

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Αριθμητική διερεύνηση της επίδρασης «πράσινου»
δώματος στη σεισμική απόκριση πολυόροφων
κτιρίων οπλισμένου σκυροδέματος**

ΕΛΙΣΑΒΕΤ ΧΝΑΡΗ

Επιβλέπων: Αναπληρωτής Καθηγητής, Ιωάννης Τσομπανάκης

Χανιά, Σεπτέμβριος 2018

Ευχαριστίες

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα, Αναπλ. Καθηγητή του Πολυτεχνείου Κρήτης κ. Ιωάννη Τσομπανάκη για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε αναθέτοντας μου την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας και την πολύτιμη βοήθεια που μου παρείχε.

Θέλω, επίσης, να ευχαριστήσω και τα άλλα μέλη της εξεταστικής επιτροπής: τον Καθηγητή του Πολυτεχνείου Κρήτης κ. Κωνσταντίνο Προβιδάκη και τον Δρ. Πρόδρομο Ψαρρόπουλο για την αξιολόγηση της εργασίας μου.

Επίσης, ευχαριστώ θερμά τους διδακτορικούς φοιτητές Αλέξανδρο Τσιπιανίτη και Αλέξανδρο Λυραντζάκη για την πολύτιμη βοήθεια, τις γνώσεις και τις συμβουλές που μου προσέφεραν. Ευχαριστώ, επίσης, και την κα. Ειρήνη Κουτσογιαννάκη, ΕΤΕΠ του Πολυτεχνείου Κρήτης, για την κριτική ανάγνωση του κειμένου της εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για τη στήριξη που μου προσέφεραν καθ'ολη τη διάρκεια των σπουδών μου, χωρίς την οποία δεν θα μπορούσα να αποκομίσω τα οφέλη και τις εμπειρίες του να αποτελώ κομμάτι του Πολυτεχνείου Κρήτης.

Περίληψη

Η κατασκευή «πράσινων» δωματίων σε κτίρια, τα οποία λειτουργούν ως φίλτρα και πνεύμονες πρασίνου μέσα στον αστικό ιστό, κερδίζει συνεχώς έδαφος σε πολλές χώρες. Δεδομένου ότι στα κέντρα των πόλεων υπάρχουν ήδη πολλές κτιριακές κατασκευές, τα «πράσινα» δώματα κατασκευάζονται κατά κύριο λόγο σε υφιστάμενα και ενίοτε σε νεόδμητα κτίρια. Σε κάθε περίπτωση, για την κατασκευή ενός «πράσινου» δώματος, απαραίτητη προϋπόθεση είναι η εκπόνηση στατικής μελέτης, όπου θα δίνεται έμφαση στη σεισμική συμπεριφορά του κτιρίου εξαιτίας των πρόσθετων αδρανειακών δυνάμεων που προκαλεί η ύπαρξη της πρόσθετης «πράσινης» μάζας στην κορυφή του.

Η παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζει τη σεισμική απόκριση πολυόροφων κτιρίων οπλισμένου σκυροδέματος, πριν και μετά την προσθήκη «πράσινου» δώματος. Για τον σκοπό αυτό, μελετήθηκαν διάφορες παράμετροι που επηρεάζουν την κατασκευή. Πιο συγκεκριμένα, εξετάστηκαν δύο (με τέσσερις και οκτώ ορόφους) πλαισιακές κατασκευές με φέροντα οργανισμό από οπλισμένο σκυρόδεμα, οι οποίες ήταν θεμελιωμένες σε δυο διαφορετικούς τύπους εδάφους (στιβαρό και μαλακό). Για την πραγματοποίηση της διερεύνησης χρησιμοποιήθηκε κατάλληλο λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων. Η μέθοδος ανάλυσης που εφαρμόστηκε, είναι αυτή της δυναμικής μη-γραμμικής ανάλυσης με εν χρόνω ολοκλήρωση, με χρήση επαρκούς αριθμού κατάλληλων επιταχυνσιογραφημάτων από σεισμικές καταγραφές.

Στα πρώτα κεφάλαια της εργασίας, γίνεται μια περιγραφή των χαρακτηριστικών του «πράσινου» δώματος, του αντισεισμικού σχεδιασμού κτιριακών κατασκευών, καθώς και του φαινομένου της δυναμικής αλληλεπίδρασης εδάφους-θεμελίωσης-κατασκευής. Στη συνέχεια, περιγράφεται αναλυτικά η προσομοίωση των κτιρίων και η παραμετρική διερεύνηση που πραγματοποιήθηκε. Ακολούθως, παρουσιάζονται κι αξιολογούνται τα αποτελέσματα των αναλύσεων. Ο κύριος στόχος είναι να αποτιμηθεί η επίδραση του «πράσινου» δώματος στη δυναμική απόκριση των εξεταζόμενων κατασκευών, να προκύψουν κάποια πρώτα συμπεράσματα και να διατυπωθούν προτάσεις για περαιτέρω διερεύνηση του θέματος.

Abstract

In contrast to typical concrete slab tops, "green" roofs on top of buildings can act as filters and “green lungs” in densely populated urban environments. For this reason, they are constantly gaining ground in many countries. Taking into account that the center in many cities is full of buildings, usually such “green” roofs are mainly constructed on existing and more rarely on newly built buildings. In any case, for the construction of a "green" roof, a detailed assessment of the bearing structure is needed, emphasizing on the seismic response of the building due to the additional inertial forces caused by the addition of the "green" mass at its top.

This diploma thesis examines the seismic response of medium-rise reinforced concrete buildings before and after the addition of a "green" roof. For this purpose, various parameters influencing the construction were studied, utilizing a finite element analysis software. More specifically, two (four- and eight-storey) buildings with reinforced concrete load-bearing frame structures were examined, considering that they were constructed in two different soil types (soft and stiff). A series of dynamic nonlinear analyses was performed using a sufficient number of accelerograms recorded in suitable soil conditions.

In the first part of this thesis, a detailed description of "green" roofs, as well as a brief description of seismic hazard and seismic design norms and dynamic soil-structure interaction is presented. Subsequently, the simulation of the buildings and the performed parametric investigation are given. The results and the related discussion aim to evaluate the effect of the "green" roof on the dynamic response of the examined structures, in order to draw some initial conclusions and to provide suggestions for further investigation of the subject.

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες.....	i
Περίληψη.....	iii
Abstract.....	v
Περιεχόμενα.....	vii
Κεφάλαιο 1ο.....	1
Εισαγωγή.....	1
1.1 Γενικά.....	1
1.2 Σεισμική απόκριση κτιριακών κατασκευών	2
1.3 Περιγραφή δομής εργασίας.....	3
Κεφάλαιο 2ο.....	5
Χαρακτηριστικά «πράσινου» δώματος.....	5
2.1 Η έννοια του «πράσινου» δώματος.....	5
2.2 Τύποι φυτεμένων δωματίων.....	6
2.3 Οφέλη «πράσινης» στέγης στον αστικό χώρο.....	8
2.3.1 Περιβαλλοντικά οφέλη της «πράσινης» στέγης.....	10
2.3.1.1 Διατήρηση και αύξηση της βιοποικιλότητας.....	10
2.3.1.2 Μείωση του φαινομένου της θερμικής αστικής νησίδας.....	10
2.3.1.3 Βελτίωση μόνωσης και εξοικονόμησης ενέργειας του κτιρίου.....	12
2.3.1.4 Μείωση της ηχορύπανσης.....	14
2.3.1.4 Πυροπροστασία.....	15
2.3.2 Κοινωνικά οφέλη της πράσινης στέγης.....	15
2.3.2.1 Αναψυχή και ενδυνάμωση κοινωνικών σχέσεων.....	15
2.3.2.2 Περιβαλλοντική εκπαίδευση.....	16
2.3.2.3 Αναβάθμιση αστικής εικόνας και αύξηση της αξίας του ακινήτου.....	17
2.3.2.3 Αίσθηση βελτίωσης της ποιότητας ζωής.....	18
2.3.3 Οικονομικά οφέλη της «πράσινης» στέγης.....	19
2.3.3.1 Μείωση ενεργειακών αναγκών για εξοικονόμηση κεφαλαίου.....	19
2.3.3.2 Αύξηση του χρόνου ζωής της οροφής.....	19
2.3.3.3 Συνδυασμός φωτοβολταϊκών και φυτεμένων δωματίων.....	20
2.3.3.4 Έσοδα από καλλιέργεια οπωροκηπευτικών και ανθέων.....	21
2.3.3.5 Αύξηση παραγωγικότητας και δημιουργία νέων θέσεων εργασίας.....	21

2.4Μειονεκτήματα φυτεμένου δώματος.....	21
2.4.1 Στατική επιβάρυνση.....	21
2.4.2 Κίνδυνος υγρασίας.....	22
2.4.3 Οικονομική επιβάρυνση.....	23
2.5 Κατασκευή «πράσινου» δώματος.....	23
2.5.1 Διαστρωμάτωση ενός «πράσινου» δώματος.....	23
2.5.2 Προετοιμασία επιφάνειας και δημιουργίας φράγματος υδρατμών.....	24
2.5.3 Δημιουργία Θερμομονωτικής Στρώσης.....	24
2.5.4 Στεγανωτικές – αντιριζικές στρώσεις.....	25
2.5.5 Προστασία στεγανωτικής στρώση.....	26
2.5.6 Αποστραγγιστική στρώση.....	26
2.5.7 Υπόστρωμα φύτευσης.....	27
2.5.8 Φυτικό υλικό.....	29
2.5.9 Άρδευση και απορροή.....	30
2.6 Διεθνής και εθνική πολιτική για την ανάπτυξη των «πράσινων δωματίων».....	31
2.6.1 Διεθνής πολιτική.....	31
2.6.2 Εθνική πολιτική.....	33
Κεφάλαιο 3ο.....	35
Αντισεισμικός Σχεδιασμός Κτιριακών Κατασκευών	35
3.1 Σεισμικός κίνδυνος	35
3.1.1.Κατηγοριοποίηση σεισμών ανάλογα με το βάθος.....	36
3.1.2 Κλίμακες μέτρησης των σεισμών.....	37
3.2 Σεισμικά κύματα.....	37
3.2.1 Κύματα χώρου.....	38
3.2.2Επιφανειακά κύματα.....	39
3.3Εδαφική σεισμική κίνηση.....	40
3.3.1 Τοπικές εδαφικές συνθήκες.....	42
3.3.2 Δυναμική εξίσωση κίνησης.....	42
3.3.3 Πλάτος εδαφικής κίνησης.....	45
3.3.3.1 Μέγιστη εδαφική επιτάχυνση.....	46
3.3.3.2 Μέγιστη εδαφική ταχύτητα	46
3.3.3.3 Μέγιστη εδαφική κίνηση.....	47
3.4 Σεισμική επικινδυνότητα στον ελλαδικό χώρο.....	47

3.5 Αντισεισμικός σχεδιασμός & Ευρωκώδικας 8.....	51
3.5.1 Σεισμικές Δράσεις Σχεδιασμού.....	52
3.5.2 Κατηγορία εδάφους.....	53
3.5.4 Σεισμικές ζώνες – εδαφική επιτάχυνση.....	54
3.5.4 Ελαστικό Φάσμα Απόκρισης.....	54
3.5.5. Ελαστικό Φάσμα Σχεδιασμού.....	55
3.5.6 Υπολογισμός Μαζών.....	58
3.5.7 Μέθοδοι ανάλυσης.....	59
Κεφάλαιο 4ο.....	61
Δυναμική Αλληλεπίδραση Εδάφους-Θεμελίωσης-Κατασκευής.....	61
4.1 Εισαγωγή.....	61
4.2 Γενικές Αρχές.....	61
4.2.1 Φυσική του φαινομένου.....	61
4.2.2 Αποτελέσματα φαινομένου.....	62
4.2.3 Παράγοντες επίδρασης του φαινομένου.....	62
4.3 Μέθοδοι ανάλυσης της αλληλεπίδρασης Εδάφους –Θεμελίωσης – Κατασκευής.....	64
4.4 Κινηματική και Αδρανειακή Αλληλεπίδραση.....	66
4.5 Κανονιστική αντιμετώπιση της αλληλεπίδρασης εδάφους – κατασκευής.....	68
Κεφάλαιο 5ο.....	71
Περιγραφή Προσομοίωσης.....	71
5.1 Περιγραφή Κτιρίων	71
5.1.2 Περιγραφή των Υλικών –Μηχανικές Παράμετροι.....	72
5.1.3 Περιγραφή των Διατομών.....	73
5.2 Καθορισμός Φορτίσεων.....	73
5.2.1 Φορτίσεις λόγω φυτεμένου δώματος.....	75
5.3 Διαφραγματική λειτουργία.....	76
5.4 Προσομοίωση Αλληλεπίδρασης Εδάφους – Κατασκευής.....	77
Κεφάλαιο 6ο.....	81
Αριθμητική διερεύνηση.....	81
6.1 Ιδιομορφική ανάλυση.....	83
6.1.1 Αποτελέσματα ιδιομορφικής ανάλυσης.....	83
6.2 Δυναμική Μη-γραμμική Ανάλυση	87
6.2.1 Σεισμικές καταγραφές.....	88

6.2.2 Δυναμική Ανάλυση στο SAP2000.....	95
6.3 Αποτελέσματα Ανελαστικής Δυναμικής Ανάλυσης	97
6.3.1 Τετραόροφο κτίριο.....	97
6.3.1.1. Χρονοϊστορίες απόλυτης επιτάχυνσης.....	97
6.3.1.2 Χρονοϊστορίες απόλυτης μετακίνησης.....	99
6.3.1.3 Χρονοϊστορίες σχετικής μετακίνησης.....	101
6.3.1.4 Σχετικές μετακινήσεις ανά όροφο.....	102
6.3.1.5 Απόλυτη μετακίνηση ανά όροφο.....	105
6.3.2 Οκταόροφο κτίριο.....	108
6.3.2.1 Χρονοϊστορίες απόλυτης επιτάχυνσης.....	108
6.3.2.2 Χρονοϊστορίες σχετικής μετακίνησης.....	110
6.3.2.3 Χρονοϊστορίες απόλυτης μετακίνησης.....	112
6.3.2.4 Σχετικές μετακινήσεις ανά όροφο.....	114
6.3.2.6 Απόλυτη μετακίνηση ανά όροφο	117
Κεφάλαιο 7ο	121
7.1. Γενικά Συμπεράσματα.....	121
7.2. Συμπεράσματα από την Αριθμητική Διερεύνηση.....	122
7.3 Προτάσεις για Μελλοντική Ερευνα.....	123
Βιβλιογραφία.....	125
Ελληνική βιβλιογραφία.....	125
Διεθνής Βιβλιογραφία.....	126
Ηλεκτρονική Βιβλιογραφία.....	127

Κεφάλαιο 1^ο

Εισαγωγή

1.1 Γενικά

Η έμπνευση για τη δημιουργία κήπων στις οροφές των κτιρίων έχει τις ρίζες της στους αρχαίους χρόνους. Χαρακτηριστικότερο παράδειγμα, αποτελεί ένα από τα επτά θαύματα του αρχαίου κόσμου, οι Κρεμαστοί Κήποι της Βαβυλώνας. Πιθανολογείται ότι αποτελούσαν μέρος των εξωτερικών τειχών της Βαβυλώνας, κατασκευάστηκαν από τον βασιλιά Ναβουχοδονόσωρ ΙΙ (600-562 π.Χ.) και κάλυπταν μια έκταση 1-1,5 εκταρίου και ήταν κτισμένοι σε αναβαθμίδες. Από τα πρώτα «πράσινα» δώματα είναι και τα Ζιγκουράτ, επίσης στην περιοχή της Μεσοποταμίας, τα οποία άρχισαν να κατασκευάζονται περίπου από το 3.500 π.Χ. Αποτελούσαν φυτοκαλυμμένες κλιμακωτές εξέδρες πάνω στις οποίες έκτιζαν οι Βαβυλώνιοι τους ναούς και τα ιερά τους για να λατρέψουν τους θεούς τους.

Επίσης, έχει καταγραφεί ότι ο Ιουστινιανός είχε εξώστες με φυτά περίπου το 500 μ.Χ. Σε εκκλησιαστικά βιβλία του 11^{ου} και 12^{ου} αιώνα απεικονίζονται μερικά παραδείγματα της βυζαντινής περιόδου. Η Αναγέννηση έφερε ένα ανανεωμένο ενδιαφέρον για τους οροφόκηπους, το οποίο πιθανότατα οφείλεται στη αναζωογόνηση του κλασσικού πολιτισμού και της τάσης για την εισαγωγή εξωτικών φυτών. Περί το 1400 ο Cosimo de Medici έκτισε έναν οροφόκηπο στην βίλα του κοντά στην Φλωρεντία της Ιταλίας και αργότερα ο Καρδινάλιος Johann van Lamberg (1689-1712) στην κατοικία του στη Γερμανία.

Στα νεότερα χρόνια, τον 19^ο αιώνα, ο κατασκευαστής Carl Rabbitz (1825-1891) παρουσίασε στην Παγκόσμια Έκθεση του 1967 στο Παρίσι, ένα μοντέλο του οροφόκηπου που είχε στο σπίτι του στο Βερολίνο, για πρώτη φορά σε αστική περιοχή. Στη Γερμανία κατά το 1890 οι αγροικίες καλύπτονται για λόγους πυροπροστασίας με μια στρώση φυτοχώματος πάνω στην οποία φύτεωναν διάφορα φυτά. Τα «πράσινα» δώματα γίνονται πλέον μόδα στη Γερμανία τη δεκαετία του 1960 και από εκεί εξαπλώνονται στην υπόλοιπη Ευρώπη. Παρομοίως, περίπου το 1930 εμφανίζονται και στην Αμερική όπου γίνονται ιδιαίτερα δημοφιλείς.

Δυστυχώς, τα «πράσινα» δώματα δεν είναι αρκετά διαδεδομένες κατασκευές στη χώρα μας, με αποτέλεσμα να υπάρχουν χιλιάδες τετραγωνικά μέτρα τσιμεντένιων ταρατσών ανεκμετάλλευτα, χωρίς να έχουν ουσιαστική και αποδοτική χρήση. Οι ταρατσες αυτές έπειτα από σωστή μελέτη θα ήταν εφικτό να μεταμορφωθούν σε νησίδες πρασίνου και να αποτελέσουν σημαντικό παράγοντα αναβάθμισης της ποιότητας του αστικού περιβάλλοντος.

1.2 Σεισμική απόκριση κτιριακών κατασκευών

Οι διαταραχές του εδάφους λόγω σεισμικών δονήσεων συνεπάγονται την άσκηση δυνάμεων ή/και παραμορφώσεων και την ανάπτυξη τάσεων και παραμορφώσεων σε οποιοδήποτε κατασκευή βρίσκεται στην περιοχή εμφάνισης του φαινομένου. Ο τρόπος με τον οποίο μια σεισμική δόνηση καταπονεί ένα κτίριο αφορά κυρίως τις επιβαλλόμενες αδρανειακές δυνάμεις. Έτσι, καθώς η βάση της κατασκευής μετακινείται, μετακινούνται -με κάποια διαφοροποίηση- και οι υψηλότεροι οροφοί της. Επομένως, παλαιότερα κτίρια σχεδιασμένα συνήθως για την αντιμετώπιση κυρίως στατικών φορτίσεων, δύσκολα θα αντέξουν ισχυρές σεισμικές καταπονήσεις. Αυτό συμβαίνει λόγω απρόσμενης «υπερφόρτισης» της κατασκευής και μπορεί να επιφέρει μεγάλες βλάβες στα φέροντα και μη φέροντα μέλη του κτιρίου, και να οδηγήσει ακόμα και στην κατάρρευσή του.

Οι αδρανειακές δυνάμεις (inertia forces) μεταβάλλονται κατά τη διάρκεια της σεισμικής δονήσεως. Το μέγεθος των δυνάμεων αυτών είναι ανάλογο της μάζας της κατασκευής και μεταβάλλεται κάθε χρονική στιγμή, καθώς μεταβάλλεται η επιτάχυνση του ίδιου του σεισμού (δεύτερος νόμος του Νεύτωνα: $F = m \cdot a$). Επομένως, η γενική δομική και αρχιτεκτονική σύνθεση του κτιρίου (τοπολογία φέροντος οργανισμού, μάζα, μέγεθος και σχήμα), καθορίζει σημαντικά τον βαθμό αντιμετώπισης των σεισμικών δυνάμεων. Φυσικά, σημαντικότερο ρόλο στην συμπεριφορά του κτιρίου διαδραματίζουν και τα χαρακτηριστικά του συγκεκριμένου σεισμού, αλλά και οι τοπικές εδαφικές συνθήκες.

Είναι προφανές ότι σε περίπτωση ισχυρού σεισμού η αύξηση της μάζας της κατασκευής συνεπάγεται την επιβάρυνσή της με αυξημένα οριζόντια και κατακόρυφα σεισμικά φορτία. Συνεπώς, υπάρχει συγκριτικό πλεονέκτημα στις ελαφρύτερες κατασκευές (π.χ., ξύλινες και μεταλλικές), σε σχέση με αυτές από οπλισμένο

σκυρόδεμα που γενικά είναι βαρύτερες, ειδικά σε περιπτώσεις όπου υπάρχουν πρόσθετα φορτία, όπως, π.χ., πισίνες σε ταράτσες αστικών ξενοδοχείων.

Επίσης, ιδιαίτερα σημαντικό είναι το γεγονός ότι, ανάλογα με την μάζα και την ευκαμψία του κτιρίου, οι επιταχύνσεις που θα αναπτυχθούν σε αυτό μπορεί να είναι μεγαλύτερες ή μικρότερες από τις επιβαλλόμενες επιταχύνσεις στη βάση του. Μικρά, συμπαγή κτίρια θεωρούνται σχετικά δύσκαμπτα, ενώ πιο εύκαμπτα θεωρούνται τα πιο ψηλά και ελαφρύτερα κτίρια. Συνήθως, το χαρακτηριστικό που κατά κύριο λόγο καθορίζει τη δυναμική απόκριση ενός κανονικού κτιρίου είναι η θεμελιώδης ιδιοπερίοδος του που αντιστοιχεί στην πρώτη ιδιομορφή του, ενώ για μη κανονικά (σε γεωμετρία, δυσκαμψία, μάζα) οι ανώτερες ιδιομορφές επηρεάζουν σημαντικά την απόκριση. Επίσης, είναι σημαντικό για τον μηχανικό, να καταλάβει τη δομική απόκριση και συμπεριφορά της κατασκευής τόσο στο σύνολο της, αλλά και σε κάθε δομικό μέλος, ειδικά στα πρωτεύοντα. Γενικά, ο τρόπος με τον οποίο η κατασκευή αποσβαίνει τη σεισμική ενέργεια, θα καθορίσει την επιτυχία ή αποτυχία του αντισεισμικού σχεδιασμού της.

