σεισμικής διέγερσης και τις δυναμικές ιδιότητες των απορριμματικών υλικών. Οι παραπάνω παράγοντες μπορούν να συμπεριληφθούν μόνο στα πλαίσια μίας ενδελεχούς ανάλυσης σεισμικής απόκρισης ΧΥΤΑ. Με βάση την υπάρχουσα βιβλιογραφία, ως καταλληλότερη μέθοδος θεωρείται η αριθμητική προσομοίωση με την χρήση πεπερασμένων στοιχείων και η διεξαγωγή ισοδύναμα γραμμικών αναλύσεων προκειμένου να ληφθεί υπόψη η μη γραμμική συμπεριφορά των εδαφικών και απορριμματικών υλικών με ένα ρεαλιστικό αλλά και υπολογιστικά αποτελεσματικό τρόπο.

Η παρούσα παραμετρική αριθμητική προσομοίωση πραγματοποιήθηκε προκειμένου να εξεταστεί πόσο επηρεάζει τη δυναμική απόκριση ενός τυπικού ΧΥΤΑ η μεταβολή των ιδιοτήτων του απορριμματικού υλικού και πόσο επηρεάζεται η μεταβολή των επιταχύνσεων από τη βάση στην κορυφή του. Τα βασικά συμπεράσματα που προέκυψαν από τη σχετική διερεύνηση είναι τα ακόλουθα:

- Η ενίσχυση της μέγιστης οριζόντιας επιτάχυνσης από τη βάση στην κορυφή του ΧΥΤΑ είναι πολύ πιθανό φαινόμενο λόγω της φύσης των απορριμματικών υλικών και της γεωμετρίας του ΧΥΤΑ. Όπως έχει αναφερθεί και στο 2^ο Κεφάλαιο, έχουν γίνει μελέτες από αρκετούς ερευνητές και έχει αποδειχθεί πως τα αποτελέσματα έχουν σημαντικές διαφοροποιήσεις όσον αφορά την ένταση της υπολογισθείσας επιτάχυνσης άρα και κατ' επέκταση την κίνηση στη βάση και στην κορυφή του χώρου υγειονομικής ταφής, κάτι που επαληθεύεται και από την παρούσα εργασία.
- Οι επιταχύνσεις που καταγράφηκαν από τις αναλύσεις δείχνουν ότι αν θεωρηθεί ο ΧΥΤΑ ως ένα επίχωμα όπου η κάθε στρώση έχει τα δικά της χαρακτηριστικά, τότε παρατηρούνται μεγαλύτερες επιταχύνσεις σε σχέση με τις δοκιμές που ο ΧΥΤΑ θεωρήθηκε ένα ενιαίο σώμα με κοινά χαρακτηριστικά εδάφους. Μεγάλες διαφορές παρατηρούνται σε έντονες διεγέρσεις, δηλαδή με μέγιστες επιταχύνσεις 0.36g από τις διεγέρσεις Αίγιο και Kobe που οφείλονται στα χαρακτηριστικά των καταγραφών και την υψηλή ένταση. Στην πρώτη δοκιμή έγινε η χρήση των καμπυλών Zekkos et al. (2008), όπου έχουμε μεγαλύτερες τιμές για G/G_{max} , γ , ξ και οι καμπύλες αρχικά έχουν μια σχετικά γραμμική μορφή και για διατμητικές παραμορφώσεις άνω των 0.05% μεταβάλλονται πιο έντονα. Σε αυτήν την περίπτωση, παρατηρούνται μεγάλες διαφορές στις επιταχύνσεις στην κορυφή του ΧΥΤΑ με μεγαλύτερες τιμές στη δοκιμή, με διαφορετικά ειδικά βάρη και διαφορετικές ταχύτητες διάδοσης των σεισμικών κυμάτων (τύπος 3), που προσεγγίζει περισσότερο μια πραγματική διατομή ΧΥΤΑ. Ο τύπος 2 διατομής ΧΥΤΑ με κοινό ειδικό βάρος και διαφορετικές ταχύτητες διάδοσης V_s και ο τύπος 3 με