1.3 Περιγραφή της δομής της εργασίας

Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα πραγματοποιηθεί αριθμητική διερεύνηση τυπικών πλαισιακών κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα, όσον αφορά την απόκρισή τους σε πιθανούς σεισμούς, με και χωρίς την προσθήκη «πράσινου» δώματος. Στο πρώτο κεφάλαιο, αναφέρονται γενικά στοιχεία σχετικά με το αντικείμενο και τη δομή της εργασίας.

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα γενικά χαρακτηριστικά του «πράσινου» δώματος. Αρχικά, αναφέρονται οι τύποι των φυτεμένων δωματίων, ο τρόπος κατασκευής τους, καθώς και τα πολλαπλά περιβαλλοντικά, κοινωνικά και οικονομικά οφέλη. Επίσης, αναφέρεται η διεθνής και εθνική πρακτική που ισχύει τα τελευταία χρόνια για την κατασκευή «πράσινου δώματος». Στη συνέχεια, στο τρίτο κεφάλαιο περιγράφεται συνοπτικά το φαινόμενο του σεισμού, η εδαφική κίνηση που προκαλείται εξαιτίας της διάδοσης των σεισμικών κυμάτων και με ποιον τρόπο επηρεάζεται μια κτιριακή κατασκευή.

Το τέταρτο κεφάλαιο της παρούσας εργασίας αποτελεί το τελευταίο κεφάλαιο της βιβλιογραφικής επισκόπησης, στο οποίο γίνεται μία περιγραφή του φαινομένου

της δυναμικής αλληλεπίδρασης εδάφους-θεμελίωσης-κατασκευής. Παρατίθενται οι μέθοδοι ανάλυσης και γίνεται αναφορά στην κινηματική και αδρανειακή αλληλεπίδραση. Επίσης, παρουσιάζονται οι κανονιστικές οδηγίες που δίνονται στον Ευρωκώδικα αναφορικά με το εν λόγω φαινόμενο.

Στο πέμπτο κεφάλαιο γίνεται μία εκτενής περιγραφή της προσομοίωσης των κτιρίων –μέσω του λογισμικού SAP2000- που εξετάσθηκαν στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Στο έκτο κεφάλαιο παρουσιάζονται και σχολιάζονται τα αποτελέσματα από τις ιδιομορφικές και δυναμικές μη-γραμμικές αναλύσεις (με χρήση κατάλληλων χρονοϊστοριών επιταχύνσεων) που πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσιο της διεξαχθείσας διερεύνησης. Τέλος, στο έβδομο κεφάλαιο παρατίθενται τα συμπεράσματα και γίνονται προτάσεις για περαιτέρω διερεύνηση του θέματος.

Κεφάλαιο 2^ο

Χαρακτηριστικά «πράσινου» δώματος

2.1 Η έννοια του «πράσινου» δώματος

Στις περισσότερες μεγαλουπόλεις, η αλόγιστη ανάπτυξη του δομημένου περιβάλλοντος, η άναρχη κι αυθαίρετη δόμηση καθώς κι ο περιορισμός/εξαφάνιση σχεδόν όλων των αστικών δημόσιων χώρων πρασίνου, έχουν προκαλέσει υποβάθμιση της ποιότητας ζωής των κατοίκων, δυσμενείς περιβαλλοντικές συνθήκες και αισθητική υποβάθμιση της εικόνας των πόλεων. Αναμφίβολα, η «επαναφορά» της φύσης στα σημερινά αστικά κέντρα, αποτελεί ένα δύσκολο, αλλά όχι ακατόρθωτο εγχείρημα. Ένας από τους λιγοστούς πλέον τρόπους παρέμβασης είναι η δημιουργία «πράσινων» δωματίων.



Εικόνα 2.1: Εικόνα πυκνοδομημένης Αθήνας (Πηγή: www.hdtimelapse.net).

Πράσινη στέγη ή φυτεμένο δώμα είναι η οροφή μιας κτηριακής κατασκευής στην οποία δημιουργείται ένας χώρος πρασίνου και αποτελείται από τεχνικά υλικά προστασίας του κτιρίου και συγκράτησης του υποστρώματος και των φυτών.

Ένα «πράσινο» δώμα αποτελείται από τρία επιμέρους τμήματα. Αρχικά, το δομικό τμήμα (υπόβαθρο της κατασκευής), το κηπευτικό τμήμα (ουσιαστικά ο κήπος

της στέγης) και το φυτικό τμήμα (φυτά). Τα τρία αυτά μέρη μπορεί να είναι ανεξάρτητα και να αποτελούνται από διαφορετικά υλικά και σύσταση, όμως στην ουσία εξαρτώνται το ένα από το άλλο, καθώς η ύπαρξη του ενός προϋποθέτει την ύπαρξη του προηγούμενου, για την δημιουργία της συγκεκριμένης κατασκευής.

Τα φυτεμένα δώματα απαντώνται πολλές φορές, με μικρές κατασκευαστικές διαφοροποιήσεις, με τους εξής τύπους:

- «Πράσινες» στέγες (green roofs).
- Οικολογικές Στέγες ή Βιο-Στέγες (Ecoroofs - Bioroofs).
- «Ζωντανές» στέγες (Living roofs).
- Κήποι Οροφής (roof gardens).
- «Καφέ» Στέγες (brown roof).
- «Χορτάρινες» Στέγες (Sod roof).



Εικόνα 2.2: Φυτεμένο δώμα (Πηγή: sustentator.com).

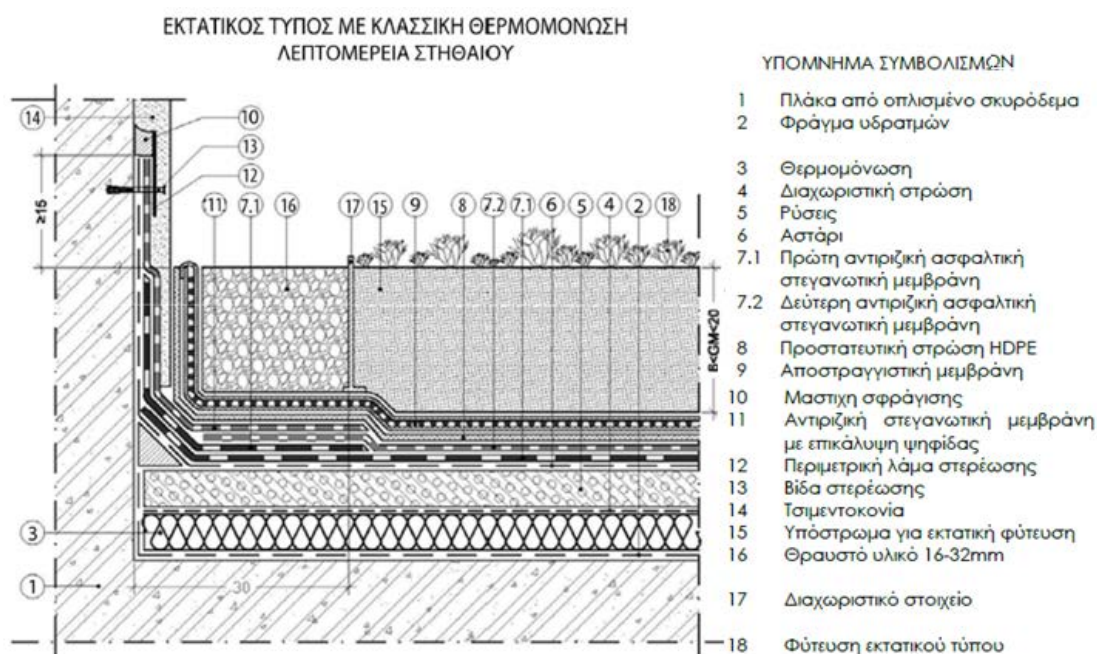
2.2 Τύποι φυτεμένων δωμάτων

- **Εκτατικός τύπος (Extensive green roof)**

Ο εκτατικός τύπος οργανώνεται σε πολυεπίπεδη διαστρωμάτωση με ελαφρύ υπόστρωμα ανάπτυξης φυτών ύψους 10 έως 15εκ., που μαζί με το φυτικό υλικό δημιουργεί ένα μόνιμο οικοσύστημα, η συντήρηση του οποίου απαιτεί ελάχιστη φροντίδα. Εφαρμόζεται σε μη προσβάσιμες στέγες κτηριακών εγκαταστάσεων, σε

Κεφάλαιο 2ο - Χαρακτηριστικά «πράσινου» δώματος

πρανή ή σε κτήρια τα οποία είναι ικανά να φέρουν ελαφρύ επιπλέον φορτίο βλάστησης. Ιδανικές επιλογές για το είδος, αυτό είναι τα φυτά χαμηλής βλάστησης (όπως τα φυτά εδαφοκάλυψης, αγριολούλουδα και φυτικοί τάπητες). Το φορτίο κυμαίνεται από 70 ως 140 kg/m² κορεσμένο, και το ριζικό σύστημα των φυτών είναι επιφανειακό. Το περιορισμένο βάρος της κατασκευής στο σύνολό της επιτρέπει την εγκατάστασή της, σχεδόν σε οποιαδήποτε οροφή. Ο συγκεκριμένος τύπος είναι ο πιο ενδεδειγμένος για τη βιοκλιματική εφαρμογή σε υφιστάμενα κτίρια, όπου, για την επίτευξη των βέλτιστων αποτελεσμάτων σε επίπεδο ενεργειακής συμπεριφοράς είναι απαραίτητη η φυτοκάλυψη της επιφάνειας των στεγών/δωμάτων σε ποσοστό 95% (Εικόνα 2.3).



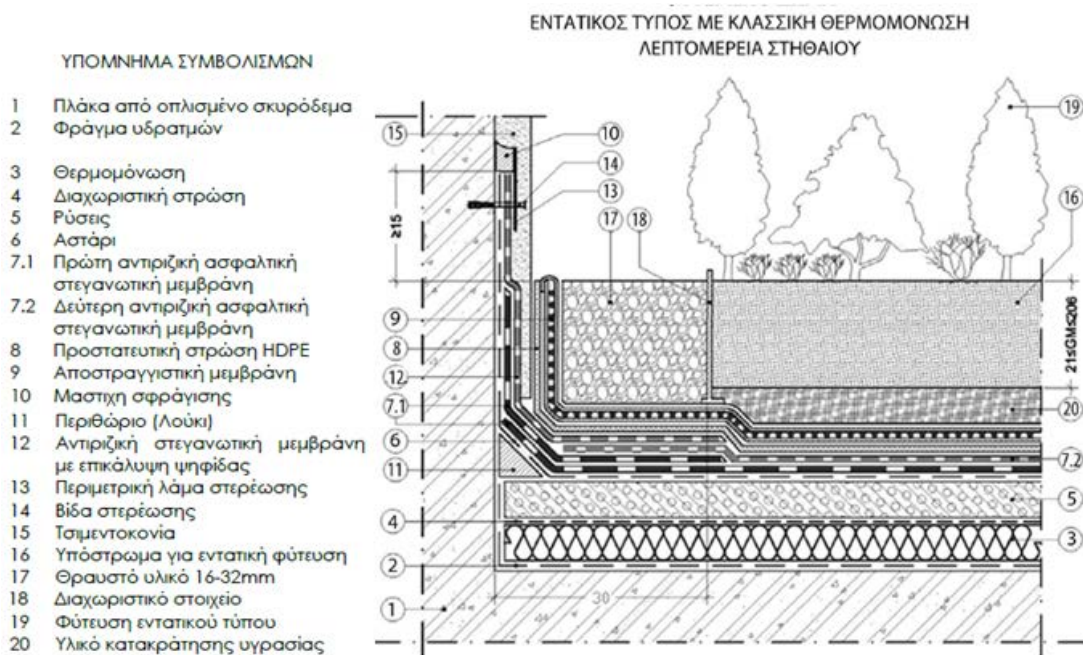
Εικόνα 2.3: Απεικόνιση διαστρωμάτωσης δώματος εκτατικού τύπου.

- **Ημιεντατικός τύπος (semi-intensive green roof)**

Ο ημιεντατικός τύπος αποτελείται από σύστημα υποδομής και ελαφρύ υπόστρωμα ανάπτυξης φυτών, ύψους 10 έως 25εκ. Εφαρμόζεται σε επικλινείς ή επίπεδες οροφές και απαιτεί περιοδική συντήρηση (άρδευση, λίπανση, κλπ). Στο σύστημα χρησιμοποιούνται φυτά που μπορούν να διατηρηθούν καθ' όλη την διάρκεια του έτους όπως, φυτά εδαφοκάλυψης, χαμηλοί θάμνοι ή χλοοτάπητας. Το φορτίο του ημιεντατικού τύπου κυμαίνεται 120-250 kg/m² κορεσμένο.

• Εντατικός τύπος (intensive green roof)

Ο εντατικός τύπος συνίσταται στη δημιουργία ενός κήπου, με σύστημα υποδομής και υπόστρωμα ανάπτυξης ύψους 15 έως 150 εκ. και κορεσμένο φορτίο τουλάχιστον 250 kg/m². Ο συγκεκριμένος τύπος απαιτεί τακτική συντήρηση (άρδευση, λίπανση, κ.λπ.) και περιλαμβάνει ποικιλία φυτών, μικρών δένδρων και θάμνων. Ο εντατικός τύπος φυτεμένου δώματος μπορεί να υποστηρίξει κατασκευές όπως μονοπάτια, στοιχεία νερού, συστήματα σκίασης κ.α. Για την εγκατάσταση εντατικού τύπου σε υφιστάμενα κτήρια απαραίτητη προϋπόθεση είναι η εκπόνηση στατικής μελέτης.



Εικόνα 2.4: Απεικόνιση διαστρωμάτωσης δώματος εντατικού τύπου.

2.3 Οφέλη «πράσινης» στέγης στον αστικό χώρο

Σήμερα, η ανάγκη για μια πιο ανθρώπινη και «φιλική» πόλη γίνεται ολοένα πιο επιτακτική. Τα φυτά επιδρούν στο κλίμα και το μεταβάλλουν, καθώς μεταξύ κλίματος και χλωρίδας υπάρχει μια ιδιαίτερα σύνθετη, παθητική και ενεργητική αλληλεξάρτηση. Βάσει του δεδομένου αυτού, η παρουσία βλάστησης σ' ένα δώμα/στέγη είναι σε θέση να παρέχει ένα πλήθος ωφέλιμων πλεονεκτημάτων σε σύγκριση με ένα συμβατικό δώμα. Στην Εικόνα 2.5 παρουσιάζονται σχηματικά τα κυριότερα από αυτά.



9

2.3.1 Περιβαλλοντικά οφέλη της «πράσινης» στέγης

2.3.1.1 Διατήρηση και αύξηση της βιοποικιλότητας

Η δημιουργία «πράσινου» δώματος στα κτήρια συμβάλλει στην διατήρηση των τοπικών ενδιαιτημάτων, δημιουργώντας αυτόνομα οικοσυστήματα, αυξάνοντας έτσι την βιοποικιλότητα. Σε διάφορες χώρες έχουν πραγματοποιηθεί μελέτες σχετικά με την βιοποικιλότητα των φυτεμένων δωματίων, όπου τεκμηριώνεται ότι πολλά είδη ασπόνδυλων κολεόπτρων, αραχνών, πτηνών και εντόμων χρησιμοποιούν τις «πράσινες» στέγες, ως ενδιαίτημά τους. Όλα τα είδη των πτηνών που ζουν στις πόλεις, - σύμφωνα με την Ελληνική Ορνιθολογική Εταιρία (σπουργίτι, καρβουνιάρης, καλόγερος, λευκοσουσουράδα, κόττυφας κ.α.) - φωλιάζουν κυρίως σε κτίρια, πάρκα και δέντρα. Όμως, μπορούν να βρουν καταφύγιο πάνω σε στέγες και φυτεμένα δώματα.

Τα είδη πτηνών διαφοροποιούνται ανάλογα με τις συνθήκες και τις παραμέτρους μίας περιοχής (δώμα ή στέγη, έκταση δώματος στέγης, ύπαρξη πάρκου ή βουνού στην περιοχή, πυκνότητα δόμησης κ.α.) Όσον αφορά την δραστηριότητα των πτηνών σύμφωνα με έρευνα που πραγματοποιήθηκε στην Bassel της Ελβετίας, βρέθηκε ότι οι επισκέψεις τους στις στέγες που βρίσκονται στα πυκνοδομημένα σημεία της πόλης, αυξήθηκαν. Σύμφωνα με την ίδια έρευνα, η ποικιλότητα των φυτικών ειδών αλλά και της ίδια της κατασκευής ευνοούν την διατήρηση της βιοποικιλότητας σε ένα αστικό περιβάλλον.

Η χρήση ενδημικών φυτών και η φυσική βλάστηση που μπορεί να αναπτυχθεί, οδηγεί στην διατήρηση της βιοποικιλότητας. Επίσης, ενθαρρύνεται η παρουσία και παραμονή της πανίδας στο περιβάλλον αλλά και ο πολλαπλασιασμός πολλών ειδών χλωρίδας, τα οποία στην στάθμη του εδάφους, δεν θα μπορούσαν να αναπτυχθούν.

2.3.1.2 Μείωση του φαινομένου την θερμικής αστικής νησίδας

Η ανθρώπινη δραστηριότητα επηρεάζει σημαντικά την διαμόρφωση του κλίματος, δημιουργώντας το γνωστό αστικό περιβάλλον στις πόλεις, το οποίο συνήθως διαφέρει σημαντικά από το κλίμα των μη δομημένων περιοχών.

Η εκτεταμένη ανοικοδόμηση οδηγεί στην αύξηση των επιφανειών με σκληρά δομικά υλικά με μεγάλη θερμοχωρητικότητα. Το δεδομένο αυτό, σε συνδυασμό με τον περιορισμό της βλάστησης και την αύξηση των ποσοτήτων θερμότητας από τις

ανθρώπινες δραστηριότητες έχουν ως αποτέλεσμα την διαμόρφωση ενός αστικού κλίματος το οποίο χαρακτηρίζεται από:

- υψηλές ημερήσιες και νυχτερινές θερμοκρασίες,
- αυξημένη ατμοσφαιρική υγρασία,
- περιορισμένη κίνηση του αέρα (εξαιτίας της πυκνής δόμησης).

Ως «Φαινόμενο την Θερμικής Αστικής Νησίδας» (Urban Heat Island Effect) χαρακτηρίζεται η τοπική μεταβολή των ατμοσφαιρικών συνθηκών στις πόλεις. Το φαινόμενο αυτό δημιουργεί ανοδικά ρεύματα αέρα, τα οποία αποτελούν τον κύριο λόγο για την εμφάνιση έντονων βροχοπτώσεων με την μορφή καταιγίδας, και για την αυξημένη συγκέντρωση ρύπων στον αέρα της πόλης. Επίσης μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση της μέσης θερμοκρασίας των πόλεων από 7 – 10 °C σε σύγκριση με τα προάστια και σε υψηλότερη συγκέντρωση όζοντος και αιθαλομίχλης στην ατμόσφαιρα.

Στην Ελλάδα, η έρευνα για το φαινόμενο αυτό έχει κυρίως επικεντρωθεί στην πόλη των Αθηνών. Μια τέτοια έρευνα του Τμήματος Φυσικής του Πανεπιστημίου Αθηνών συμπέρανε ότι, η διαφορά θερμοκρασίας ανάμεσα στην πόλη των Αθηνών και των περιφερειακών Δήμων αγγίζει τους 12 °C. Επίσης, στην ίδια έρευνα παρατηρείται έντονα ότι η θερμοκρασία του αέρα πάνω από την πόλη έχει αυξηθεί αρκετά τα τελευταία χρόνια. Αυτό συμβαίνει γιατί τα δώματα και γενικώς οι επίπεδες επιφάνειες συγκρατούν πολύ υψηλές θερμοκρασίες (50-70°C) με αποτέλεσμα ο αέρας που κατεβαίνει από τους ορεινούς όγκους να θερμαίνεται υπερβολικά και έτσι να έχουμε αλλαγή του μικροκλίματος.

Το φαινόμενο της θερμικής αστικής νησίδας διαφοροποιείται σημαντικά σε κάθε περιοχή ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της, όπως:

- το κλίμα, κυρίως μέσω της ατμοσφαιρικής θερμοκρασίας, της σχετικής υγρασίας, της ακτινοβολίας και της ταχύτητας του ανέμου,
- την ανθρώπινη δραστηριότητα, η οποία σχετίζεται με τη παραγωγή θερμότητας στις πόλεις και τη ρύπανση του ατμοσφαιρικού αέρα,
- τη μορφολογία, των αστικών επιφανειών, με το ανάγλυφο του εδάφους και την πυκνότητα δόμησης, η οποία καθορίζει το ποσοστό δέσμευσης της προσπίπτουσας ακτινοβολίας και την ικανότητα του ανέμου να απομακρύνει ή όχι ένα μέρος από τους ρύπους και τις θερμές αέριες μάζες,

- την έκταση της πόλης, η οποία καθορίζει σε μεγάλο βαθμό την ύπαρξη και το βαθμό εμφάνισης του φαινομένου,
- την ύπαρξη διαδικασιών προστασίας και την υπερθέρμανση,
- την παρουσία θερμοκρασιακής αναστροφής στον ευρύτερο ατμοσφαιρικό χώρο.

Επομένως, η «επαναφορά» της βλάστησης στις σύγχρονες πόλεις, με οποιονδήποτε τρόπο, μπορεί να βελτιώσει το αστικό κλίμα μέσω των βιολογικών διεργασιών των φυτών και να αναδιαμορφώσει το μικροκλίμα ενός κτιρίου ή μιας μικρής περιοχής.

Βασικό ρόλο σε αυτό διαδραματίζει η εξατμισοδιαπνοή η οποία είναι μια βασική διεργασία, κατά την οποία στο στάδιο της διαπνοής, μεγάλα ποσά ενέργειας και θερμότητας χρησιμοποιούνται για την μεταφορά του νερού από το ριζικό σύστημα στα διάφορα μέρη του φυτού για την μετατροπή των θρεπτικών συστατικών σε βιομάζα, ενώ κατά το στάδιο της εξάτμισης απελευθερώνονται ποσότητες νερού στην ατμόσφαιρα. Έτσι δεσμεύεται η ηλιακή ενέργεια, η οποία θα διοχετευόταν στο αστικό περιβάλλον με μορφή θερμότητας και επιτυγχάνεται φυσικός αστικός δροσισμός ή σε μικρότερο βαθμό δροσισμός σε επίπεδο γειτονίας ή κτιρίου.

Όσο μεγαλύτερη είναι μια επιφάνεια με βλάστηση τόσο πιο έντονη είναι η διαφοροποίηση της θερμοκρασίας στο εσωτερικό της. Στις περιπτώσεις όπου οι επιφάνειες με βλάστηση είναι μικρές, όπως τα συμβατικά δώματα, θα πρέπει αυτές να ενταχθούν σε ένα ευρύτερο δίκτυο αστικών υπαίθριων χώρων πρασίνου για να έχουν ευεργετική επίδραση και αν μπορεί η επίδραση αυτή να ποσοτικοποιηθεί με την χρήση κάποιου μαθηματικού μοντέλου.

2.3.1.3 Βελτίωση μόνωσης και εξοικονόμησης ενέργειας του κτιρίου

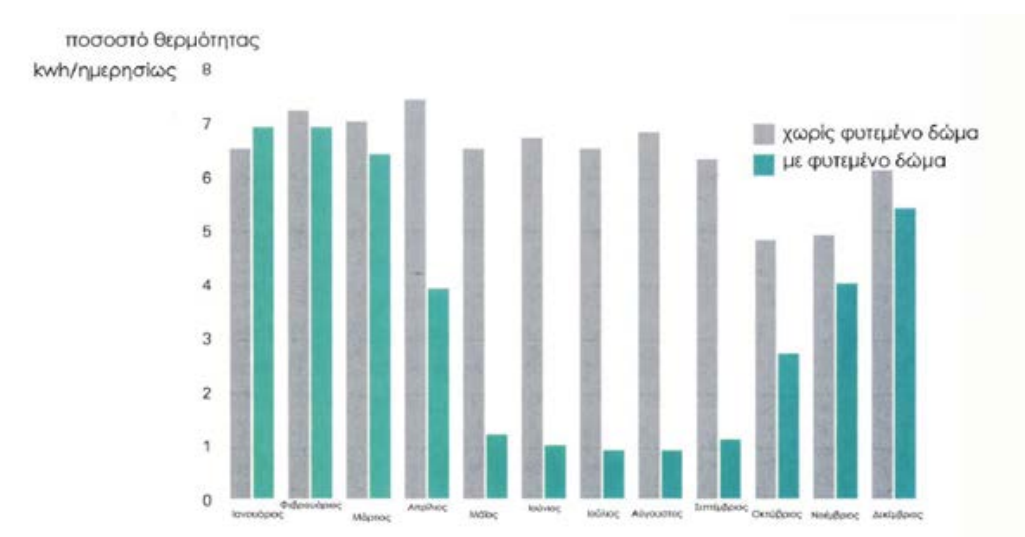
Ένα από τα βασικά περιβαλλοντικά οφέλη των φυτεμένων δωμάτων είναι ότι συμβάλουν στην θερμομόνωση των κτιρίων και στον περιορισμό των ενεργειακών απωλειών. Οι παράμετροι που συνθέτουν τις θερμομονωτικές ιδιότητες των φυτεμένων στεγών είναι:

- άμεση σκίαση της στέγης,
- δροσισμός που προκύπτει ως αποτέλεσμα της εξατμισοδιαπνοής των φυτών,
- υψηλή θερμοχωρητικότητα του μέσου στο οποίο αναπτύσσονται, κ.α.

Οι υψηλές θερμοκρασίες επηρεάζουν και τις εξωτερικές αλλά και τις εσωτερικές συνθήκες του κτηρίου. Η αύξηση της θερμοκρασίας στο εσωτερικό ενός κτηρίου καθιστά αναγκαία την εκτεταμένη χρήση των κλιματιστικών συσκευών και εγκαταστάσεων, αυξάνοντας και τα επίπεδα κατανάλωσης της ενέργειας προκειμένου να καλυφθούν οι ανάγκες για ψύξη.

Ανάμεσα στα κτίρια με φυτεμένα δώματα και συμβατικές στέγες, παρατηρείται σημαντική διαφορά θερμοκρασίας στο εσωτερικό τους. Αυτό προκύπτει και από έρευνα που πραγματοποιήθηκε στην περιοχή Ottawa από το Εθνικό Συμβούλιο Ερευνών του Καναδά όπου, μια συμβατική στέγη μπορεί να φτάσει να έχει 70 °C, ενώ φυτεύοντάς την δεν θα ξεπερνούσε τους 25 °C.

Παρόμοια αποτελέσματα έδωσαν και περιπτώσεις κτιρίων στη Σιγκαπούρη, όπου το κλίμα είναι τροπικό. Σε επιφάνεια που ήταν καλυμμένη με πλακόστρωση, κατά τις απογευματινές ώρες μετρήθηκε μέγιστη θερμοκρασία 57 °C, ενώ η μέγιστη ημερήσια διακύμανση ήταν 30°C. Αντίθετα σε επιφάνεια που υπήρχε κάλυψη από ένα είδος φοίνικα η μέγιστη θερμοκρασία που παρατηρήθηκε ήταν μόνο 27 °C και η μέγιστη ημερήσια διακύμανση ήταν μόλις 3 °C. Οι παραπάνω περιπτώσεις αποτελούν ακραίες περιπτώσεις. Επίσης, μετρήθηκαν επιφάνειες με κάλυψη από χώμα και από *Ophiopogon* (είδος με μικρή φυλλική επιφάνεια και περιορισμένη ανάπτυξη), οι οποίες αποτελούν ηπιότερες περιπτώσεις.



Εικόνα 2.6: Συγκριτικό διάγραμμα μέσης ημερήσιας ενεργειακής κατανάλωσης για θέρμανση ή κλιματισμό κτιρίου με συμβατική στέγη και φυτεμένης στέγης (Πηγή: Dunnet, Kingsbury 2004).

Στην Εικόνα 2.6 παρατίθεται συγκριτικό διάγραμμα μέσης ημερήσιας ενεργειακής κατανάλωσης για θέρμανση ή κλιματισμό κτηρίου με συμβατική και φυτεμένη στέγη. Το διάγραμμα παρουσιάζει τις ενεργειακές απαιτήσεις στο εσωτερικό ενός κτηρίου με φυτεμένη στέγη και ενός με συμβατική. Είναι εμφανές ότι για το χρονικό διάστημα από τον Απρίλιο ως τον Σεπτέμβριο, η φυτεμένη στέγη είχε σαν αποτέλεσμα την σημαντική μείωση της απαιτούμενης για ψύξη ενέργειας ενώ τους χειμερινούς μήνες η διαφορά στα δύο κτήρια είναι ελάχιστη.

Όσον αφορά στη θερμομονωτική ικανότητα των φυτεμένων στεγών έχουν προκύψει διάφορα συμπεράσματα από δύο διαφορετικές επιστημονικές έρευνες. Αρχικά σε μετρήσεις που έγιναν σε 30 περιοχές της Αθήνας, σε αντιπροσωπευτικό δείγμα, προέκυψε το συμπέρασμα ότι αν οι ταράτσες ήταν φυτεμένες, θα υπήρχε μείωση των ψυκτικών και θερμικών φορτίων κατά 15-20 %. Αυτό σημαίνει ότι όταν όλα τα φορτία της περιφέρειας Αθηνών είναι περίπου 3-4 GW, η μείωση στην κατανάλωση ενέργειας θα έφτανε στα 600MW.

2.3.1.4 Μείωση της ηχορύπανσης

Στα περιβαλλοντικά οφέλη των φυτεμένων στεγών συμπεριλαμβάνεται η σημαντική ικανότητα των φυτών να απορροφούν τον ήχο και να μην τον αντανακλούν. Τα φυτά μειώνουν τις υψηλές συχνότητες και η στρώση χώματος μαζί με την αποστραγγιστική στρώση βελτιώνουν αισθητά την ηχομόνωση στο δώμα. Στις μεγάλες πόλεις όπως η Αθήνα που η στάθμη του θορύβου και της ηχορύπανσης ξεπερνά τα όρια του επιτρεπτού ορίου αυξάνει τα επίπεδα του άγχους προκαλώντας μέχρι και ψυχοσωματικές δυσλειτουργίες. Επομένως, καθίσταται αναγκαία η χρήση παρόμοιων μεθόδων, όπως δημιουργία «πράσινων» δωματίων και γενικότερα φυτεμένων επιφανειών, έτσι ώστε να επιτευχθεί μείωση του επιπέδου του θορύβου. Αντίστοιχα, φυτεύσεις με θάμνους και δέντρα χρησιμοποιούνται αρκετά χρόνια προκειμένου να μειωθεί ο θόρυβος που προκαλείται από την κίνηση των αυτοκινήτων στους δρόμους.

Στα «πράσινα» δώματα η ηχομονωτική επίδραση οφείλεται κατά κανόνα στο υπόστρωμα πάνω στο οποίο αναπτύσσονται τα φυτά. Όταν η γωνία πρόσπτωσης του ήχου είναι κάθετη, το φυτικό στρώμα συμβάλει σε μια μικρή μείωση του ήχου υψηλών συχνοτήτων λόγω απορρόφησης, ενώ η ηχομονωτική ικανότητα του χώματος πάχους 12 cm φτάνει στα 40db και τα 46db σε χώμα πάχους 20cm.

2.3.1.4 Πυροπροστασία

Οι πράσινες στέγες θεωρούνται άκαυστες και αξιολογούνται ως σκληρή επικάλυψη. Όταν υπάρχουν πυροφραγμοί και ανοίγματα στην επιφάνεια της στέγης τηρούνται ειδικές προδιαγραφές. Στην εντατική μορφή βλάστησης όπου παρουσιάζεται μικρό φορτίο πυρός, δεν υπάρχουν περιορισμοί. Στην εκτατική φύτευση όταν το υπόστρωμα έχει πάχος μέχρι 3cm, θεωρείται σκληρή επικάλυψη και περιέχει λιγότερο από 20% οργανικά συστατικά, κι απαιτείται μια απόσταση 50cm ελεύθερη από βλάστηση.

Τέτοιες ζώνες πυρασφάλειας από δομικά υλικά πλάτους 40m με 60m σε συνδυασμό με φυτά υψηλής περιεκτικότητας σε νερό, καθώς και ένα σύστημα άρδευσης με εκτοξευτήρες νερού προσαρμοσμένο στο σύστημα πυρασφάλειας του κτιρίου, δίνουν λύσεις στο πρόβλημα. Οι προδιαγραφές αυτές ισχύουν για τα βιομηχανικά κτίρια που γενικότερα πρέπει να ανταποκρίνονται σε αυστηρότερους κανονισμούς από αυτούς των κτιρίων κατοικίας.

2.3.2 Κοινωνικά οφέλη της πράσινης στέγης

2.3.2.1 Αναψυχή και ενδυνάμωση κοινωνικών σχέσεων

Τα τελευταία χρόνια, οι ρυθμοί ανοικοδόμησης καθιστούν επιτακτική ανάγκη την εκμετάλλευση των συμβατικών δωμάτων για αναψυχή. Οι χώροι στο επίπεδο οροφής υπερτερούν έναντι αυτών που βρίσκονται στο επίπεδο εδάφους αφού, ο έλεγχος των ατόμων που το επισκέπτονται έχει ως αποτέλεσμα να αποφεύγονται οι βανδαλισμοί, εγκληματικές ενέργειες, κτλ. Πλήθος δραστηριοτήτων μπορεί να λάβει χώρα σε μια πράσινη στέγη όπως παιδικό παιχνίδι, μπάμπεκιου, χώρος για κατοικίδια κ.α. Επίσης ακόμα και σε κτίρια που δεν είναι δυνατές ριζικές αναπροσαρμογές μπορεί να γίνει ικανοποιητική χρήση του δώματος με δραστηριότητες όπως ηλιοθεραπεία, καλλιέργεια φυτών σε δοχεία κ.α.

Στην Olympia της Washington βρίσκεται το κτίριο του Evergreen State College, η στέγη του οποίου καλύπτεται με 1925 m² φυτεμένη έκταση. Η πράσινη στέγη αυτού του κτιρίου χρησιμοποιείται καθημερινά από τους φοιτητές (για χαλάρωση, επικοινωνία και μελέτη).



Εικόνα 2.7: Δραστηριότητες όπως περπάτημα κ.α. μπορούν να λάβουν χώρα σε ένα πράσινο δώμα της Highline στην Νέα Υόρκη (Πηγή: Τσαλκίδης 2010).

Κατ' αυτόν τον τρόπο, ενθαρρύνεται η κοινωνικότητα και η εξωστρέφεια των πολιτών, αφού τα πράσινα δώματα αποτελούν μέρος αναψυχής και συνάντησης, ως απάντηση στην μείωση των ελεύθερων χώρων των πόλεων και στην έλλειψη κοινωνικής συνοχής.

2.3.2.2 Περιβαλλοντική εκπαίδευση

Οι πράσινες στέγες αποτελούν αρκετά σημαντικό κοινωνικό πλεονέκτημα για την αύξηση της περιβαλλοντικής συνείδησης, από την παιδική κιόλας ηλικία, ιδιαίτερα όταν υπάρχουν σε εκπαιδευτικά ιδρύματα. Με αυτόν τον τρόπο, μπορούν να εξυπηρετούν ανάγκες εκπαιδευτικού χαρακτήρα καθώς επιτρέπεται η γνωριμία, η ευαισθητοποίηση κι η άμεση επαφή μαθητών και φοιτητών με την φύση, στα πλαίσια βιωματικών περιβαλλοντικών προγραμμάτων.



Εικόνα 2.8: Εκπαιδεύοντας μικρά παιδιά στο λαχανόκηπο του φυτεμένου δώματος στο κέντρο νεολαίας στο Σικάγο (Πηγή: <http://www.asla.org/2010awards/37.html>).

2.3.2.3 Αναβάθμιση αστικής εικόνας και αύξηση της αξίας του ακινήτου

Η εικόνα των αστικών κέντρων από ψηλά είναι απωθητική εξαιτίας του ότι συντίθεται κυρίως από δομημένες επιφάνειες και συχνά παραμελημένες οροφές. Αντιπροσωπευτικότερο δείγμα, αυτής της εικόνας αποτελούν τα αστικά κέντρα που στερούνται ιστορικού χαρακτήρα ή αποτελούν βιομηχανικές περιοχές. Παρόλα αυτά, η εικόνα αυτή μπορεί να αλλάξει ριζικά εάν στα συμβατικά δώματα του αστικού κέντρου υπάρχει η δυνατότητα φύτευσης ώστε να βελτιωθεί αισθητικά η πόλη. (Εικόνα 2.9).



Εικόνα 2.9: Τριδιάστατη πλασματική απεικόνιση της πόλης Φιλαδέλφεια ΗΠΑ (Πηγή: www.greenroof.com).

Το ενδιαφέρον που παρουσιάζει μια «πράσινη» στέγη, ως προς την ομορφιά που προσφέρει, μεταβάλλεται ανάλογα με την εποχή, την αλλαγή του καιρού, την μεταφορά σπόρων μέσω πουλιών και του αέρα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, να εμφανίζονται νέα είδη στην στέγη ενώ ταυτόχρονα άλλα εξαφανίζονται λόγω παγωνιάς ή ξηρασίας. Ανάλογα με την εποχή παίρνει διαφορετικό χρώμα και μορφή αναβαθμίζοντας την αστική εικόνα από ψηλά. Επίσης, προσδίδει υψηλότερη οικονομική αξία στο ακίνητο αλλά και την γύρω περιοχή κτιρίων που έχουν θέα σε αυτήν. Έρευνες σε Αμερική και Βρετανία, έδειξαν ότι οι πράσινες στέγες μπορούν να προσδώσουν από 6% ως 15% στην αξία του σπιτιού. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το «Rockefeller Center» στην Νέα Υόρκη όπου οι κήποι χρησιμοποιούνται καθαρά για αισθητικούς λόγους.



Εικόνα 2.10: Πανοραμική φωτογραφία των φυτεμένων δώματων στο Rockefeller Center (Πηγή: www.Greenroof.com).

2.3.2.3 Αίσθηση βελτίωσης της ποιότητας ζωής

Η δημιουργία των νέων κοινόχρηστων χώρων στα παθητικά και ανεκμετάλλευτα σημεία της πυκνοδομημένης πόλης, τα κάνει ευχάριστα και χρηστικά στους κατοίκους τους. Τα δώματα αποτελούν έναν τέτοιο χώρο. Δίνεται, με αυτόν τον τρόπο, η δυνατότητα της άμεσης πρόσβασης στις στέγες των κτιρίων από όλους τους κατοίκους, ακόμη και όσων μένουν σε χαμηλότερους ορόφους, όπου το φως είναι περιορισμένο. Ταυτόχρονα, η οπτική επαφή και μόνο με την φύση λειτουργεί θετικά στην βελτίωση της ψυχικής διάθεσης των ανθρώπων. Έρευνες έχουν δείξει ότι μπορούν να μειωθούν οι ανάγκες για υπηρεσίες υγείας, μέσω της μείωσης των επιπέδων του όζοντος και της επαφής με φύση και βλάστηση. Οι κάτοικοι πυκνοδομημένων περιοχών είναι λιγότερο ευάλωτοι σε ασθένειες, αν έχουν πράσινο στα μπαλκόνια ή τις ταράτσες τους, λόγω επιπλέον οξυγόνου, του φιλτραρίσματος του αέρα και του ελέγχου της υγρασίας, αλλά και των θεραπευτικών επιδράσεων της ενασχόλησης με τα φυτά.

Όπως έχει αναφερθεί, οι πράσινες στέγες, μειώνουν τα επίπεδα της ηχορύπανσης, η οποία έχει επιδράσεις στον άνθρωπο κυρίως ψυχολογικού χαρακτήρα, αφού τα φυτά λειτουργούν ως ηχοπέτασμα των ενοχλητικών θορύβων και μπορεί να μειωθεί από 10dB, ως 50dB (ανάλογα με το πάχος του μέσου καλλιέργειας και το είδος της εφαρμογής). Όλα τα παραπάνω, μπορούν να συμβάλουν στην ψυχική ευεξία των κατοίκων και αυξάνουν την αίσθηση της βελτίωσης της ποιότητας ζωής τους.

2.3.3 Οικονομικά οφέλη της «πράσινης» στέγης

2.3.3.1 Μείωση ενεργειακών αναγκών για εξοικονόμηση κεφαλαίου

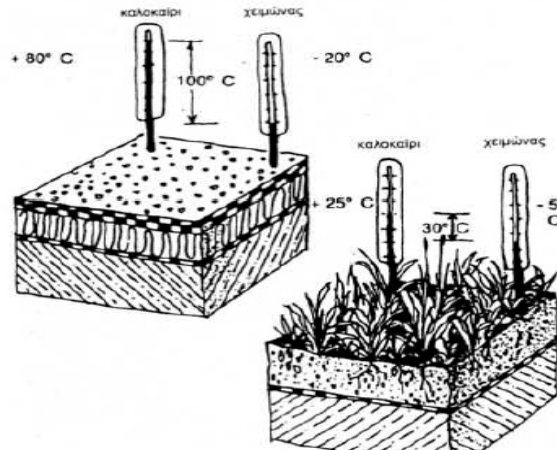
Οι πράσινες στέγες συμβάλλουν σημαντικά στην μείωση των ενεργειακών αναγκών ενός κτιρίου, άρα και στην εξοικονόμηση κεφαλαίου, εξασφαλίζοντας δροσιά τους θερμούς μήνες και εμποδίζοντας την ψύξη της οροφής το χειμώνα. Τα έξοδα κλιματισμού μπορούν να μειωθούν για τον όροφο που βρίσκεται ακριβώς από κάτω, κατά 25-50%. Η εξοικονόμηση ενέργειας εξαρτάται από το μέγεθος του κτιρίου, το κλίμα και τον τύπο της εφαρμογής.

Όσον αφορά τον ελληνικό χώρο, έρευνα που πραγματοποιήθηκε από το τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου το καλοκαίρι του 2009, στο κτίριο που στεγάζεται το Υπουργείο Οικονομίας και Οικονομικών στην πλατεία Συντάγματος, έδειξε ότι το «πράσινο» δώμα που διαθέτει έχει αποφέρει σημαντική εξοικονόμηση στην κατανάλωση ενέργειας για κλιματισμό (9,7%) και για θέρμανση (4,4%). Παρότι η φυτεμένη στέγη εγκαταστάθηκε το καλοκαίρι του 2008 και καταλαμβάνει μόλις το 52% της επιφάνειας της οροφής (650m²), εξοικονόμησε 5.630€ από την κατανάλωση ηλεκτρικού ρεύματος και πετρελαίου μέσα σε ένα χρόνο.

2.3.3.2 Αύξηση του χρόνου ζωής της οροφής

Η αντοχή στις καιρικές συνθήκες συμβατικών στεγών είναι περιορισμένη. Η θερμότητα, το ψύχος, η βροχή, η υπεριώδης ακτινοβολία, ο αέρας, το όζον και τα καυσαέρια προκαλούν συνδυασμό από μηχανικές και χημικές βλάβες.