διαφορετικό ειδικό βάρος ανά στρώση σε χαμηλής έντασης σεισμό και στον παλμό Ricker, έχουν μικρές διαφορές οι επιταχύνσεις στη κορυφή του ΧΥΤΑ. Ομοίως, στη 2^η δοκιμή με τη χρήση των καμπύλων *Anbazhagan et al. (2016)* όπου οι τιμές των ξ , γ και G/G_{\max} είναι μικρότερες και αυξάνονται πιο ομαλά σε σχέση με αυτές των *Zekkos et al. (2008)*, οι επιταχύνσεις στη κορυφή του ΧΥΤΑ έχουν μικρές διαφορές σε όλες τις διεγέρσεις έκτος από αυτήν από τον σεισμό του *Kobe*, όπου ακόμα και για το χαμηλό σεισμικό επίπεδο των 0,1g παρατηρείται μια διαφορά στις χρονοϊστορίες των επιταχύνσεων που οφείλεται στα χαρακτηριστικά του σεισμού.

- Όταν τα απορριμματικά υλικά συμπεριφέρονται γραμμικά, δηλαδή στην περίπτωση ασθενών σεισμικών διεγέρσεων, η σεισμική απόκριση εξαρτάται αποκλειστικά από τις γεωμετρικές και μηχανικές ιδιότητες του ΧΥΤΑ (αλλά και του εδάφους κάτωθεν αυτού, όπως έχει αποδειχτεί σε άλλες μελέτες (*Psarropoulos et al., 2007*)).
- Στον αντίποδα, όταν λαμβάνουν χώρα σεισμοί μέτριου ή μεγάλου μεγέθους, τα υλικά συμπεριφέρονται μη γραμμικά και στην περίπτωση αυτή ο βαθμός της μη γραμμικής συμπεριφοράς τους διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στα όποια φαινόμενα ενίσχυσης της σεισμικής καταπόνησης.

Εν κατακλείδι, οι δυναμικές ιδιότητες του απορριμματικού υλικού παίζουν σημαντικό ρόλο στη συμπεριφορά του ΧΥΤΑ σε μια σεισμική διέγερση. Λαμβάνοντας υπόψη τη μεγάλη διασπορά και τις πολλές αβεβαιότητες που υπεισέρχονται στο εξεταζόμενο πρόβλημα, ένα γενικό συμπέρασμα το οποίο μπορεί να εξαχθεί είναι ότι ο ορθός αντισεισμικός σχεδιασμός των ΧΥΤΑ θα πρέπει να εξετάζει την κάθε περίπτωση ξεχωριστά προκειμένου να λαμβάνονται υπόψη τόσο οι σεισμολογικές συνθήκες όσο και οι συγκεκριμένες τοπικές εδαφικές συνθήκες, αλλά και τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του κάθε ΧΥΤΑ. Συνεπώς, στο πλαίσιο της σωστής μελέτης ενός τέτοιου έργου προτείνεται η διεξαγωγή ρεαλιστικών αριθμητικών αναλύσεων και η μελέτη του συγκεκριμένου απορριμματικού υλικού και των ειδικών τοπικών συνθηκών, προκειμένου να υπολογιστούν τα επίπεδα των αναμενόμενων, πραγματικών επιταχύνσεων στο σώμα του ΧΥΤΑ.

Βιβλιογραφία

Διεθνής Βιβλιογραφία:

- Abreu A.E.S. & Vilar O.M (2017). Influence of composition and degradation on the shear strength of municipal solid waste. *Elsevier* 68:263-274.
- Abreu A.E.S. & Vilar O.M (2016a). Characterizing a Brazilian sanitary landfill using geophysical seismic techniques. *Journal of Solid Waste Management Technology*, 53:116-127.
- Abreu A.E.S. & Vilar O.M (2016). Accessing the biological stability of Municipal Solid Waste of different landfilling ages. *Journal of Solid Waste Management Technology*, 42:236-244.
- Abreu A.E.S., Gandolfo O.C.B., Vilar O.M. (2016). Characterizing a Brazilian sanitary landfill using geophysical seismic techniques. *Journal of Waste Management*, 53:116-127.
- Ammari N. (2012). Geographic database of facilities and areas of tailing interest in Hellas, Laboratory of Heat Transfer and Environmental Engineering. *Diploma Thesis, Department of Mechanical Engineering, Aristotle University of Thessaloniki*.
- Anbazhagan P., SivakumarBabu GL, Lakshmikanthan P. and VivekAnand KS. (2016). Seismic characterization and dynamic site response of a municipal solid waste landfill in Bangalore, India. *Journal of Solid Waste Management & Research*, 34(3): 205–213.
- Antonopoulos I., Tsatsarelis T., Karagiannidis A. and Perkoulidis G. (2012). Applying waste management scenarios in the Peloponnese region in Greece: A critical analysis in the frame of life cycle assessment. *Environmental Science and Pollution Research* 20:2499-2511.
- Athanasopoulos G. (2011). Laboratory testing of municipal solid waste. In: Zekkos, D. (Ed.) *Geotechnical Characterization, Field Measurement, and Laboratory Testing of Municipal Solid Waste. ASCE Geotechnical Special Publication*, 209:195–205.
- Baawaina M., Omidvarbornaa H., Al-Amrib W. (2011). Ultimate composition analysis of municipal solid waste in Muscat. *Waste Management*, 148: 355-362.

- Bartlett S. F. (2011). 1D Ground Response Analysis. Lecture 8 -Ground Response Analyses.
- Bartlett S.F., (2011b). 2-D Seismic Embankment and Slope Assessment and Stability. Lecture 9 -2D Dynamic Analyses.
- Blight G. Slope failures in municipal solid waste dumps and landfills: a review. University of the Witwatersrand, Johannesburg, South Africa. *Journal of Waste Management & Research*, 26: 448–463.
- Bray J.D., Zekkos D., Kavazanjian Jr. E., Athanasopoulos G. A., and Riemer M. F. (2009). Shear Strength of Municipal Solid Waste. *Journal of Geotechnical and Geoenvironment Engineering*, 135:709-722.
- R. Dobry, I. M. Idriss (1972). Duration characteristics of horizontal components of strong-motion earthquake records. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 68:1487-1520.
- Farley Watson and Williams (2015). The New Greek national waste management plan.
- Feng Shi-Jin, Gao Li-Ya (2012). Seismic stability analyses for landfill cover systems under different seepage buildup conditions. *Journal of Environment Earth Science*, 66:381–391.
- Gao Yang, Yin Yueping, Li Bin, Wang Wenpei, Zhang Nan, Yang Chunxu, Zuo Xiao (2016). Investigation and dynamic analysis of the long run out catastrophic landslide at the Shenzhen landfill on December 20/2015, in Guangdong, China. *Journal of Environment Earth Science*, 76:13.
- Hadjibiros K., Dermatas D., Lapidou C.S. (2011). Municipal solid waste management and landfill site selection in Greece: Irrationality versus efficiency. *Global NEST Journal*, 13, 2:150-161.
- Huvaj-Sarihan Nejan, Stark D.Timothy (2008). Back analyses of landfill slope failure. 6th International Conference on case histories Engineering Arlington.
- Huvaj-Sarihan N., Stark T. D. (2008). Back-analyses of landfill slope failures. *Sixth International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering*.
- Idriss I.M., Lysmer J., Hwang R. and Bolton H. Seed (1973). Modified from QUAD4.
- Jafari N. H., Stark T.D., Merry Scott (2010). The July 10 2000 Payatas Landfill Slope Failure. *International Journal of Geoengineering Case Histories*, Vol. 2, 3:208.
- Jahanfar M.A. (2014). Landfill Slope Stability Risk Assessment. *Msd at Guelph, Ontario, Canada*.
- Macneal R.H. Derivation of element stiffness matrices by assumed strain distributions

(1982). *Nuclear Engineering and Design*, 70:3-12.

- Malinauskaite J., Jouharab H. *et al.* (2017). Municipal solid waste management and waste-to-energy in the context of a circular economy and energy recycling in Europe. *Energy*, 141: 2013-1044.
- Park D. and Hashash Y. M.A. (2004). Soil damping formulation in nonlinear time domain site response analysis. *Journal of Earthquake Engineering*, Vol. 8, No. 2: 249–274.
- Perkoulidis G., Malamakis A., Tsatsarelis TH., Antonopoulos and Moussiopoulos N. (2015). History of dump sites in Greece: Integrated tools and methods for their registration. Laboratory of Heat Transfer and Environmental Engineering (LHTEE).
- Psarropoulos, Tsompanakis, Karabatsos (2007). Effects of local site conditions on the seismic response of municipal solid waste landfills. *Journal of Soil Dynamic Earthquake Engineering* 27(6):553–563.
- Rajendran S., Zhang B.R. Corrigendum to a ‘FE-mesh free’ QUAD4 element based on partition of unit (2007). *Computer Methods Applied Mechanics and Engineering*, 197:128–147.
- Ramaiah B.J., Ramana G.V., Bansal B.K. Field and large scale laboratory studies on dynamic properties of emplaced municipal solid waste from two dump sites at Delhi, India. *Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 90: 240-157.
- Ramaiah B.J., Ramana G.V., Datta Manoj (2017) Mechanical characterization of municipal solid waste from two waste dumps at Delhi, India. *Waste Management*, 68:275-291.
- Sahadewa A. (2014). In-situ assessment of linear and nonlinear dynamic properties of municipal solid waste. A dissertation submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy (Civil Engineering) in the University of Michigan.
- Sahadewa A., Zekkos D.s, Woods R. D., Stokoe K.H., Matasovic N. (2014). In-situ assessment of the dynamic properties of municipal solid waste at a landfill in Texas. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 65:303–313.
- Stark, T.D., N. Huvaj-Sarihan, and G. Li [2008] “Shear Strength of Municipal Solid Waste for Stability Analyses”, *Environmental Geology*, 57:1911–1923.
- Towhata I., *Geotechnical earthquake engineering*, Springer Verlag Berlin Heidelberg.
- Qiyong X. , Tolaymat T., and Townsend T. G., P.E., M.ASCE (2012). Impact of Pressurized Liquids Addition on Landfill Slope Stability. *Journal of Geotechnical and Geoenvironment Engineering*, 138:472-480.
- Yuan P., Kavazanjian Jr.E., Chen W., Seo B. (2011). Compositional effects on the dynamic

properties of municipal solid waste. *Journal of Waste Management* 31: 2380–2390.

- Zania V., Tsompanakis Y. & Psarropoulos Prodromos N. (2008). Seismic Distress and Slope Instability of Municipal Solid Waste Landfills. *Journal of Earthquake Engineering*, 12:2, 312-340.
- Zekkos D. P. (2005). Evaluation of Static and Dynamic Properties of Municipal Solid Waste, PhD thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, University of California, Berkeley.
- Zekkos D., Athanasopoulos G.A., Bray J. D., Grizi A., Theodoratos A. (2010). Large-scale direct shear testing of municipal solid waste. *Journal of Solid Waste Management*, 30:1544–1555.
- Zekkos D., Bray J. D., and Riemer M. F. (2008). Shear modulus and material damping of municipal solid waste based on large-scale cyclic triaxial testing. *Journal of Geotechnical and Geoenvironment Engineering*, 45:45-58.
- Zekkos D., Bray J. D., Kavazanjian Jr. E., Matasovic N., Rathje E.M., Riemer M. F., and Stokoe II K.H. (2006). Unit Weight of Municipal Solid Waste. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 132:10.
- Zekkos D., Xunchang F. (2017). Constant load and constant volume response of municipal solid waste in simple shear. *Journal of Solid Waste Management*, 63:380–392.
- Zekkos D., Stokoe A., Matasovic K. (2013). In Situ Assessment of the Nonlinear Shear Modulus of Municipal Solid Waste. *Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Paris 2013.
- Zekkos D., Bray, J.D., Kavazanjian, J.E., Matasovic N., Rathje E.M., Riemer M.F., Stokoe K.H. (2006). Unit weight of municipal solid waste. *ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 132:1250–1261.
- Zhan Tony L.T., Chen Y.M., Ling W.A. (2008). Shear strength characterization of municipal solid waste at the Suzhou landfill, China. *Engineering geology*, 97: 97-111.