Η έκθεση στην ηλιακή ακτινοβολία επιταχύνει την διαδικασία γήρανσης των υλικών στεγάνωσης και μειώνει την αποτελεσματικότητά τους. Επίσης, λόγω της απορρόφησης της ηλιακής ακτινοβολίας κατά την διάρκεια της ημέρας και απελευθέρωσης κατά την διάρκεια της νύχτας, δημιουργούνται θερμικά στρες στην επιφανειακή θερμοκρασία επηρεάζοντας την μακροπρόθεσμη αντοχή του υλικού. Έτσι τα ασφαλτικά φύλλα στα δώματα αντιμετωπίζουν στην διάρκεια της χρονιάς, διάφορες θερμοκρασίες έως και 100 °C. Εάν μια τέτοια στέγη καλυφθεί με εκτατική βλάβση, η διαφορά θερμοκρασίας μπορεί να μειωθεί και να φτάσει γύρω στους 30 °C.



Εικόνα 2.11: Διαφορά θερμοκρασίας στην επιφάνεια συμβατικής και πράσινης στέγης το καλοκαίρι και το χειμώνα (Πηγή: G.Minke,2009).

Αλλά και η υπερίσχυση ηλιακή ακτινοβολία που μεταβάλλει την χημική σύσταση των πετρελαιοειδών και πολυμερών, δημιουργεί αρνητικές επιπτώσεις περιορίζοντας τις μηχανικές τους ιδιότητες. Τα αποτελέσματα είναι η αποσύνθεση και η καταστροφή των υλικών της οροφής. Η χρήση των κατάλληλων τεχνικών υλικών για την μετατροπή μιας στέγης σε «πράσινη», αυξάνει το χρόνο ζωής της σε σχέση με τις συμβατικές στέγες μειώνοντας παράλληλα το κόστος συντήρησης. Αυτό συμβαίνει, γιατί το κηπευτικό τμήμα του, αποτελείται από το φυτικό υλικό, το υπόστρωμα ανάπτυξης και την αποστραγγιστική στρώση, που παρέχει πλήρη προστασία. Θεωρείται ότι η διάρκεια ζωής των υλικών στεγάνωσης σε ένα κατασκευασμένο φυτεμένο δώμα είναι περίπου 10 με 15 χρόνια. Βέβαια απαραίτητη προϋπόθεση είναι η ποιοτική κατασκευή του.

Συμπερασματικά, η μείωση της φθοράς των υδατοστεγών μεμβρανών και η αύξηση της διάρκειας ζωής τους λόγω της παρουσίας του φυτεμένου δώματος, παράλληλα με την εξοικονόμηση ενέργειας συμβάλουν στην γρήγορη απόσβεση του αρχικού κόστους εγκατάστασης.

2.3.3.3 Συνδυασμός φωτοβολταϊκών και φυτεμένων δωμάτων

Οι φυτεμένες στέγες όταν συνδυάζονται με τα φωτοβολταϊκά συμβάλλουν σημαντικά στην εξοικονόμηση ενέργειας αλλά και στην ενίσχυση της απόδοσής τους. Η τοπική μείωση της θερμοκρασίας σε μια «πράσινη» στέγη, που οφείλεται στην εξάτμιση της υγρασίας αλλά και στην διαπνοή των φυτών, βελτιστοποιεί την λειτουργία των φωτοβολταϊκών πάνελ. Αυξάνει την απόδοσή τους και συμβάλλει στην αύξηση της παραγωγής ενέργειας στην στέγη. Επίσης τα φωτοβολταϊκά πάνελ εμποδίζουν την

γρήγορη εξάτμιση και απαιτείται λιγότερο νερό. Επειδή μεταξύ των φωτοβολταϊκών και του υποστρώματος υπάρχει απόσταση, δεν δημιουργείται πρόβλημα στα φυτά όσον αφορά στην συντήρηση και στην φροντίδα τους.

2.3.3.4 Έσοδα από καλλιέργεια οπωροκηπευτικών και ανθέων

Οι πράσινες στέγες μπορούν να στηρίξουν την τοπική οικονομία με την εισροή εσόδων μέσω της καλλιέργειας στις στέγες, της επεξεργασίας και της διάθεσης προϊόντων. Η δυνατότητα καλλιέργειας προϊόντων για οικιακή κατανάλωση, μειώνει το χρόνο που χρειάζεται για την μεταφορά προς και από το σημείο πώλησης τους και τις σχετικές επιπτώσεις στο περιβάλλον. Η δυνατότητα που έχουν οι ένοικοι ενός κτιρίου να καλλιεργήσουν είδη διατροφής (λαχανικά, φρούτα, βότανα, κλπ), μπορεί να μειώσει τις αντίστοιχες δαπάνες των νοικοκυριών. Παράδειγμα αντίστοιχης οικονομίας αποτελεί το ξενοδοχείο Fairmount Waterfront στο Βανκούβερ. Ο κήπος που βρίσκεται στην ταράτσα έχει έκταση 200m² και το βάθος του χώματος είναι 45cm. Σε αυτόν καλλιεργούνται αρωματικά βότανα, καλλωπιστικά φυτά και λαχανικά, τα οποία χρησιμοποιούνται στην κουζίνα του, καλύπτοντας τις ετήσιες ανάγκες, μειώνοντας κατά 30.000 καναδικά δολάρια τα έξοδα της κουζίνας του. Παράλληλα οι πελάτες του μπορούν να χρησιμοποιήσουν τον κήπο για χαλάρωση και αναψυχή.

2.3.3.5 Αύξηση παραγωγικότητας και δημιουργία νέων θέσεων εργασίας

Αξίζει να σημειωθεί ότι παρόλο που το κόστος συντήρησης δεν είναι υψηλό για το «πράσινο» δώμα, είναι εμφανής η ανάγκη της ανθρώπινης παρουσίας που θα αναλάβει την συντήρηση, την επίβλεψη αλλά ίσως και την όλη οργάνωση και τον σχεδιασμό μιας τέτοιας εγκατάστασης. Η προσφορά εργασίας και η δημιουργία θέσης εργασίας είναι προφανής. Κατ' επέκταση, λόγω ύπαρξης ποιοτικών χώρων διαβίωσης βελτιώνεται η παραγωγικότητα, η απόδοση και δημιουργικότητα των εργαζομένων.

2.4 Μειονεκτήματα φυτεμένου δώματος

2.4.1 Στατική επιβάρυνση

Η κατασκευή ενός φυτεμένου δώματος προσθέτει στην επιφάνεια του δώματος επιπλέον φορτία στο κτίριο. Τα επιπλέον φορτία εξαρτώνται από τον τύπο του

φυτεμένου δώματος, από τη χρήση του, από τα υλικά που έχουν επιλεγεί για την κατασκευή του και από τον μέγεθος των φυτών του, όπου όλα μαζί σε συνδυασμό δύναται να προκαλέσουν πρόσθετη καταπόνηση στην κατασκευή. Όταν πρόκειται να κατασκευαστεί κήπος σε υφιστάμενο κτίριο, θα πρέπει να γίνει υπολογισμός των επιπρόσθετων φορτίων που θα δεχτεί η κατασκευή. Σε ελαφριές κατασκευές συνήθως τα επιπλέον φορτία υπολογίζονται περίπου στα 0.50 kN/m^2 , ενώ σε μία βαριά κατασκευή φυτεμένου δώματος μπορεί να φθάσουν και τα 6.00 kN/m^2 .

Ωστόσο, για μεγαλύτερη ακρίβεια, το επιπλέον φορτίο από την κατασκευή ενός φυτεμένου δώματος μπορεί να υπολογιστεί αναλυτικά, υπολογίζοντας τα φορτία κάθε επιμέρους στρώσης (στεγάνωση, θερμομόνωση κλπ.) και του κηπευτικού τμήματος, λαμβάνοντας υπόψη το βάρος κάθε στρώσης σε κορεσμένη κατάσταση υγρασίας και τα φυτά σε πλήρη ανάπτυξη.

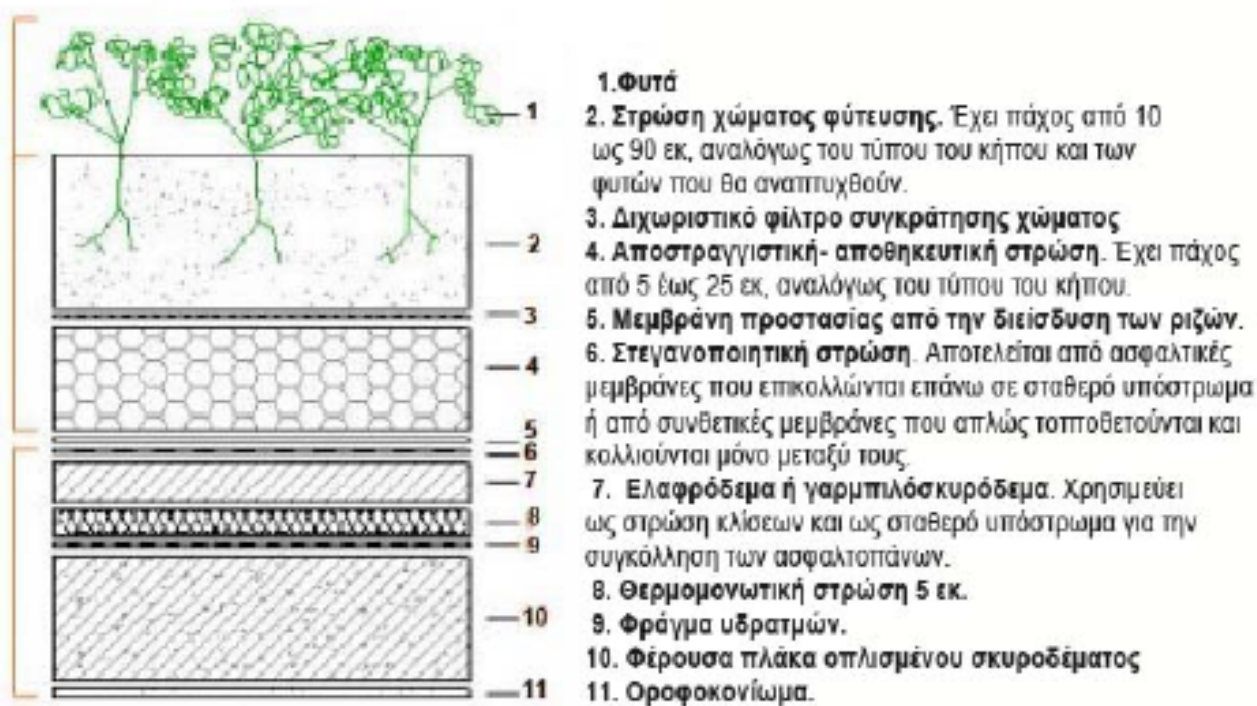
2.4.2 Κίνδυνος υγρασίας

Η προστασία από την υγρασία αποτελεί ένα βασικό ζήτημα στην κατασκευή του κτιρίου. Για την καλή λειτουργία του κήπου, συσσωρεύονται μεγάλα ποσά υγρασίας. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με την επιθετικότητα των ριζών των φυτών, αποτελούν παράγοντες που μπορούν να προκαλέσουν βλάβες (απόφραξη των υδρορροών και διάτρηση της στεγάνωσης του δώματος). Οι συνέπειες από αυτές τις δυο μορφές βλαβών είναι σημαντικές τόσο για την λειτουργία του κήπου όσο και για την επικάλυψη του δώματος. Εξαιτίας της απόφραξης των υδρορροών υπάρχει νερό που πλεονάζει το οποίο δεν είναι εύκολο να απομακρυνθεί, με αποτέλεσμα να παραμένει στα φυτά και στην αποστράγγιση προκαλώντας καταστροφή των φυτών. Επομένως, απαιτείται προσεκτική διαμόρφωση των περιοχών των υδρορροών και κατασκευή των φρεατίων ελέγχου στις απορροές για την ουσιαστική αποφυγή του κινδύνου.

Ταυτόχρονα, η διάτρηση της στεγάνωσης λόγω των ριζών έχει ως αποτέλεσμα την διείσδυση της υγρασίας κάτω από αυτήν, που οδηγεί στην καταστροφή της θερμομόνωσης. Επιπλέον, επειδή οι ρίζες έχουν την τάση να αναζητούν την υγρασία, μπορεί να προκαλέσουν μικρές ή μεγάλες μηχανικές βλάβες.

2.4.3 Οικονομική επιβάρυνση

Όπως κάθε κατασκευή, έτσι και το «πράσινο» δώμα απαιτεί κάποιο επιπλέον κόστος. Το κόστος αυτό περιλαμβάνει τον αρχικό σχεδιασμό και τη διαμόρφωση του κήπου, το κατασκευαστικό μέρος και τη συντήρησή του. Κατά κανόνα κυμαίνεται από 0,1% έως 2% του συνολικού κόστους, το οποίο βέβαια εξαρτάται από τη μορφή του κήπου και από το μέγεθος του κτιρίου. Συγκρίνοντας, την συνολική οικονομική επιβάρυνση με τα πλεονεκτήματα που προσφέρει η «πράσινη» στέγη (οικολογικές, αισθητικές, λοιπές ευεργετικές επιδράσεις βλάστησης) καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι, το μειονέκτημα αυτό μπορεί να θεωρηθεί ασήμαντο. Όσον αφορά τους τύπους των δωμάτων, λιγότερη οικονομική φροντίδα απαιτείται από τα εκτατικού τύπου δώματα σε αντίθεση με τα δώματα εντατικού τύπου.



Εικόνα 2.12: Τυπική διαστρωμάτωση ενός φυτεμένου δώματος (Πηγή: Περιοδικό Κτίριο, Ιούνιος 2006).

2.5 Κατασκευή «πράσινου» δώματος

Με το πέρασμα του χρόνου τα «πράσινα» δώματα έχουν αναβαθμιστεί αρκετά σε σχέση με τις αρχές του 20^{ου} αιώνα. Στην αναβάθμισή τους έπαιξε σημαντικό ρόλο ο ανταγωνισμός ανάμεσα στις κατασκευαστικές εταιρίες, οι οποίες κάνουν συνεχή

έρευνα και εφαρμογή των νέων τεχνικών και υλικών. Έτσι τα σύγχρονα συστήματα είναι πολύ αποτελεσματικά, πολύπλοκα και έχουν πολλές δυνατότητες.

2.5.1 Διαστρωμάτωση ενός «πράσινου» δώματος

Μια τυπική διαστρωμάτωση του συστήματος κατασκευής του φυτεμένου δώματος εντατικού και εκτατικού τύπου φαίνεται στην παρακάτω τομή (Εικόνα 2.12).

2.5.2 Προετοιμασία επιφάνειας και δημιουργία φράγματος υδρατμών

Αρχικά, η επιφάνεια του δώματος καθαρίζεται καλά και επισκευάζεται τοπικά από τυχόν φθορές. Στη συνέχεια, τοποθετείται μια διαχωριστική στρώση ώστε να παρεμποδίζεται η μετάδοση των συνεπειών που έχουν οι συστολές, οι διαστολές και η τραχύτητα της επιφάνειας του κτιρίου, στις υπερκείμενες στρώσεις της επικάλυψης του δώματος. Τα υλικά αυτά είναι κυρίως διατηρητές ασφατικές μεμβράνες οπλισμένες με υαλοϋφασμα ή συνθετικές μεμβράνες. Στην συνέχεια γίνεται επάλειψη της επιφάνειας σε δύο στρώσεις κατ' ελάχιστο, με ελαστομερές ασφαλτικό γαλάκτωμα για τη δημιουργία φράγματος υδρατμών. Το φράγμα υδρατμών τοποθετείται πάνω από την διαχωριστική στρώση και αποσκοπεί στην παρεμπόδιση της συμπύκνωσης των υδρατμών που συμβαίνει στο εσωτερικό της οροφής. Επίσης, παρεμποδίζεται η διέλευση των υδρατμών στο θερμομονωτικό επίπεδο που βρίσκεται υπερκείμενα του φράγματος υδρατμών. Για τη δημιουργία αυτής της στρώσης χρησιμοποιούνται τα εξής υλικά:

- i. Ασφαλτικά φύλλα.
- ii. Φύλλα πολυαιθυλενίου.
- iii. Συνθετικό καουτσούκ.
- iv. Πισσασφαλτικές μεμβράνες.

2.5.3 Δημιουργία Θερμομονωτικής Στρώσης

Η στρώση αυτή βρίσκεται υπερκείμενα του φράγματος υδρατμών και αποτελείται από αφρώδη υλικά με την μορφή πλάκας, όπως είναι η αφρώδης πολυστερίνη, η εξηλασμένη πολυστερίνη, ο αφρός πολυουρεθάνης, ο φαινολικός αφρός ρητίνων, ο εμποτισμένος φελλός και το αφρώδες γυαλί. Η τοποθέτηση πρέπει να γίνεται κατά

τέτοιο τρόπο ώστε να μην δημιουργούνται μεταξύ των πλακών διάκενα και να παρατηρείται το επιθυμητό αποτέλεσμα, που είναι η θερμομόνωση.

2.5.4 Στεγανωτικές – αντιριζικές στρώσεις

Για την προστασία των υποκείμενων δομικών στοιχείων από την επιθετική συμπεριφορά των ριζών των φυτών είναι απαραίτητη η στεγάνωση του δώματος με διπλή στρώση αντιριζικών ασφατικών μεμβρανών, οι οποίες θα είναι πλήρως επικολημένες στην υποκείμενη επιφάνεια. Οι μεμβράνες αυτές αποτελούνται κατά βάση από τροποποιημένη ασφαλτο (APP -10 °C ή 20 °C), φέρουν ως εσωτερικό οπλισμό Sprunbond, πολυεστερικό ύφασμα υψηλών μηχανικών αντοχών και έχουν άνω και κάτω επικάλυψη φιλμ πολυαιθυλενίου. Εμπεριέχουν δε στην μάζα τους ειδικό αντιριζικό πρόσθετο για προστασία από την διάτρηση των ριζικών συστημάτων.

Η επικόλληση των αντιριζικών στεγανωτικών φύλλων επιτυγχάνεται πάντοτε με χρήση φλόγιστρου προπανίου. Η διάστρωση των φύλλων της πρώτης μεμβράνης πραγματοποιείται πάντοτε από το κατώτερο σημείο των ρύσεων με την κατά μήκος διάσταση κάθετη προς τις ρύσεις. Οι κατά μήκος αλληλοεπικαλύψεις των φύλλων της μεμβράνης είναι κατά 8-10cm και η επικόλληση επιτυγχάνεται στο σημείο αυτό με θερμοκόλληση-σύντηξη του ίδιου του υλικού, αφού έχει προηγηθεί η συγκόλληση του υπολοίπου σώματος της μεμβράνης με το υπόστρωμα. Η θερμοκρασία συγκόλλησης είναι τέτοια, ώστε στο άκρο την αλληλοεπικάλυψης της μεμβράνης να εμφανίζεται πάντοτε συντηγμένο υλικό. Οι κατά πλάτος του ρολού επικαλύψεις (περίπου 15cm), δεν πρέπει να συμπίπτουν έτσι ώστε να εμφανίζονται τέσσερις γωνίες στο ίδιο σημείο.

Για τον λόγο αυτό σε κάθε σειρά γίνεται εναλλαγή διαφορετικού μήκους μεμβράνης. Επί των στηθαίων και γενικά επί των κατακόρυφων επιφανειών τοποθετείται λωρίδα της πρώτης ασφατικής στεγανωτικής μεμβράνης, ελαχίστου πλάτους 50cm, και κολλάται με φλόγιστρο πάνω στην κατακόρυφη επιφάνεια που έχει ασταρωθεί προηγουμένως με ασφατικό βερνίκι. Η μεμβράνη πρέπει να τοποθετηθεί με τέτοιο τρόπο ώστε το κατακόρυφο τμήμα της να ανέρχεται σε ύψος 15-20cm από το υψηλότερο σημείο ρύσεων.

Ακολουθεί διάστρωση και επικόλληση της δεύτερης αντιριζικής ασφατικής στεγανωτικής μεμβράνης. Η επικόλληση γίνεται με τον ίδιο ακριβώς τρόπο πάνω στα

φύλλα της πρώτης στρώσης με παράλληλη μετατόπιση κατά 50 cm, έτσι ώστε τα φύλλα της δεύτερης στεγανωτικής στρώσης κάθε φορά να καλύπτουν τις αλληλοεπικαλύψεις των φύλλων της πρώτης στεγανωτικής στρώσης. Επί των στηθαίων και γενικά επί των κατακόρυφων επιφανειών απόληξης ανέρχεται λωρίδα της δεύτερης στεγανωτικής μεμβράνης, ελαχίστου πλάτους 50cm, η οποία υπερκαλύπτει τη λωρίδα της πρώτης στεγανωτικής μεμβράνης κατά τουλάχιστον 15cm και στερεώνεται μηχανικά με λάμα γαλβανισμένης λαμαρίνας ανοικτού Γ, πλάτους 3cm, βίδες και βύσματα. Πρέπει να δοθεί προσοχή έτσι ώστε το κατακόρυφο τμήμα της αντιριζικής ασφαλικής στεγανωτικής μεμβράνης να ανέρχεται τουλάχιστον 15cm από το τελικό ύψος του υποστρώματος φύτευσης. Η λάμα σφραγίζεται με ελαστομερή μαστίχη πολυμερούς βάσεως, αφού προηγουμένως η επιφάνεια της έχει καθαριστεί και ασταρωθεί με κατάλληλο βερνίκι.

2.5.5 Προστασία στεγανωτικής στρώσης

Η επόμενη στρώση είναι υψηλής πυκνότητας φύλλο πολυαιθυλενίου (HDPE) ελαχίστου πάχους 0,75mm , επάνω από την στεγανωτική στρώση, για να αποφευχθεί πιθανός «τραυματισμός» της στεγανωτικής μεμβράνης κατά τις εργασίες που ακολουθούν

2.5.6 Αποστραγγιστική στρώση

Επάνω από την προστατευτική στρώση τοποθετείται η στρώση αποστράγγισης. Η σύγχρονη τεχνολογία «πράσινων» δωμάτων προτείνει έναντι του χαλικιού, πολυστρωματικές αποστραγγιστικές μεμβράνες, οι οποίες συνδυάζουν τις στρώσεις διήθησης, αποστράγγισης και διαχωρισμού προστασίας σε ένα προϊόν, ενοποιημένο και εξαιρετικά ελαφρύ. Στην αγορά κυκλοφορεί πληθώρα υλικών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για αποστράγγιση. Οι αποστραγγιστικές μεμβράνες αποτελούνται συνήθως από ένα διάτρητο φύλλο πολυστερίνης με κωνοειδείς προεξοχές ορισμένου πάχους (11mm), επικολλημένες αμφίπλευρα, με επανασυγκολλούμενη κόλλα διαρκείας, δυο μην υφαντών γεωφασμάτων. Ο κωνοειδής πυρήνας τους είναι διάτρητος έτσι ώστε, αφενός μεν να αποστραγγίζει τα πλεονάζοντα νερά του ποτίσματος του κήπου και αφ' ετέρου να συγκρατεί εντός των κώνων σημαντική ποσότητα νερού για την απαιτούμενη υγρασία του κηπευτικού χώματος,

εξασφαλίζοντας με αυτόν τον τρόπο οικονομία ποτίσματος και άριστη λειτουργία κήπου.

Οι αποστραγγιστικές μεμβράνες διαστρώνονται με επικάλυψη 10cm. Για το λόγο αυτό τα γεωϋφάσματα της επάνω όψης δυο διπλανών φύλλων αποκολλώνται προσωρινά από τον κωνοειδή πυρήνα. Οι δύο πυρήνες ενώνονται και τα δυο γεωϋφάσματα επανασυγκολλώνται έτσι ώστε να δημιουργείται ενιαία αποστραγγιστική επιφάνεια. Με τα υλικά αυτά αντιμετωπίζεται αποτελεσματικά η πρόκληση της στατικής επιβάρυνσης. Η στατική επιβάρυνση που επιφέρει ένα «πράσινο» δώμα οφείλεται παραδοσιακά στο βάρος της αποστραγγιστικής στρώσης, στο βάρος του χώματος φύτευσης και στην ίδια την φύτευση. Όταν δεν χρησιμοποιούνται πολυστρωματικές αποστραγγιστικές μεμβράνες αλλά υλικά όπως χαλίκι, λάβα, ελαφρόπετρα, σπασμένα διασταλτικά άργιλος, σχιστόλιθος, τούβλα, μεταλλική σκωρία και αφρώδες γυαλί, τότε τοποθετείται το διαχωριστικό φίλτρο, το οποίο μπορεί να είναι κατασκευασμένο από άμμο ή από διάφορες μεμβράνες όπως υαλοϋφασμα ή γεωϋφασμα.

2.5.7 Υπόστρωμα φύτευσης

Στο επόμενο επίπεδο από τις αποστραγγιστικές μεμβράνες τοποθετείται το υπόστρωμα φύτευσης, το οποίο αποτελεί το βαρύτερο υλικό του «πράσινου» δώματος. Το βάρος του υποστρώματος θα πρέπει να διατηρηθεί σε χαμηλά επίπεδα για την μείωση του επιπρόσθετου φορτίου στο δώμα και για αυτό το λόγο το υπόστρωμα θα πρέπει να παρουσιάζει ορισμένα χαρακτηριστικά όπως:

- να παρουσιάζει καλή αποστράγγιση και να συγκρατεί τα απαραίτητα ποσά υγρασίας ώστε να παρέχεται στα φυτά επαρκής ποσότητα νερού αλλά και επαρκής αερισμός στις ρίζες τους,
- να παρέχει με την σύστασή του, επαρκή στήριξη του φυτικού υλικού και να μην δημιουργεί πρόβλημα φράζοντας τα υποκείμενα κατασκευαστικά υλικά,
- να έχει υψηλή ικανότητα συγκράτησης θρεπτικών ουσιών,
- να έχει κατάλληλο pH για την ανάπτυξη των φυτών,
- να περιέχει ένα ποσοστό οργανικής ουσίας ώστε το επίπεδο θρεπτικών ουσιών και η ικανότητα συγκράτησης υγρασίας να είναι επαρκή,

- να μην ξεπερνά η οργανική ύλη το 20% του συνολικού υποστρώματος γιατί με την πάροδο του χρόνου (μετά τα δύο πρώτα έτη) θα αρχίσει να παρατηρείται μείωση της ανάπτυξης λόγω διάσπασης του οργανικού υλικού.

Τα υποστρώματα που χρησιμοποιούνται στα «πράσινα» δώματα είναι συνήθως μίγματα εδάφους ή άμμου με προσθήκη ανόργανων ή εδαφοβελτιωτικών υλικών σε διάφορες αναλογίες. Τα εδαφοβελτιωτικά χρησιμοποιούνται παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.1

Ανόργανα εδαφοκαλυπτικά		Οργανικά εδαφοκαλυπτικά
Άμμος	Βερμικουλίτης	Τύρφη
Διογκωμένη άργιλος	Ελαφρόπετρα	Χούμος
Περλίτης	Ζεόλιθοι	Κομποστοποιημένα υλικά
Γη διατομών		

Πίνακας 2.1: Τα ανόργανα και τα οργανικά εδαφοβελτιωτικά

Είναι προφανές ότι η επιλογή του υποστρώματος είναι από τους σημαντικότερους παράγοντες για την επιτυχία ενός «πράσινου» δώματος, αφού καλείται να παίζει τριπλό ρόλο: να λειτουργήσει ως ένα επιπλέον μονωτικό στρώμα, να προστατεύσει τα ευαίσθητα μέρη της κατασκευής του κτιρίου, όπως τις μεμβράνες προστασίας του δώματος και να αποτελέσει το μέσο που θα υποστηρίξει την ανάπτυξη και τη στήριξη των φυτών, δηλαδή θα αντικαταστήσει τις λειτουργίες του εδάφους, παρέχοντας στα φυτά τα θρεπτικά στοιχεία που χρειάζονται, αποθηκεύοντας νερό και επιτρέποντας την αναπνοή και την αποστράγγιση.

Τα πράσινα δώματα εκτατικού τύπου απαιτούν υπόστρωμα μικρότερου πάχους, περίπου 8-15cm και τα εντατικού τύπου πράσινα δώματα έχουν βάθος υποστρώματος 12-100cm περίπου, ανάλογα με το μέγεθος των φυτών (θάμνοι, δέντρα) που θα φυτευτούν. Ενδιάμεση περίπτωση είναι τα φυτεμένα δώματα ημιεντατικού τύπου όπου το βάθος του υποστρώματος κυμαίνεται από 10-25cm. Στις περιπτώσεις εντατικής φύτευσης, προτείνεται η τοποθέτηση ειδικών στρώσεων συγκράτησης υγρασίας από ορυκτοβάμβακα, επάνω από την αποστραγγιστική στρώση και πριν το υπόστρωμα φύτευσης. Τα υλικά αυτά έχουν την ιδιότητα να απορροφούν πολύ νερό στη μάζα τους κατά το πότισμα και να το αποδίδουν σταδιακά στον κήπο, οπότε χρησιμοποιούνται ως επιπλέον αποθήκες νερού σε ένα σύστημα εντατικής φύτευσης. Στις περιπτώσεις εκτατικής φύτευσης, όπου τα

επιτρεπτά φορτία και πάχη φύτευσης είναι πολύ μικρά, οι ορυκτοβάμβακες μπορούν να αντικαταστήσουν ακόμη και το υπόστρωμα φύτευσης.

2.5.8 Φυτικό υλικό

Το φυτικό υλικό που θα χρησιμοποιηθεί για την δημιουργία μιας φυτοκοινωνίας στο δώμα, θα πρέπει να συγκεντρώνει κάποια γενικά χαρακτηριστικά και να πληρεί κάποιες προϋποθέσεις, ώστε να εξασφαλιστεί η μακροβιότητά του και να αποφευχθούν τυχόν ζημιές στα υποκείμενα στρώματα του συστήματος των υποκείμενων δωματίων. Αυτά τα χαρακτηριστικά είναι:

- i. να έχουν τα κατάλληλα χαρακτηριστικά για την ειδική χρήση που προορίζονται,
- ii. να έχουν μειωμένες απαιτήσεις συντήρησης,
- iii. να είναι επιπολαιόριζα φυτά δηλαδή να αναπτύσσονται σε μικρό βάθος,
- iv. να μην έχουν έντονα διεισδυτικό ριζικό σύστημα,
- v. να είναι ανθεκτικό στην έντονη ακτινοβολία, στους ανέμους στην ξηρασία και στον παγετό,
- vi. να είναι ενδημικά φυτά της περιοχής ή αν είναι ξενικά να μπορούν να αντέχουν στα τοπικές συνθήκες, και
- vii. να μην υπερβαίνουν το μέγιστο μέγεθος για κάθε βάθος υποστρώματος.

Τα κριτήρια επιλογής φυτικού υλικού ποικίλουν ανάλογα με τον τύπο του δώματος. Στο εντατικό τύπο θα πρέπει να αποφεύγονται τα εξής φυτά :

- φυτά που παράγουν καρπό και ρίχνουν συνεχώς φύλλα,
- φυτά με μεγάλο τελικό μέγεθος ή βάρος,
- φυτά με εύθραυστα κλαδιά ή χαμηλή αντοχή σε ανέμους,
- φυτά με επικίνδυνα χαρακτηριστικά (αγκάθια , δηλητηριώδη μέρη).

Αντίθετα, θα πρέπει να χρησιμοποιούνται τα παρακάτω:

- φυτά ανθεκτικά σε χαμηλές θερμοκρασίες ανάλογα με την κλιματική περιοχή,
- ποικιλίες αγρωστωδών και μπαμπού,
- φυτά με εποχιακό ενδιαφέρον,
- αρωματικά φυτά,
- συνδυασμός διαφόρων ομάδων: αναρριχητικά, εδαφοκαλυπτικά, ανθοφόρα, ετήσια και πολυετή, βολβώδη,

- φυτά με απλές απαιτήσεις στη συντήρηση (λίπανση, άρδευση, κλάδεμα, ξεβοτάνισμα).

Στον εκτατικό τύπο θα πρέπει να χρησιμοποιούνται τα εξής φυτά:

- φυτικά είδη ανθεκτικά σε ακραίες τιμές θερμοκρασίας, ανέμου, ξηρασίας,
- είδη με οριζόντια μορφή ανάπτυξης για ταχύτερη και πληρέστερη κάλυψη του δώματος,
- είδη με μικρό συνολικό φυλλικό βάρος,
- είδη με χαμηλές απαιτήσεις σε θρεπτικά συστατικά για μείωση της λίπανσης,
- είδη με πλαγιוריζικό ριζικό σύστημα ώστε να αποφεύγεται η διείσδυση στη μεμβράνη,
- είδη, εάν είναι διαθέσιμα, που να προέρχονται από γειτονικές φυτοκοινότητες, ώστε να εξασφαλίζεται η οπτική συνέχεια της εικόνας του τοπίου.

2.5.9 Άρδευση και απορροή

Η ποσότητα του νερού είναι περιορισμένη στην μικρού πάχους στρώση χώματος σε ένα φυτεμένο δώμα, γι' αυτό και θα πρέπει να εξασφαλιστούν συνθήκες μόνιμης υγρασίας κυρίως κατά την θερινή περίοδο, όπου η απουσία υγρασίας ενδέχεται να ξηράνει τα φυτά και τελικά να τα καταστρέψει. Ο πιο ενδεδειγμένος τρόπος άρδευσης είναι η τεχνητή άρδευση του φυτεμένου δώματος με δυνατότητα αυτοματοποίησης, χρησιμοποίησης δηλαδή ηλεκτρονικού χρονοδιακόπτη συνδεδεμένου με ηλεκτροβάννα. Οι τεχνικές άρδευσης είναι συνήθως οι εξής:

✓ **Σύστημα στάγδην (Εικόνα 2.13α)**

Είναι «υπόγειο» ή «επίγειο». Και στις 2 περιπτώσεις το σύστημα αποτελείται από ένα πλέγμα σωληνώσεων οι οποίοι είναι διάτρητοι ανά ορισμένες αποστάσεις ώστε να διανέμεται το νερό υπό μορφή σταγόνων. Στην «επίγεια» μορφή οι σωληνώσεις επικάθονται πάνω στο έδαφος, για αυτό το σύστημα διατρέχει κινδύνους προσβολής των αγωγών από την ηλιακή ακτινοβολία, αλλά και μηχανές για την φροντίδα του δώματος όπως χορτοκοπτικές μηχανές. Το πρόβλημα αντιμετωπίζεται όταν οι αγωγοί τοποθετούνται υπόγεια, στην μάζα του χώματος.

✓ **Υπόγειο πότισμα στο επίπεδο της αποστραγγιστικής στρώσης (Εικόνα 2.13β)**

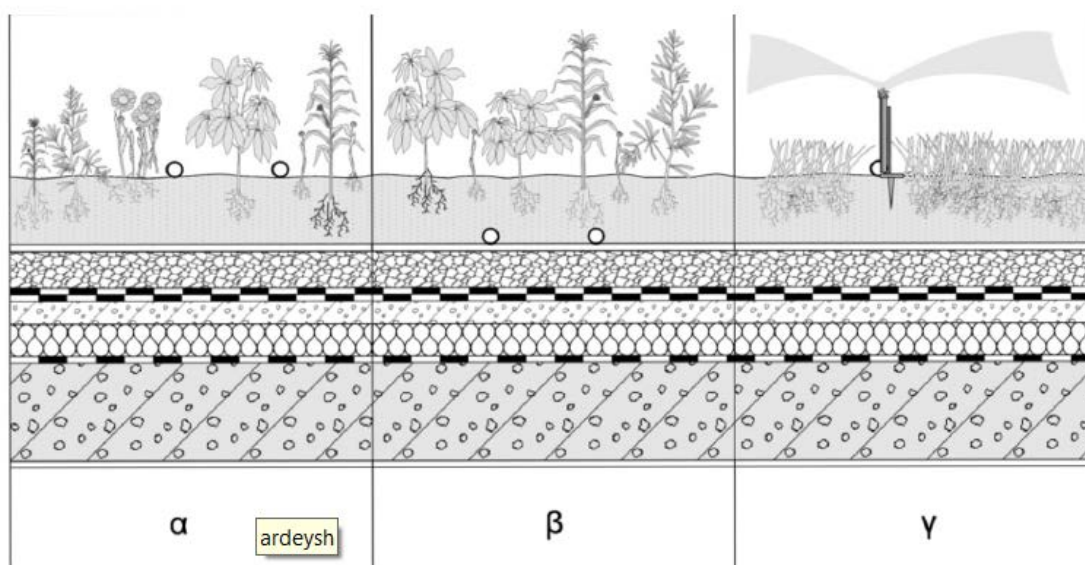
Στο υπόγειο πότισμα οι θέσεις άρδευσης και αποχέτευσης βρίσκονται σε ειδικά διαμορφωμένο φρεάτιο. Τοποθετείται ένας πλωτήρας ο οποίος φροντίζει να διατηρεί τη στάθμη στη στρώση αποστράγγισης σε σταθερό και προκαθορισμένο επίπεδο. Η

άρδευση του κήπου γίνεται με την τριχοειδή κίνηση του νερού προς τα ανώτερα στρώματα.

✓ Τεχνητή βροχή (Εικόνα 2.13γ)

Με αυτή τη μέθοδο επιτυγχάνεται ομοιόμορφο πότισμα σε μεγάλη έκταση. Τοποθετούνται εκτοξευτήρες νερού σε επιλεγμένες θέσεις.

Κατά την κατασκευή ενός δώματος απαιτείται η διαμόρφωση κλίσεων ώστε να ελαττωθεί η στασιμότητα του νερού και η ανεπιθύμητη πρόσθετη φόρτιση. Ανάλογα με την ποσότητα νερού που υπολογίζεται ότι δέχεται ένα δώμα, οι κλίσεις αυτές διαμορφώνονται στο 1,5% με 2%. Μεγάλη σημασία για την απορροή έχουν ο υπολογισμός των υδρορροών, η λειτουργικότητα της αποστράγγισης και η εξασφάλιση της απρόσκοπτης λειτουργίας των υδρορροών ώστε μην φράζονται από λάσπη και από απόθεση φύλλων ή κλαδιών.



Εικόνα 2.13: αυτόματα συστήματα ποτίσματος (α) στάγδην, (β) υπόγειο στάγδην, (γ) τεχνητή βροχή (Πηγή: Θεοδοσίου, 2008).

2.6 Διεθνής και εθνική πολιτική για την ανάπτυξη των «πράσινων» δωμάτων

2.6.1 Διεθνής πολιτική

Αρκετές χώρες του κόσμου ανάλογα με τις κλιματικές, πολιτιστικές και πολιτικές συνθήκες εφαρμόζουν τα «πράσινα» δώματα σε μεγαλύτερο ή σε μικρότερο βαθμό. Η Γερμανία είναι από τις πρώτες χώρες που προώθησε την οργανωμένη εγκατάσταση

«πράσινων» δωματίων με σκοπό να περιορίσει την απώλεια βιότοπων και φυσικών τοπίων εξαιτίας της έντονης οικοδομικής ανάπτυξης. Αντίθετα, στην Βόρεια Αμερική οι στόχοι ήταν διαφορετικοί. Τα «πράσινα» δώματα προωθήθηκαν για οικονομικούς λόγους. Αντιμετωπίστηκαν έτσι τα περιβαλλοντικά προβλήματα μέσα στις πόλεις και δεν μειώθηκε η αξία της ατομικής ιδιοκτησίας. Στην Νορβηγία οι φυτεμένες στέγες αποτελούν μέρος της κουλτούρας του λαού, ενώ στην Βρετανία τα «πράσινα» δώματα θεωρούνται ξενόφερτα και καθόλου οικεία. Στα παραδείγματα που αναφέρθηκαν παρουσιάζονται καθαρά, οι πολιτικές, πολιτιστικές και οικονομικές διαφορές τους καθώς και ο σκοπός εφαρμογής των «πράσινων» δωματίων που είναι άρρηκτα συνδεδεμένος με τις κλιματολογικές συνθήκες, αποβλέποντας άλλες φορές στην μείωση της θερμοκρασίας των πόλεων και άλλες φορές στην απορρόφηση των όμβριων υδάτων σε περισσότερο υγρά κλίματα.

Στην Ευρώπη, συγκεκριμένα στην Γερμανία, νομοθετήθηκε η ταχεία επέκταση χώρων πρασίνου στις οροφές των κτιρίων. Στόχος ήταν η συγκράτηση των όμβριων υδάτων γι' αυτό και δόθηκε έμφαση στο πάχος ανάπτυξης των φυτών. Από το 1980 στην Στουτγάρδη αναπτύχθηκε το πρόγραμμα Green Programme for Urban Renewall, το οποίο επιχορηγεί και δίνει δωρεάν τεχνικές οδηγίες για την εγκατάσταση πράσινων δωματίων. Το Βερολίνο από το 1988 έδινε οικοδομική άδεια σε κτίρια με μεγάλη κάλυψη μόνο εφόσον κατασκευάζοταν χώροι πρασίνου στην οροφή, ενώ στην Αυστρία άρχισαν από το 1983 να χρηματοδοτούν τα φυτεμένα δώματα στα κτίρια. Αντίθετα, η Βρετανία, η Ολλανδία και άλλες χώρες της βορειοδυτικής Ευρώπης δεν υιοθέτησαν παρόμοιες πολιτικές. Στην Ελβετία θεσμοτήθηκε μία θεσμική υποχρέωση από τα τέλη της δεκαετίας του '90. Στην Βρετανία τα «πράσινα» δώματα θεωρούνται πολύ νέα ιδέα και αναπτύσσονται σε λιγοστά κτίρια. Στις σκανδιναβικές χώρες η φυτεμένη στέγη αποτελεί παράδοση και σήμερα αποτελεί ένα αξιοθέατο ιστορικής σημασίας. Οι σύγχρονες «πράσινες» στέγες είναι σπάνιες.

Στη Ρωσία εκμεταλλεύονται τα «πράσινα» δώματα της Αγίας Πετρούπολης, αποκλειστικά για να παράγουν οπωροκηπευτικά μιας και υπήρχε έλλειψη τα τελευταία χρόνια. Στις χώρες τις Μεσογείου, Ελλάδα, Ισπανία, Πορτογαλία, Ιταλία η ανάπτυξη των πράσινων δωματίων είναι πολύ μικρή. Αυτό οφείλεται κυρίως στο μεσογειακό κλίμα που κατά τους θερινούς μήνες είναι πολύ ξηρό και θερμό, με ελάχιστες βροχοπτώσεις, γεγονός που ανεβάζει το κόστος συντήρησης των φυτών.

Στη Βόρεια Αμερική η εφαρμογή των «πράσινων» δωμάτων έχει επεκταθεί σε αρκετές πόλεις των ΗΠΑ, πιο συγκεκριμένα στο Σικάγο του Ιλινόις και στο Πόρτλαντ στο Όρεγκον. Το Σικάγο φιλοδοξεί να μετατραπεί στη πιο «πράσινη» πόλη των ΗΠΑ. Το κυριότερο παράδειγμα στην πόλη, αποτελεί η «πράσινη» στέγη του δημαρχείου και το πρότυπο του οποίου ακολουθούν πολλά νέα «πράσινα» δώματα της πόλης. Στο Πόρτλαντ η εφαρμογή των φυτεμένων δωμάτων εκτατικού τύπου, έχει ως σκοπό τη μείωση των όμβριων υδάτων που καταλήγουν στα ποτάμια και βλάπτουν τις ιχθυοκαλλιέργειες και την τοπική βιομηχανία. Αυτό αποτελεί κίνητρο για τους επενδυτές ώστε να αυξάνουν την επιτρεπόμενη κάλυψη του κτιρίου ανάλογα με την έκτασή του πράσινου δώματος.

Στον Καναδά, κυρίως στο Τορόντο, βρίσκεται η έδρα του οργανισμού Green Roofs for Healthy Cities που ενισχύει την κινητικότητα σχετικά με τα «πράσινα» δώματα. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί και εδώ, το δημαρχείο που διαθέτει ένα διάσημο «πράσινο» δώμα. Ακόμη υπάρχουν πολλά ερευνητικά κέντρα που μελετούν τα οικονομικά και κλιματικά οφέλη από τα «πράσινα» δώματα.

2.6.2 Εθνική πολιτική

Στην Ελλάδα, η πολιτική με αντικείμενο τα «πράσινα» δώματα εξυπηρετεί τους στόχους του ΥΠΕΧΩΔΕ για ευαισθητοποίηση της κοινής γνώμης σχετικά με τα οφέλη που απορρέουν από παρόμοιες παρεμβάσεις για την αειφόρο περιβαλλοντική, οικονομική και αισθητική αναβάθμιση των πόλεων και των μειονεκτικών περιοχών, μέσω της δημοσιοποίησης των αποτελεσμάτων για την υπάρχουσα εμπειρία, την ωφελιμότητα και τις προοπτικές από τη υιοθέτηση παρόμοιων λύσεων με έγκυρη και τεκμηριωμένη πληροφόρηση.