Ελληνική Βιβλιογραφία:

- Ζανιά Β. (2009). Σεισμική καταπόνηση ΧΥΤΑ: Μηχανισμοί αστοχίας και μέθοδοι ενίσχυσης. *Διδακτορική διατριβή. Πολυτεχνείο Κρήτης*.
- Βιδάλη Ε. (2011). Ποσοτική και ποιοτική εκτίμηση των στραγγισμάτων από τα απορρίμματα του ΧΥΤΑ Άνω Λιοσίων. Μεταπτυχιακή διατριβή. Γεωπονική σχολή Αθηνών.
- Βορνιωτάκη Ε. (2012). Διαχείριση Στερεών Αποβλήτων σε αστικό περιβάλλον.

Μηχανολογία. Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Καβάλας.

- Καραμπάτσος Ι. (2009). Ανάλυσης Σεισμικής Απόκρισης Χώρων Υγειονομικής Ταφής Απορριμμάτων. Μεταπτυχιακή εργασία. Πολυτεχνείο Κρήτης.
- Μασλουμίδη Ι. (2013). Επιλογή βέλτιστης μεθόδου διαχείρισης αστικών στερεών αποβλήτων με βάση τις εκπομπές αερίων θερμοκηπίου με ανάλυση κύκλου ζωής: Εφαρμογή στο Δήμο Βόλου. Μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία, Μηχανικών Χωροταξίας Πολεοδομίας και Περιφερειακής Ανάπτυξης. Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας.
- Νικολακόπουλος Ι. (2012). Μελέτη της δυναμικής μη-γραμμικής απόκρισης ΧΥΤΑ. Διπλωματική Εργασία. Πολυτεχνείο Κρήτης. .
- Κούγκολος Α. Γ. (2007). Περιβαλλοντική μηχανική-Ρύπανση και προστασία περιβάλλοντος. Εκδόσεις Τζιόλα.
-

Ηλεκτρονική βιβλιογραφία:

- Eurostat(2018):
http://epp.eurostat.ec.europa.eu/statistics_explained/index.php/Waste_statistics
- Forest Daily News site. <https://foresternetwork.com/daily/waste/landfill-management/three-types-of-failures-in-landfills>.
- <http://aix.meng.auth.gr/lhtee/education/swm6.pdf>.
- B2 Green: <https://www.b2green.gr/el/post/9473/adeiodotisi-sti-diadyma-gia-ekmetallefsi-tou-vioaeriou-tou-chyta-d-makedonias>.
- Βιβλιοθήκη Τεχνικού επιμελητήριου Ελλάδος (ΤΕΕ). <http://library.tee.gr>.
- Ελληνικός Οργανισμός Ανακύκλωσης. Ε.Ο.ΑΝ. <https://www.eoan.gr/el/content/19/ti-einai-anakuklosi>.
- ΕΣΣΔΑ, <http://www.eedsa.gr/Contents.aspx?CatId=95>.
- Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων σε απλές περιπτώσεις.
https://semfe.gr/files/notes/7/ypologistikh_mhxanikh_1_kef1.pdf.
- Καρίδης. Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων. Βασικές έννοιες.
<http://users.ntua.gr/caridis/methodoi/keimena/chap%2003/Chapter%2003.pdf>.
- <https://www.monoiso.gr/2018/03/04/%CF%87%CF%89%CF%81%CE%BF%CF%83-%CF%85%CE%B3%CE%B5%CE%B9%CE%BF%CE%BD%CE%BF%CE%BC%CE%B9%CE%BA%CE%B7%CF%83-%CF%84%CE%B1%CF%86%CE%B7%CF%83-%CE%B1%CF%80%CE%BF%CF%81%CF%81%CE%B9%CE%BC%CE%B1%CF%84%CF%89/>

- Οικολογική παρέμβαση(ΟΠΗ): <http://www.opi.org.gr/2014/01/29-2014.html>
- Κοινή γνώμη: <http://www.koinignomi.gr/news/politiki/politiki-kyklades/2016/12/07/leitoyrgia-hyta-naxoy-enimerosi-politon.html>
- Υπουργείο Περιβάλλοντος & Ενέργειας, <http://www.ypeka.gr/Default.aspx?tabid=238>.
- Ενημέρωση: <http://enimerosi.com/details.php?id=7369>