Στο ΦΕΚ 880 (19/8/1998), το οποίο αφορά την Κ.Υ.Α 21475/4707 για τον «περιορισμό των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα, με τον καθορισμό μέτρων και όρων για την βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων, γίνεται λόγος για το βιοκλιματικό σχεδιασμό των κτιρίων, με σκοπό την προσαρμογή του κτιρίου και του οικιστικού συνόλου στο τοπικό κλίμα και το φυσικό περιβάλλον και την αξιοποίηση θετικών περιβαλλοντικών παραμέτρων, ώστε να ελαχιστοποιούνται οι ενεργειακές τους ανάγκες όλο το χρόνο και να επιτυγχάνεται περιορισμός της κατανάλωσης συμβατικής ενέργειας. Επιπλέον, με απόφαση του Υπουργείου Περιβάλλοντος Χωροταξίας και Δημοσίων Έργων, έχει εκδοθεί ο Κανονισμός για την Ορθολογική

Χρήση και Εξοικονόμηση Ενέργειας (ΚΟΧΕΕ), που επέβαλλε την εκπόνηση σχετικών μελετών στα κτίρια.

Το Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε., προώθησε, το 1995, το Ελληνικό Πρόγραμμα για την «Κλιματική Μεταβολή» που αφορούσε σε λήψη μέτρων για την σταθεροποίηση των εκπομπών των αερίων που ευθύνονται για το φαινόμενο του θερμοκηπίου, ιδιαίτερα του διοξειδίου του άνθρακα. Παράλληλα, εξειδικεύτηκαν τα μέτρα που αφορούν στον κτιριακό τομέα, σε σχέση με την κατανάλωση ενέργειας, ώστε να περιοριστούν οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Ωστόσο, η νομοθεσία και τα κανονιστικά μέτρα που ισχύουν, παρά τις πρόσφατες σημαντικές βελτιώσεις, δεν καλύπτουν ακόμη επαρκώς το φάσμα των ελλείψεων.

Επίσης, η Διεύθυνση Οικιστικής Πολιτικής & Κατοικίας του Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε προκήρυξε Πανελλήνιο Αρχιτεκτονικό Διαγωνισμό με θέμα «Μελέτες ιδεών φύτευσης δωματίων-στεγών κατοικιών και πιλοτικές εφαρμογές». Ο διαγωνισμός εντάσσεται στο γενικότερο πλαίσιο εναρμόνισης την κοινοτικής οδηγίας 2002/91/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και Συμβουλίου της Ευρωπαϊκής Ένωσης στο Εθνικό Δίκαιο. Η προκήρυξη έχει σκοπό, μέσω της βράβευσης, την ανάδειξη καλών πρακτικών, την επίτευξη ειδικών στόχων όπως εξοικονόμηση ενέργειας, τον περιορισμό των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα, την βελτίωση της εικόνας του αστικού τοπίου, κ.λπ.

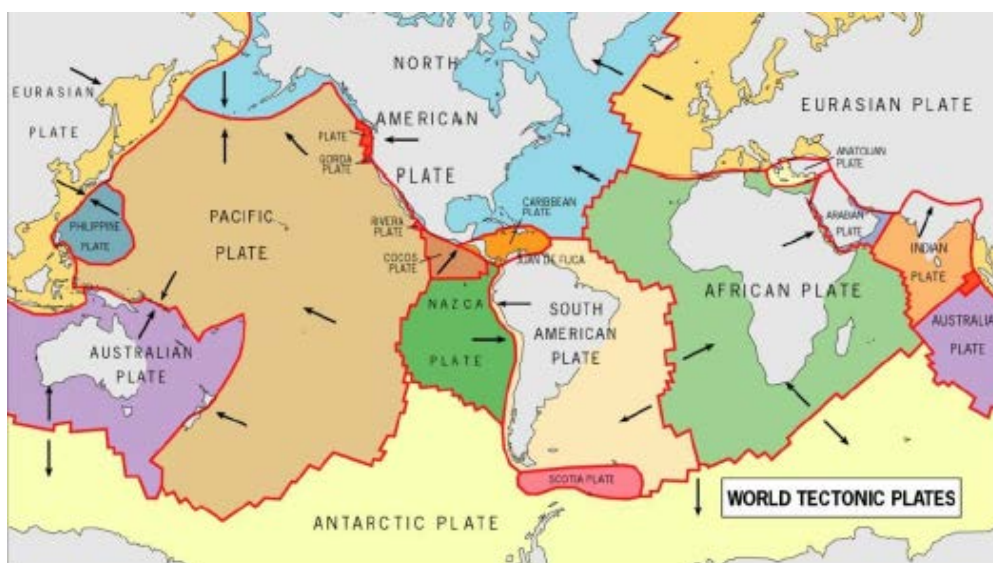
Στη Θεσσαλονίκη έγινε προσπάθεια από την Διεύθυνση Πρασίνου του Δήμου, για εναλλακτικές προτάσεις εγκατάστασης πρασίνου. Η υπηρεσία το 1994 κυκλοφόρησε ένα φυλλάδιο για το πρόγραμμα με τίτλο «Πράσινη Στέγη στην Θεσσαλονίκη» όπου προβάλλονταν η ανάγκη ενεργοποίησης των δημοτών στην διαμόρφωση κήπων οροφής στα δώματα των πολυκατοικιών με στόχο την αισθητική και περιβαλλοντική αναβάθμιση της πόλης. Παρουσίαζε τεχνικές και κατασκευαστικές οδηγίες που θα μπορούσαν να εφαρμοστούν από τους ενοίκους και λεπτομέρειες σχετικά με κατάλληλα είδη φυτών σύμφωνα με τις κλιματολογικές συνθήκες της περιοχής. Οι ιδιωτικοί μηχανισμοί δεν κατάφεραν να ανταποκριθούν στα νέα δεδομένα και γι' αυτό αναζητήθηκαν άλλες διέξοδοι με ανάληψη πρωτοβουλιών από το δήμο, που να αντιμετωπίζουν την αστική κατοικία ως συλλογικό αγαθό αναλαμβάνοντας μέρος του κόστους.

Κεφάλαιο 3^ο

Αντισεισμικός Σχεδιασμός Κτιριακών Κατασκευών

3.1 Σεισμικός κίνδυνος

Με τον όρο σεισμός χαρακτηρίζεται το φυσικό φαινόμενο της εδαφικής δόνησης που γεννιέται κατά την διατάραξη της μηχανικής ισορροπίας των πετρωμάτων που βρίσκονται στο εσωτερικό της Γης. Η διατάραξη της μηχανικής ισορροπίας προκαλείται από την ενέργεια που απελευθερώνεται σε μορφή σεισμικών κυμάτων και διαδίδεται προς όλες τις διευθύνσεις από την πηγή (εστία). Τα κύματα αυτά έχουν ως αποτέλεσμα να προκαλούν ανατάραξη του ανώτερου φλοιού της Γης, όπου γίνεται αντιληπτό και από τον άνθρωπο, ιδιαίτερα σε μεγάλους σεισμούς. Επίσης σε περίπτωση που ο σεισμός είναι υποθαλάσσιος εκδηλώνεται με την δημιουργία τσουνάμι (θαλάσσια κύματα βαρύτητας), που οφείλεται στην κατακόρυφη μετακίνηση του βυθού. Οι σεισμοί διακρίνονται σε τεκτονικούς, ηφαιστειακούς, εγκατακρημνισιγενείς, κρυογενείς και τεχνητούς.



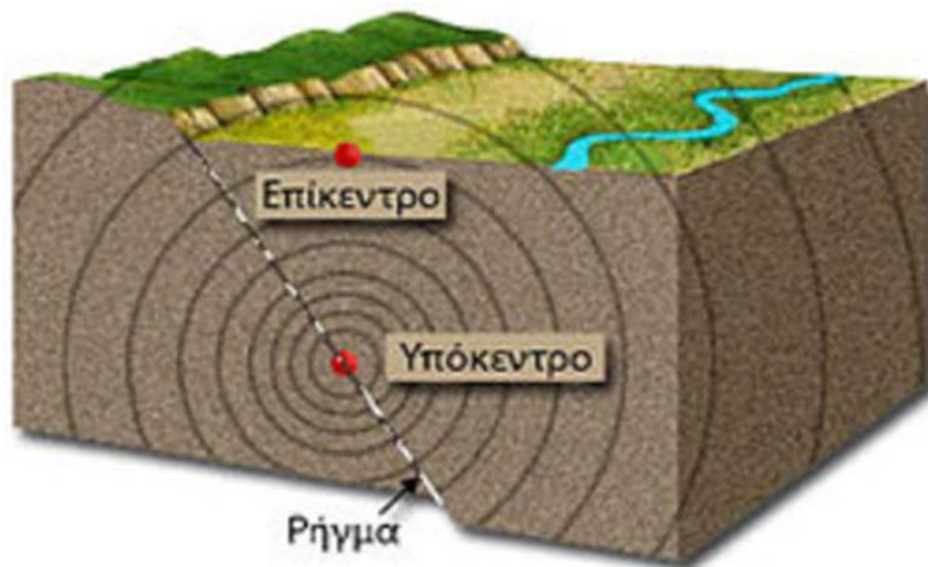
Εικόνα 3.1: Τεκτονικές πλάκες.

Με την βοήθεια των επιστημών της σεισμολογίας και της τεχνικής σεισμολογίας παρέχεται η δυνατότητα να μελετηθεί και να αναλυθεί ένας σεισμός. Όσον αφορά στην πρώτη επιστήμη ασχολείται με την διάδοση της σεισμικής ενέργειας διαμέσου του φλοιού της Γης και η δεύτερη με την επίλυση τεχνικών προβλημάτων που έχουν σχέση με τον σεισμό.

3.1.1.Κατηγοριοποίηση σεισμών ανάλογα με το βάθος

Η ακριβής θέση στο εσωτερικό της Γης, όπου ξεκινάει ο σεισμός ονομάζεται εστία ή υπόκεντρο. Η προβολή του υποκέντρου στην επιφάνεια της Γης ονομάζεται επίκεντρο και η απόσταση ανάμεσα στα δυο σημεία είναι το εστιακό βάθος του σεισμού. Με βάση το εστιακό βάθος τους οι σεισμοί διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες, οι οποίες είναι :

- Επιφανειακοί σεισμοί, με εστιακό βάθος μικρότερο των 70km.
- Ενδιάμεσοι, με εστιακό βάθος 70-300km.
- Μεγάλου βάθους, με εστιακό βάθος 300-700 km.



Εικόνα 3.2: Απεικόνιση επικέντρου και υποκέντρου ενός σεισμού.

Το εστιακό βάθος αποτελεί σημαντικό χαρακτηριστικό ενός σεισμού, ως προς τις καταστροφές που μπορεί να προκαλέσει στις κατασκευές. Συνήθως, ένας επιφανειακός σεισμός είναι πιο καταστρεπτικός από έναν ενδιάμεσου βάθους. Αυτό

προκύπτει εξαιτίας του ότι όσο αυξάνεται το βάθος, αυξάνεται και η απόσταση μεταξύ της εστίας και της επιφάνειας της Γης, προκαλώντας εξασθένηση στα σεισμικά κύματα. Επιπροσθέτως, η διασπορά των σεισμικών κυμάτων είναι μεγαλύτερη, όμως γενικά, η επίδραση των εδαφικών συνθηκών έχει σημαντικότερο ρόλο.

Η συντριπτική πλειοψηφία (περίπου 90%) των καταγεγραμμένων σεισμικών φαινομένων βρίσκεται σε εστιακό βάθος μικρότερο των 100km, με τους ισχυρότερους εξ αυτών να ανιχνεύονται σε εστιακό βάθος μικρότερο των 60km. Επίσης, καθ' όλη την διάρκεια της ιστορίας δεν έχουν καταγραφεί σεισμικές δονήσεις σε εστιακό βάθος μεγαλύτερο των 700km.

3.1.2 Κλίμακες μέτρησης των σεισμών

Κλίμακα ρίχτερ (Richter): η κλίμακα Richter είναι μια λογαριθμική κλίμακα. Μ' αυτήν μετράται το μέγεθος ενός σεισμού στην εστία του. Στην κλίμακα αυτή μετράται η ενέργεια που εκλύεται στον εστιακό χώρο από την θραύση και την ολίσθηση των πετρωμάτων. Ενώ, η κλίμακα Richter δεν έχει κάποιο ανώτατο όριο, δεν έχουν παρατηρηθεί σεισμοί πάνω από 9,5 ρίχτερ.

Κλίμακα Μερκάλλι (Mercalli): η κλίμακα Mercalli μετρά την ένταση ενός σεισμού, σε μια περιοχή που βρίσκεται στην επιφάνεια του φλοιού της Γης. Η κλίμακα αυτή είναι μια από τις εμπειρικές κλίμακες που έχουν προκύψει κι έχει στόχο να εκτιμήσει τις επιπτώσεις του σεισμού στις κατασκευές. Είναι μια δωδεκαβάθμια κλίμακα και προσμετρά κυρίως καταστροφές που προκαλούνται σε ανθρώπινες κατασκευές. Βασικό μειονέκτημα την κλίμακα Mercalli είναι ότι σε περίπτωση που ένας σεισμός έχει πλήξει μια ακατοίκητη περιοχή, δεν είναι δυνατό να αξιολογηθεί επαρκώς με την κλίμακα αυτή.

3.2 Σεισμικά κύματα

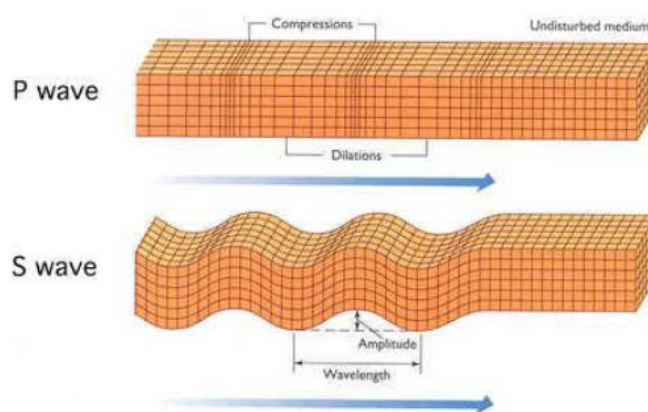
Η ενέργεια που παράγεται κατά την εκδήλωση ενός σεισμού διαδίδεται με τα σεισμικά κύματα. Τα σεισμικά κύματα κατηγοριοποιούνται σύμφωνα με τον τρόπο που διαδίδονται. Αυτό εξαρτάται από το μέσο διάδοσης, από το είδος της ταλάντωσης που προκαλούν και το μήκος κύματός τους. Εξαιτίας της θραύσης των πετρωμάτων παράγονται διαφόρων ειδών ταλαντώσεις. Από την αρχή της διάδοσης

των κυμάτων, φιλτράρονται οι συχνότητες τους, κι έτσι στα πρώτα κιόλας χιλιόμετρα έχει πραγματοποιηθεί ο διαχωρισμός τους βάσει των διαφορετικών τρόπων ταλάντωσής τους. Οι δύο κύριοι τύποι κυμάτων είναι τα κύματα *χώρου* και τα *επιφανειακά* κύματα.

3.2.1 Κύματα χώρου

Τα κύματα χώρου διαδίδονται προς όλες τις διευθύνσεις στο εσωτερικό της Γης και είναι τα πρώτα κύματα που φθάνουν σε ένα σεισμολογικό σταθμό, από το σημείο της εστίας του σεισμού. Υπάρχουν δυο κατηγορίες κυμάτων χώρου, τα επιμήκη και τα εγκάρσια:

- **P-Κύματα** :Είναι διαμήκη κύματα πίεσης και ονομάζονται πρωτεύοντα κύματα καθώς είναι τα πρώτα που φθάνουν και καταγράφονται στους σεισμολογικούς σταθμούς. Τα P-κύματα μπορούν να κινηθούν μέσω των συμπαγών πετρωμάτων της Γης αλλά και των υγρών, όπως το νερό ή τα υγρά στρώματα της Γης. Ταλαντώνουν το μέσο από το οποίο διέρχονται, παράλληλα στην διεύθυνση διάδοσής τους, προκαλώντας συμπίεσεις και αραιώσεις στα υλικά σημεία του μέσου διάδοσης. Τα πρωτεύοντα κύματα διαδίδονται σε όλα τα στρώματα της Γης, από το φλοιό έως και τον πυρήνα. Επίσης, έχουν την μεγαλύτερη ταχύτητα από τα υπόλοιπα είδη σεισμικών κυμάτων.
- **S-Κύματα**: είναι εγκάρσια κύματα κι ονομάζονται δευτερεύοντα καθώς φθάνουν μετά τα P στους σειсмоγράφους. Διαδίδονται με ταλαντώσεις των υλικών, κάθετα στην διεύθυνση του κύματος, προκαλώντας διάτμηση του υλικού της Γης μέσω του οποίου περνούν και προξενούν καταστροφική κίνηση του εδάφους. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να είναι αρκετά καταστρεπτικά, για τις κατασκευές. Εξαιτίας του ότι τα υγρά δεν επιδέχονται διατμητικές τάσεις, τα εγκάρσια κύματα δεν διαδίδονται σε υγρά μέσα αλλά μόνο σε στερεά. Οπότε, τα S-κύματα διαδίδονται από την λιθόσφαιρα ως το κάτω μέρος του μανδύα, αλλά σταματούν φθάνοντας στην ασυνέχεια Gutenberg μεταξύ πυρήνα και μανδύα.

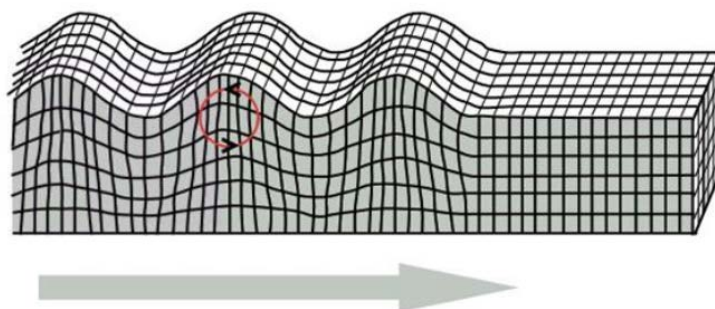


Εικόνα 3.3: P και S χωρικά σεισμικά κύματα.

3.2.2 Επιφανειακά κύματα

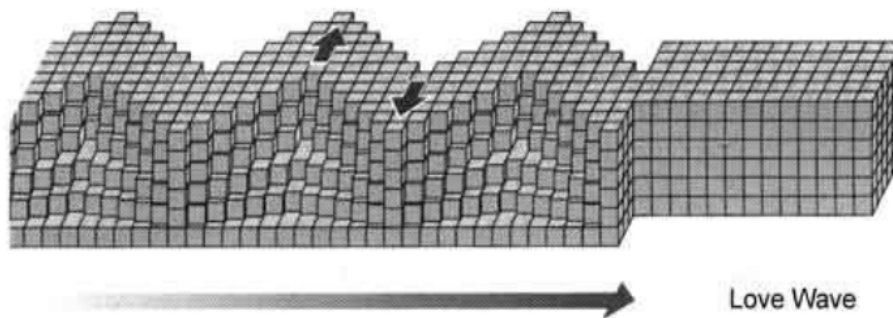
Επιφανειακά κύματα είναι τα κύματα που ταξιδεύουν κάτω από και κατά μήκος της επιφάνειας του εδάφους. Τα πλάτη τους είναι μεγάλα κοντά στην επιφάνεια της γης κι ελαττώνονται όσο αυξάνεται το βάθος. Λόγω της μικρής συχνότητας, του αυξημένου πλάτους και της μεγάλης διάρκειάς τους είναι ιδιαίτερος καταστροφικά. Επίσης, τα κύματα αυτά έχουν μικρότερη ταχύτητα διάδοσης από τα κύματα χώρου. Διακρίνονται σε δύο τύπους, στα κύματα Rayleigh και Love:

- **Κύματα Rayleigh:** τα κύματα Rayleigh είναι τα πιο αργά όλων των τύπων σεισμικών κυμάτων και με κάποιους τρόπους τα πιο περίπλοκα. Τα κύματα Rayleigh μετακινούν το έδαφος με τον ίδιο τρόπο όπως ένα θαλάσσιο κύμα μετακινεί τα επιφανειακά νερά. Επειδή κυλά, κινεί το έδαφος πάνω-κάτω, δεξιά και αριστερά στην ίδια κατεύθυνση που κινείται το κύμα. Το μεγαλύτερο μέρος του «τινάγματος» που γίνεται αισθητό από έναν σεισμό, οφείλεται στα κύματα Rayleigh, τα οποία μπορεί να είναι πολύ μεγαλύτερα από τους άλλους τύπους σεισμικών κυμάτων.



Εικόνα 3.4: Κύματα Rayleigh.

- **Κύματα Love:** ο πρώτος τύπος (βάσει ταχύτητας διάδοσης) επιφανειακών κυμάτων ονομάζεται Love Wave (L). Αν κι είναι αρκετά πιο αργά από τα κύματα χώρου, είναι τα ταχύτερα από τα επιφανειακά κύματα. Κατά την διάδοσή τους, τα υλικά σημεία του μέσου κινούνται με οριζόντιες ταλαντώσεις κάθετες στην διεύθυνση διάδοσης. Επομένως, πρόκειται για κύματα οριζοντίως πολωμένα. Επειδή, δεν διαθέτουν κατακόρυφη συνιστώσα αναγράφονται μόνο από τους οριζόντιους σειсмоγράφους.



Εικόνα 3.5: Κύματα Love.

3.3 Εδαφική σεισμική κίνηση

Σε κάθε σεισμικό φαινόμενο απελευθερώνεται κατά την διάρρηξη των πετρωμάτων σεισμική ενέργεια, η οποία διαχέεται με την μορφή σεισμικών κυμάτων. Σε μια συγκεκριμένη θέση η καταγεγραμμένη εδαφική κίνηση δεν εξαρτάται αποκλειστικά και μόνο από το μέγεθος του σεισμού και την διάρρηξη του σεισμικού ρήγματος, αλλά κι από την διαδρομή των σεισμικών κυμάτων διαμέσου των πετρωμάτων και τις τοπικές εδαφολογικές συνθήκες. Θεωρώντας ως (E) την επιρροή των τοπικών εδαφικών συνθηκών, (Δ) την επιρροή της διαδρομής των σεισμικών κυμάτων από την πηγή έως την θέση παρατήρησης και (Π) την επιρροή της πηγής, η τελική εδαφική κίνηση (EK) προκύπτει από την παρακάτω σχέση:

$$(EK) = (E) * (\Delta) * (\Pi) \quad (3.1)$$

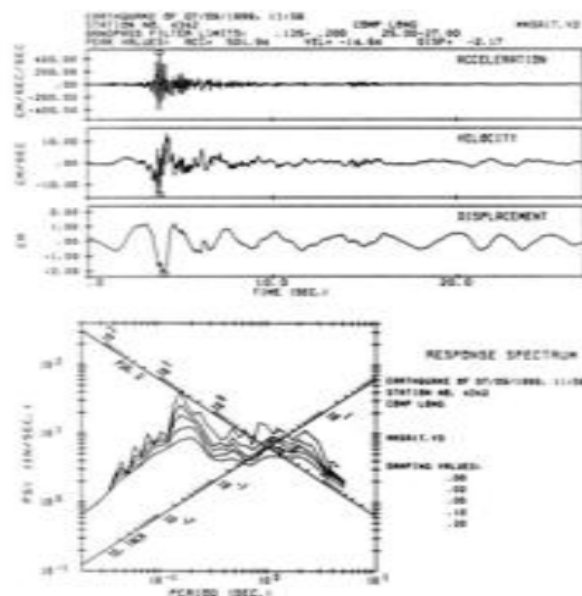
Όταν μελετάμε μια διαφορετική θέση, ακόμη και σε μικρή απόσταση, η εδαφική κίνηση μπορεί να αλλάξει σημαντικά, είτε λόγω των διαφορετικών εδαφολογικών συνθηκών είτε εξαιτίας της διαφορετικής ακτινοβολίας της σεισμικής ενέργειας (που εξαρτάται από το μηχανισμό διάρρηξης) είτε λόγω του συνδυασμού των παραπάνω παραμέτρων. Η ολοκληρωμένη αποτύπωση της κίνησης του εδαφικού

υλικού σημείου περιγράφεται με τις τρεις μεταθετικές συνιστώσες κίνησης του πεδίου του χρόνου, δυο οριζόντιες και μια κατακόρυφη.

Σε μια τυπική χρονοϊστορία επιταχύνσεων, μια εκ των τριών συνιστωσών μας παρέχει μεγάλο όγκο πληροφοριών. Πλέον, οι σύγχρονοι ψηφιακοί επιταχυνσιογράφοι μπορούν να καταγράψουν χιλιάδες τιμές για επιταχύνσεις σε χρονικά διαστήματα δεκάτων ή και εκατοστών του δευτερολέπτου. Το τυπικό επιταχυνσιογράφημα ισχυρής διάρκειας 20s, μας δίνει 1000 τιμές επιτάχυνσης με χρονικό βήμα 0.02s. Παράδειγμα αποτελεί ο σεισμός που συνέβη το 1985 στο Μεξικό, ο οποίος διήρκεσε 2 λεπτά και περιείχε 6000 τιμές, για σταθερό χρονικό διάστημα. Οι μεγάλοι όγκοι πληροφοριές που προέκυψαν, δεν έχουν συνήθως εφαρμογή σε συνηθισμένα έργα, όπου δεν πραγματοποιείται δυναμική ανάλυση εν χρόνω ολοκλήρωσης. Ένας μηχανικός κατά κύριο λόγο δίνει περισσότερη προσοχή στις παρακάτω βασικές παραμέτρους μιας ισχυρής εδαφικής κίνησης:

- στο μέγιστο πλάτος της εδαφικής κίνησης,
- στο συχνοτικό περιεχόμενό της (που επηρεάζει τη μορφή των φασμάτων απόκρισης),
- στη διάρκεια της δόνησης κ.λπ.

Για την ολοκληρωμένη και ορθή περιγραφή της ισχυρής εδαφικής κίνησης, ο μηχανικός θα πρέπει να εξετάσει τις παραπάνω παραμέτρους.



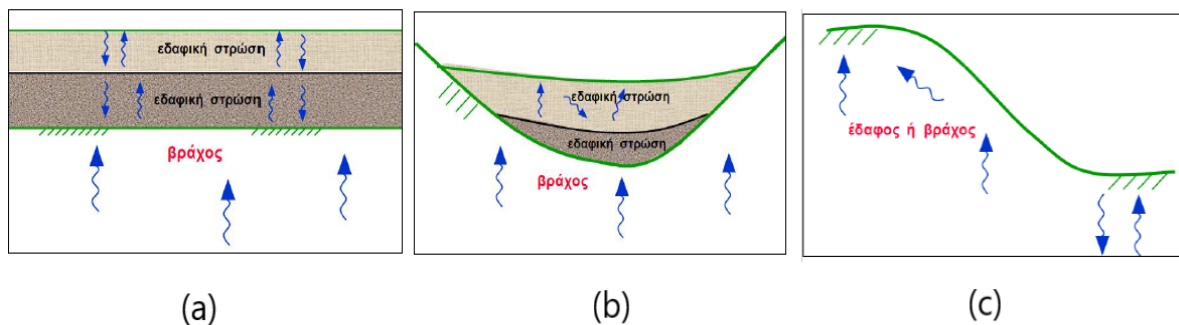
Εικόνα 3.6: Χρονοϊστορίες και φάσματα μετακινήσεων ταχυτήτων και επιταχύνσεων σεισμικής καταγραφής.

3.3.1 Τοπικές εδαφικές συνθήκες

Οι τοπικές εδαφολογικές συνθήκες αποτελούν σημαντική παράμετρο και μπορούν να μεταβάλλουν σημαντικά την επιφανειακή κίνηση του εδάφους, με τους εξής τρόπους:

1. την ενίσχυση της εδαφικής κίνησης (ανάλογα με τις μέγιστες τιμές των χρονοϊστοριών της)
2. την επιμήκυνση της διάρκειας της,
3. την αλλαγής του συχνοτικού της περιεχομένου
4. τη χωρική μεταβλητότητα της εδαφικής απόκρισης (κρίσιμη για κατασκευές που εκτείνονται σε μεγάλες αποστάσεις, π.χ. αγωγοί, οδικά δίκτυα κ.λπ.)

Γενικά, οι τοπικές εδαφικές συνθήκες διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες, όπως φαίνονται και στην Εικόνα 3.7:

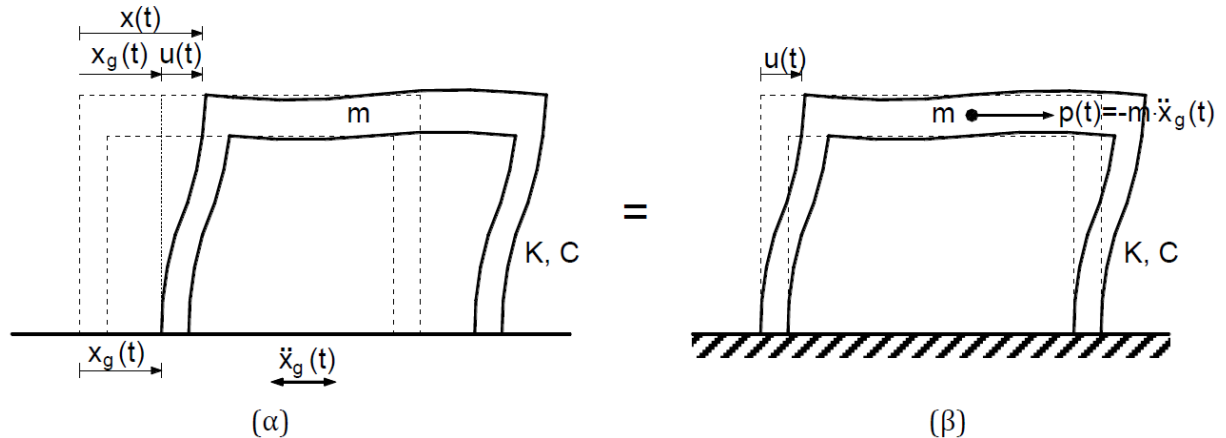


Εικόνα 3.7: (α) στρωματογραφικές, (β) γεωμορφολογικές και (γ) τοπογραφικές συνθήκες (Πηγή: Ψαρρόπουλος & Τσομπανάκης, 2005).

3.3.2 Δυναμική εξίσωση κίνησης

Κατά τη διάρκεια ενός σεισμού, το έδαφος κι η βάση μιας κατασκευής που είναι θεμελιωμένη πάνω σε αυτό, κινείται γρήγορα, με εναλλασσόμενο πρόσημο, γύρω από την αρχική θέση ηρεμίας. Το μέγεθος που μας ενδιαφέρει σε αυτή την κίνηση της βάσης είναι η επιτάχυνση, $\ddot{x}_g(t)$. Η μάζα της κατασκευής, λόγω της αδράνειάς της, δεν ακολουθεί την κίνηση της βάσης αλλά κινείται με διαφορετικό τρόπο κάνοντας μια δική της ταλάντωση. Η διαφορετική αυτή κίνηση μάζας και βάσης, προκαλεί παραμόρφωση κι ένταση στην κατασκευή:

$$p(t) = -m \cdot \ddot{x}_g(t) \quad (3.2)$$



Εικόνα 3.8: Παραμόρφωση της κατασκευής κατά της διάρκεια σεισμικής καταπόνησης.

Η μετακίνηση του εδάφους συμβολίζεται με $x_g(t)$ και η σχετική μετακίνηση της μάζας ως προς την βάση με $u(t)$. Η συνολική μετακίνηση την χρονική στιγμή t , μετρούμενη από την αρχική θέση της κατασκευής είναι $x(t) = x_g(t) + u(t)$.

Εξαιτίας του φορτίου $p(t)$, η κατασκευή παραμορφώνεται και αναπτύσσονται εσωτερικές δυνάμεις επαναφοράς, που τείνουν να επαναφέρουν την κατασκευή στην αρχική θέση ισορροπίας. Το μέγεθος αυτών των δυνάμεων είναι ανάλογο της δυσκαμψίας K και της απόσβεσης C της κατασκευής.

Η *δυσκαμψία* της κατασκευής δηλώνει το μέγεθος της αντίστασης που παρουσιάζει στην παραμόρφωσή της. Εάν K είναι η συνολική δυσκαμψία της κατασκευής, η δύναμη επαναφοράς $f_s(t)$ που αναπτύσσεται για την σχετική μετακίνηση της μάζας ως προς τη βάση $u(t)$, δίνεται από τη σχέση:

$$f_s(t) = K \cdot u(t) \quad (3.3)$$

Όλες οι κατασκευές κατά την ταλάντωσή τους παρουσιάζουν *απόσβεση*, δηλαδή απορρόφηση ενέργειας. Η απόσβεση παρατηρείται και σε ιδανικά υλικά και οφείλεται στην εσωτερική τριβή που αναπτύσσεται κατά την παραμόρφωση. Σε πραγματικές κατασκευές οφείλεται επιπρόσθετα και σε άλλους παράγοντες, όπως στην τριβή που αναπτύσσεται στους κόμβους μεταλλικών κατασκευών, στην ανελαστική παραμόρφωση των μη-φερόντων στοιχείων (π.χ. τοιχοποιίες) κ.λπ. Η μαθηματική προσομοίωση της απόσβεσης δίδεται από την εξίσωση:

$$f_d(t) = C \cdot \dot{u}(t) \quad (3.4)$$

Στην πράξη δεν είναι εύκολο να υπολογιστεί ο συντελεστής C , γι' αυτό χρησιμοποιείται ο συντελεστής απόσβεσης ζ , ο οποίος εκφράζει την απόσβεση ως

ποσοστό της κρίσιμης απόσβεσης. Εφαρμόζοντας τον 2^ο νόμο του Νεύτωνα στην οριζόντια διεύθυνση:

$$p - f_s - f_d = m \ddot{u}$$

και αντικαθιστώντας προκύπτει:

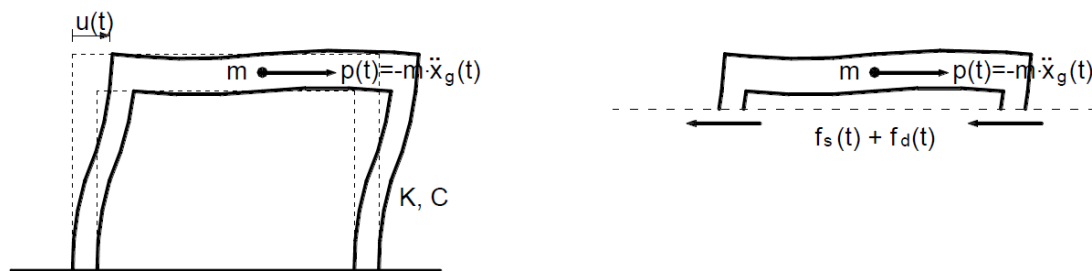
$$m \ddot{u} + K \cdot u(t) + C \cdot \dot{u}(t) = -m \cdot \ddot{x}_g(t) \quad (3.5)$$

διαιρώντας με τη μάζα m:

$$\ddot{u} + 2\zeta\omega\dot{u} + \omega^2 u = -\ddot{x}_g \quad (3.6)$$

όπου ω είναι η ιδιοσυχνότητα της κατασκευής που ορίζεται από την σχέση (3.7):

$$\omega = \sqrt{\frac{K}{m}} \quad (3.7)$$



Εικόνα 3.9 : οριζόντιες δυνάμεις στην μάζα της κατασκευής.

Ο συντελεστής απόσβεσης ζ ορίζεται από τη σχέση:

$$\zeta = \frac{C}{2\sqrt{mK}} \quad (3.8)$$

Η ιδιοπερίοδος του ταλαντωτή σχετίζεται με την ιδιοσυχνότητα μέσω της σχέσης:

$$T = 2\pi/\omega$$

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{K}}$$

Η δυναμική φόρτιση του απλού συστήματος είναι η επιτάχυνση του εδάφους. Γνωρίζοντας την $x(\ddot{t})$, η επίλυση της εξίσωσης (3.5) θα μας δώσει την απόκριση της κατασκευής, καθώς κι όλα τα απαιτούμενα εντατικά μεγέθη για τον αντισεισμικό σχεδιασμό.

3.3.3 Πλάτος εδαφικής κίνησης

Μια ισχυρή εδαφική κίνηση παρουσιάζεται σε μια χρονοϊστορία μιας μεταβλητής, όπως είναι η επιτάχυνση, η ταχύτητα κι η μετακίνηση. Όταν γνωρίζουμε μία εκ των τριών μεταβλητών, τότε ολοκληρώνοντας ή παραγωγίζοντας είναι εύκολο να υπολογίσουμε τις άλλες δύο. Οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται ως επί το πλείστον, βασίζονται στην μέθοδο Newmark. Το πλάτος της εδαφικής κίνησης μεταβάλλεται χρονικά κι ισχύουν οι παρακάτω σχέσεις:

$$u(\omega) = u(\dot{\omega})/\omega = \frac{u(\ddot{\omega})}{\omega^2}$$

όπου (ω) η συχνότητα. Συνήθως, η μετακίνηση είναι μια κίνηση χαμηλής συχνότητας, σε αντίθεση με την επιτάχυνση, που επικρατούν υψηλές συχνότητες.

3.3.3.1 Μέγιστη εδαφική επιτάχυνση

Η μέγιστη οριζόντια εδαφική επιτάχυνση (PHA ή a_{\max}) είναι η πλέον χρησιμοποιούμενη παράμετρος περιγραφής του σεισμικού κραδασμού. Κατά κύριο λόγο, αναφέρεται στην μέγιστη τιμή των 2 οριζόντιων συνιστωσών και σε μερικές περιπτώσεις και στο διανυσματικό τους άθροισμα. Η οριζόντια συνιστώσα χρησιμοποιείται ευρέως εξαιτίας της άμεσης σύνδεσής της με τις αδρανειακές δυνάμεις, οι οποίες φορτίζουν μια συνηθισμένη κτιριακή κατασκευή.

Η κατακόρυφη εδαφική επιτάχυνση δεν χρησιμοποιείται τόσο πολύ από τους σεισμολόγους και τους μηχανικούς, γιατί ίσως θεωρείται ότι η κατακόρυφη ταλάντωση είναι λιγότερο επικίνδυνη καθώς το μεγαλύτερο ποσοστό των κατασκευών είναι σχεδιασμένο με μεγάλους συντελεστές ασφαλείας, ως προς τα κατακόρυφα στατικά φορτία. Ωστόσο, οι σύγχρονες κατασκευές εξαιτίας των μεγάλων προβόλων, τοίχων βαρύτητας κ.λπ. είναι ιδιαίτερα ευαίσθητες στην συνδυασμένη δράση των οριζόντιων φορτίων και ισχυρών κατακόρυφων ταλαντώσεων. Επομένως, η κατακόρυφη εδαφική επιτάχυνση έχει δύο γνωρίσματα με σημαντικό ενδιαφέρον:

- i. αφορά κυρίως τις κατασκευές ή τμήματά τους, με μικρή περίοδο, γιατί συνήθως είναι μια ταλάντωση υψηλών συχνοτήτων,
- ii. δεν είναι εύκολο να αποτιμηθεί η επίδραση της μη γραμμικής συμπεριφοράς των εδαφών, για μεγάλες σεισμικές εντάσεις. Συνεπώς, ακόμη κι όταν είναι σημαντικές οι διατμητικές παραμορφώσεις του εδάφους, η μεγέθυνση της κατακόρυφης εδαφικής κίνησης από το βραχώδες υπόβαθρο έως την επιφάνεια, εξαρτάται από τις ελαστικές ιδιότητες του εδαφικού υλικού και του υποβάθρου.

Οι σεισμοί με υψηλές τιμές εδαφικών επιταχύνσεων, δεν αποτελούν πάντα κίνδυνο για τις κατασκευές, διότι υπάρχουν πολλές επιπλέον παράμετροι που επηρεάζουν τα χαρακτηριστικά και μετέπειτα τις επιπτώσεις τους.

3.3.3.2 Μέγιστη εδαφική ταχύτητα

Η μέγιστη εδαφική ταχύτητα (PHV ή v_{max}) αποτελεί μια επιπλέον σημαντική παράμετρο που περιγράφει την ισχυρή εδαφική κίνηση, γιατί είναι λιγότερο ευαίσθητη στις υψίσυχνες συνιστώσες της δόνησης. Χρησιμοποιείται περισσότερο για να χαρακτηρίσει σεισμικές κινήσεις μεσαίων συχνοτήτων, οι οποίες είναι ικανές να προκαλέσουν βλάβες ή αστοχίες στις κατασκευές με μεγάλες ιδιοπεριόδους, όπως γέφυρες, εύκαμπτα πολυώροφα κτίρια, κ.α.

Η μέγιστη ταχύτητα σε σχέση με την μέγιστη επιτάχυνση αναφέρονται σε διαφορετικές συχνότητες. Ο λόγος v_{max} / a_{max} αποτελεί έναν δείκτη του συχνοτικού περιεχομένου της εδαφικής κίνησης, εφόσον για μια απλή αρμονική κίνηση με περίοδο T ισχύει $v_{max} / a_{max} = T/2\pi$. Η ποσότητα $2\pi * (v_{max} / a_{max})$ μπορεί να θεωρηθεί ότι εκφράζει κατά ένα μέρος την περίοδο της ταλάντωσης ενός ισοδύναμου αρμονικού κύματος και κατ' επέκταση αποτελεί ένα δείκτη της δεσπόζουσας περιόδου της δόνησης. Ανάλογα με τον τύπο εδάφους ο λόγος v_{max} / a_{max} διαμορφώνεται όπως φαίνεται στον Πίνακα 3.1.

Τύπος εδάφους	v_{max} / a_{max}
Βράχος	55cm/s/g =0,056s
Σκληρά εδάφη Πάχος στρώσης <30m	110cm/s/g =0,112s
Σκληρά εδάφη Πάχος στρώσης >30m	135cm/s/g =0,138s

Πίνακας 3.1: Λόγος v_{max}/a_{max} για διάφορες κατηγορίες εδαφών.

Για μαλακά ή χαλαρά εδάφη δεν υπάρχουν τιμές, γιατί σε αυτές τις περιπτώσεις η επιρροή των τοπικών εδαφικών συνθηκών (μη-γραμμικά φαινόμενα, ρευστοποίηση, κ.α.) διαφοροποιεί την εδαφική επιτάχυνση. Συνεπώς και τον λόγο v_{\max} / a_{\max} .

3.3.3.3 Μέγιστη εδαφική κίνηση

Οι μέγιστες εδαφικές μετακινήσεις (PGD ή d_{\max}) χρησιμοποιούνται σε χαμηλές συχνότητες της σεισμικής κίνησης. Ο υπολογισμός τους πραγματοποιείται με διπλή ολοκλήρωση του επιταχυνσιογραφήματος, όμως είναι μια αρκετά δύσκολη μέθοδος εξαιτίας των αναπόφευκτων αριθμητικών λαθών στην επεξεργασία του σήματος και στην ολοκλήρωση καθώς και στην ύπαρξη θορύβων χαμηλών συχνοτήτων. Για τον λόγο αυτό, η μέγιστη εδαφική μετακίνηση έχει σχετικά περιορισμένη χρήση, αλλά και γενικότερα οι χρονοϊστορίες μετακινήσεων.

Όπως είναι αναμενόμενο οι μέγιστες εδαφικές μετακινήσεις εξαρτώνται από όλους τους παράγοντες που επηρεάζουν την σεισμική κίνηση. Το μέγεθος, η επίκεντρη απόσταση και η δυσκαμψία του εδάφους επηρεάζουν την μέγιστη εδαφική μετακίνηση. Οι τιμές της κυμαίνονται από μερικά εκατοστά έως και αρκετές δεκάδες εκατοστών.

3.4 Σεισμική επικινδυνότητα στον ελλαδικό χώρο

Είναι γνωστό ότι ο σεισμός αποτελεί ένα φαινόμενο που είναι ικανό να επιφέρει απώλειες τόσο στον άνθρωπο όσο και στις κατασκευές. Οι περισσότεροι σεισμοί οφείλονται στις κινήσεις των λιθοσφαιρικών πλακών, και κατά συνέπεια οι ζώνες έντονης σεισμικής δράσης ουσιαστικά ταυτίζονται με τις παρυφές των πλακών. Η έννοια της σεισμικής επικινδυνότητας μιας θέσης ορίζεται δίνοντας στοιχεία που μπορούν να βοηθήσουν στον κατάλληλο σχεδιασμό, με σκοπό τον περιορισμό του σεισμικού κινδύνου.

Οι κυριότερες πηγές σεισμικής επικινδυνότητας είναι η κίνηση του εδάφους, η ρευστοποίηση εδαφών, οι κατολισθήσεις, οι πυρκαγιές και τα tsunamis. Συνήθως, η σεισμική επικινδυνότητα σε μια περιοχή εκφράζεται ποσοτικά είτε με την πιθανότητα να παρατηρηθεί στη περιοχή αυτή σεισμική επιτάχυνση έντασης I μεγαλύτερη ορισμένης τιμής μέσα σε ορισμένο χρόνο είτε με τιμή επιταχύνσεως A ή εντάσεως I ,

για την οποία η πιθανότητα να υπάρξει υπέρβαση της τιμής της σε ορισμένο χρονικό διάστημα είναι κάτω ορισμένου ορίου.

Γενικότερα, η σεισμική επικυδινότητα, ορίζεται με την μέγιστη αναμενόμενη τιμή μιας σεισμικής παραμέτρου, για δεδομένη περίοδο επανάληψης ή για συγκεκριμένη πιθανότητα μη υπέρβασης σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Οι σεισμικές παράμετροι, που χρησιμοποιούνται είναι η μέγιστη αναμενόμενη ένταση, το μέγιστο αναμενόμενο μέγεθος, οι μέγιστες αναμενόμενες τιμές των εδαφικών παραμέτρων (a , v , d) και το συχνотικό περιεχόμενο της αναμενόμενης εδαφικής κίνησης.

Οι τιμές των εδαφικών παραμέτρων σε περιπτώσεις ισχυρής σεισμικής κίνησης εξαρτώνται άμεσα από το τύπο του εδάφους. Συγκεκριμένα, από χρονοσειρές επιτάχυνσης, ταχύτητας, μετάθεσης που μετρήθηκαν από όργανα τοποθετημένα σε διάφορους εδαφικούς σχηματισμούς αλλά ίσες επικεντρικές αποστάσεις, δόθηκαν τα παρακάτω συμπεράσματα. Οι μέγιστες τιμές εδαφικής επιτάχυνσης παρατηρήθηκαν στο βραχώδες υπόβαθρο, ενώ οι μέγιστες τιμές ταχύτητας και μετάθεσης, στους χαλαρούς επιφανειακούς σχηματισμούς. Όμως, οι στιγμιαίες μέγιστες τιμές δεν αποτελούν πάντα κριτήριο για τις βλάβες. Καθοριστικό ρόλο κατέχει ο αριθμός των κύκλων διάρκειας της ισχυρής εδαφικής κίνησης, που είναι αντιπροσωπευτικός της συσσωρευτικής παραμόρφωσης.

Η Ελλάδα βρίσκεται νότια της ευρωπαϊκής ηπείρου. Βασικό τεκτονικό γνώρισμα του ελληνικού χώρου είναι το ελληνικό τόξο το οποίο αποτελεί το όριο επαφής και σύγκλισης της ευρασιατικής λιθοσφαιρικής πλάκας, τμήμα της οποίας είναι το Αιγαίο, και της Αφρικανικής πλάκας, τμήμα της οποίας είναι η λιθόσφαιρα της Ανατολικής Μεσογείου, γι' αυτό και είναι χώρος μεγάλης σεισμικότητας (η σεισμικότητα ενός τόπου καθορίζεται από την συχνότητα εμφάνισης των σεισμών και τα μεγέθη τους). Οι δυο λιθοσφαιρικές πλάκες συγκλίνουν στην περιοχή αυτή με σχετική ταχύτητα 2,5 cm/s, με αποτέλεσμα η ωκεάνια πλάκα της Ανατολικής Μεσογείου να καταβυθίζεται, λόγω μεγαλύτερης πυκνότητας, κάτω από την ηπειρωτική πλάκα του Αιγαίου. Σύμφωνα με στατιστικά στοιχεία η Ελλάδα, από άποψη σεισμικότητας, κατέχει πρώτη θέση στην Μεσόγειο και την Ευρώπη καθώς και υψηλή θέση σε παγκόσμιο επίπεδο.



Εικόνα 3.10: Κατανομή των επιφανειακών σεισμών στον ελληνικό χώρο (Πηγή: Papazachos et al.,1997).

Το τόξο που δημιουργείται στην περίπτωση αυτή αποτελείται από την ελληνική τάφρο, το νησιωτικό τόξο, την οπισθόταφρο και την ηφαιστειακή τάφρο. Η *τάφρος* δημιουργείται κατά μήκος της επαφής των δύο πλακών. Πρόκειται για ένα σύστημα τάφρων και μια σειρά από βαθιές θαλάσσιες λεκάνες από την Ρόδο έως την Κεφαλονιά. Το μέγιστο βάθος της τάφρου εντοπίστηκε νοτιοδυτικά της Πελοποννήσου στο Ιόνιο πέλαγος (βάθος περίπου 4.500m) και είναι το βαθύτερο σημείο της Μεσογείου. Το *νησιωτικό τόξο* αποτελείται από μια σειρά διαδοχικών νησιών όπως η Ρόδος, η Κρήτη, τα Κύθηρα και η Πελοπόννησος. Τοποθετείται παράλληλα ως προς την τάφρο και σε μικρή απόσταση από αυτήν. Το τόξο αυτό δημιουργείται από την παραμόρφωση και ανύψωση πετρωμάτων (κυρίως ιζηματογενών) του περιθωρίου της ευρασιατικής πλάκας και περιλαμβάνει πολύ παραμορφωμένα πετρώματα αλπικής πτύχωσης.

Η *οπισθόταφρος* είναι μια θαλάσσια λεκάνη (Κρητικό πέλαγος) μικρότερου βάθους από την τάφρο. Το μέγιστο βάθος της φτάνει τα 2.000m περίπου. Η λεκάνη αυτή βρίσκεται μπροστά από το νησιωτικό τόξο και πάνω στην ευρασιατική πλάκα. Το *ηφαιστειακό τόξο* αποτελείται από διαδοχικά ηφαίστεια (ενεργά και ανενεργά) όπως η Σαντορίνη, η Μήλος, η Νίσυρος, το Σουσάκι, τα Μέθανα. Η δημιουργία του οφείλεται σε άνοδο του υλικού της υποβυθιζόμενης αφρικανικής

πλάκας, όπου κατά την άνοδό του το υλικό αυτό διαπερνά την ευρασιατική πλάκα και σχηματίζει ηφαίστεια.

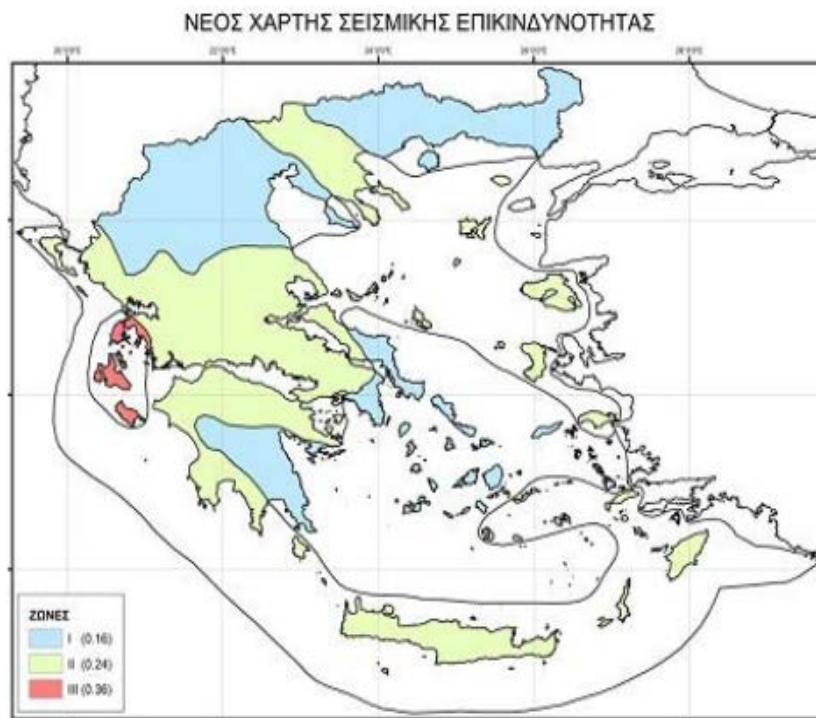


Εικόνα 3.11: Ελληνικό τόξο (Πηγή: Παπανικολάου, 1998).



Εικόνα 3.12: Σχηματική απεικόνιση του ελληνικού τόξου (Πηγή: Παπανικολάου, 1998).

Ο χάρτης ζωνών σεισμικής επικινδυνότητας της Ελλάδας, που ισχύει σήμερα, παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.13. Σύμφωνα με αυτόν, ο Ελληνικός χώρος κατανέμεται σε τρεις ζώνες σεισμικής επικινδυνότητας (I, II, III) με αντίστοιχες τιμές ενεργού εδαφικής επιτάχυνσης σχεδιασμού 0,16g για την πρώτη ζώνη, 0,24g για την δεύτερη και 0,36g για την τρίτη (όπου g η επιτάχυνση της βαρύτητας).



Εικόνα 3.13: Χάρτης ζωνών σεισμικής επικινδυνότητας (Πηγή: Ε.Α.Κ.2003).

3.5 Αντισεισμικός σχεδιασμός & Ευρωκώδικας 8

Ο ελληνικός αντισεισμικός κανονισμός αποτελεί το νομοθετικό πλαίσιο, που περιέχει το σύνολο των κανόνων, που καθορίζουν τις ελάχιστες απαιτήσεις, για τον σχεδιασμό αντισεισμικών κατασκευών στην Ελλάδα. Ο κανονισμός που εφαρμόζεται στην Ελλάδα (Ε.Α.Κ.2000) αναθεωρήθηκε το 2003. Στο πλαίσιο της ύπαρξης κοινής πολιτικής στον τομέα των κατασκευών σε όλη την Ευρώπη, ο Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός (ΕΑΚ2000) έχει πλέον αντικατασταθεί, από τον αντίστοιχο Ευρωκώδικα 8 με ίδιους στόχους όσον αφορά την προστασία με σωστή ανάλυση και τον σχεδιασμό κατασκευών. Από τη σύγκριση των δυο διατάξεων προκύπτουν διαφορές και ομοιότητες, όπως για παράδειγμα τα φάσματα απόκρισης, στην έννοια της κανονικότητας και στον συντελεστή συμπεριφοράς q των κατασκευών.

Γενικά, ο αντισεισμικός σχεδιασμός στοχεύει:

- στην προστασία της ανθρώπινης ζωής στην περίπτωση υψηλών εντάσεων,
- στον περιορισμό ή και στην αποφυγή των οικονομικών απωλειών στην περίπτωση μέτριων εντάσεων,
- στη διασφάλιση μια ελάχιστης στάθμης λειτουργιών των κατασκευών.

Στην Ελλάδα, το μεγαλύτερο ποσοστό των κτιρίων έχει χαμηλό ή μεσαίο ύψος. Επομένως, οι θεμελιώδεις ιδιοσυχνότητες αυτών συχνά ταυτίζονται με το εύρος των συχνοτήτων που επικρατούν στις περισσότερες καταγεγραμμένες σεισμικές διεγέρσεις, στον ελλαδικό χώρο. Βασιζόμενοι σ' αυτό, αντιλαμβανόμαστε ότι υπάρχει κίνδυνος συντονισμού των κατασκευών αυτών, γεγονός που θα επιφέρει την αύξηση των σεισμικών φορτίων και την εμφάνιση σοβαρών ζημιών.

Παρόλο που υπάρχει τεχνογνωσία για την κατασκευή αντισεισμικών κατασκευών, που μπορούν να ανταπεξέλθουν σε αρκετά μεγάλους σεισμούς - χωρίς σημαντικές ζημιές, υιοθετώντας ελαστική συμπεριφορά κατά την διάρκεια της σεισμικής φόρτισης - δεν εφαρμόζεται, γιατί κρίνεται αντιοικονομικό και στην πράξη γίνεται αποδεκτό ένα συγκεκριμένο επίπεδο ζημιών στον φέροντα οργανισμό, κυρίως με την μορφή πλαστικών παραμορφώσεων.

3.5.1 Σεισμικές Δράσεις Σχεδιασμού

Ως σεισμικές δράσεις σχεδιασμού θεωρούνται οι ταλαντωτικές κινήσεις του εδάφους εξαιτίας του σεισμού, για τις οποίες απαιτείται να γίνεται ο κατάλληλος σχεδιασμός των έργων. Η ένταση των σεισμικών δονήσεων σχεδιασμού καθορίζεται από μια μόνο παράμετρο, την επιτάχυνση σχεδιασμού A . Η συγκεκριμένη παράμετρος αλλάζει περαιτέρω μέσα στην ίδια ζώνη ανάλογα με την κατηγορία εδάφους στην οποία βρίσκεται και βάσει της σπουδαιότητας του έργου. Όσον αφορά την διεύθυνση και τη στάθμη εφαρμογής της σεισμικής διέγερσης, οι σεισμικές κινήσεις ορίζονται στην ελεύθερη επιφάνεια του εδάφους.

Γενικά, οι σεισμικές δράσεις ανήκουν σε δύο κατηγορίες, τις επιβαλλόμενες παραμορφώσεις, λόγω των μετακινήσεων ενεργών ρηγμάτων, εδαφικής αστοχίας αστάθειας πρανών (κατολισθήσεις), κ.α. καθώς και τις επιβαλλόμενες αδρανειακές δυνάμεις λόγω της εδαφικής κίνησης, η οποία με τη σειρά της επηρεάζεται από τις τοπικές εδαφικές συνθήκες στην περιοχή του έργου.



Εικόνα 3.14: Κύριες σεισμικές δράσεις (Ψαρρόπουλος & Τσομπανάκης 2011).

3.5.2 Κατηγορία εδάφους

Μέσω της ταχύτητας διάδοσης των σεισμικών διατμητικών κυμάτων στον EC8 διαμορφώθηκε κατάταξη των εδαφών σε πέντε κατηγορίες A, B, C, D και E ανάλογα με την στρωματογραφία και με τις τιμές της σεισμικής επικινδυνότητας. Επίσης, υπάρχουν δύο κατηγορίες εδαφών, οι S_1 και S_2 για τις οποίες απαιτούνται ειδικές μελέτες για τον καθορισμό των σεισμικών δράσεων.

Προκειμένου ο EC8 να εξασφαλίσει τον στόχο του, που είναι η απώλεια κινδύνου εδαφικής διάρρηξης, αστάθεια πρανών, μεγάλων και μόνιμων παραμορφώσεων ή εκτεταμένης ρευστοποιήσεως κατά την διάρκεια σεισμικών διεργασιών, πραγματοποιήθηκε η κατηγοριοποίηση των εδαφών, όπου δίνεται η δυνατότητα μελέτης του υπεδάφους, της τοπογραφίας και της γενικότερης γεωλογίας της περιοχής ενός μελλοντικού έργου. Η αναλυτική περιγραφή της κάθε κατηγορίας βρίσκεται στον αντίστοιχο κανονισμό.

Γενικότερα, είναι απαραίτητη προϋπόθεση ο έλεγχος του εδάφους για τον καθορισμό της κατηγορίας του. Σύμφωνα με το Εθνικό προσάρτημα, η έκταση της απαιτούμενης εδαφοτεχνικής έρευνας-μελέτης εξαρτάται από την *κατηγορία εδάφους, τη σεισμικότητα και τη σπουδαιότητα του κτιρίου*. Το αποτέλεσμα που προκύπτει από τα παραπάνω, όσον αφορά την αξιολόγηση της ακαταλληλότητας του υπεδάφους θεμελίωσης ενός δομικού έργου λαμβάνεται υπόψη εάν, η εξεταζόμενη περιοχή δόμησης βρίσκεται κοντά σε ενεργά σεισμικά ρήγματα. Έτσι λοιπόν, ανάλογα με την απόσταση που έχει η εκάστοτε περιοχή, συμπεριλαμβανομένου και της σπουδαιότητας του έργου, η κατασκευή του υπόκειται σε περιορισμούς ή και σε απαγόρευση. Επίσης, απαραίτητη προϋπόθεση είναι η ανάλυση της ευστάθειας του

πραγούς επί του οποίου θα εδρασθεί το έργο. Αντίστοιχα, σε περίπτωση κορεσμένων χαλαρών αμμωδών εδαφών είναι αναγκαίο να εκτιμηθεί ο κίνδυνος εκτεταμένης ρευστοποίησης σε περίπτωση σεισμού, λαμβάνοντας υπόψη τις εδαφικές επιταχύνσεις. Τέλος, στην περίπτωση ακόρεστων χαλαρών αμμωδών εδαφικών σχηματισμών, πρέπει να πραγματοποιηθεί παρόμοιος έλεγχος, διότι η πιθανή δυναμική μείωση όγκου (συνίζηση) μπορεί να προκαλέσει παραμένουσες καθιζήσεις και παραμορφώσεις. Ο έλεγχος αυτός συμπεριλαμβάνει επί τόπου δοκιμές.

3.5.3 Σεισμικές ζώνες – εδαφική επιτάχυνση

Με βάση την επιτάχυνση του εδάφους a_{gR} , η οποία αντιστοιχεί σε κατηγορία εδάφους Α, χαρακτηρίζεται η σεισμική δράση σε κάθε ζώνη. Σύμφωνα με το Εθνικό Προσάρτημα, για τις σεισμικές ζώνες Z1, Z2, Z3 υιοθετούνται από τον ΕΑΚ2003.

Οι σεισμικές ζώνες I, II, III και οι τιμές τους a_{gR}/g είναι οι αντίστοιχες του ΕΑΚ2003 $a = A/g$, όπως φαίνεται στον Πίνακα 3.2.

Τιμές a_{gR}/g	
Ζώνη	a_{gR}/g
Z1	0.16
Z2	0.24
Z3	0.36

Πίνακας 3.2: Τιμές εδαφικής επιτάχυνσης σεισμικών ζωνών βάσει Εθνικού Προσαρτήματος.

3.5.4 Ελαστικό Φάσμα Απόκρισης

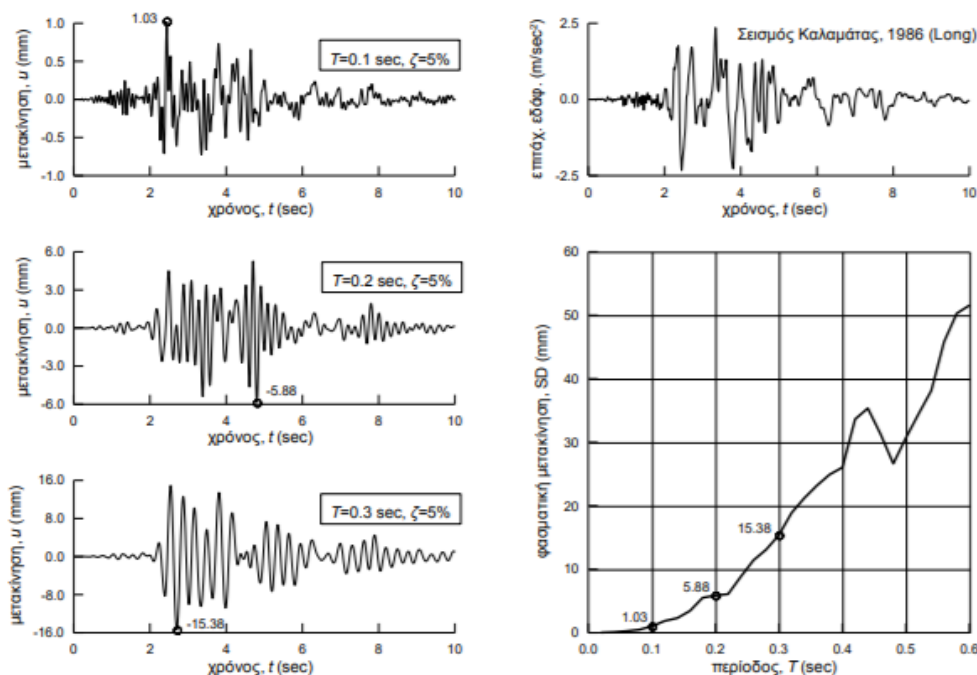
Οι επιπτώσεις της σεισμικής δραστηριότητας, που μπορεί να προκύψουν στις συνηθισμένες κατασκευές, δεν εξαρτάται αποκλειστικά από το μέγεθος της κίνησης του εδάφους. Αυτό απεικονίζεται στις χρονοϊστορίες επιτάχυνσης, ταχύτητας, μετατόπισης, στο συχνοτικό περιεχόμενο της εδαφικής κίνησης, καθώς κι στα χαρακτηριστικά κάθε κατασκευής. Για τον λόγο αυτό γίνεται χρήση των φασμάτων απόκρισης στο πεδίο του χρόνου και των συχνοτήτων, τα οποία συμβάλουν στην σωστή εκτίμηση της συμπεριφοράς των κατασκευών. Τα φάσματα στο πεδίο των συχνοτήτων είναι βασισμένα στην θεώρηση ότι ένα σεισμικό κύμα είναι ικανό να περιγραφεί (βάσει της ανάλυσης με μετασχηματισμό Fourier), ως ένα άθροισμα απείρων απλών αρμονικών ταλαντώσεων, όπου καθένα από αυτά έχει μια συγκεκριμένη ιδιοπερίοδο ταλάντωσης.

Πιο συγκεκριμένα το φάσμα απόκρισης είναι ένα διάγραμμα που δίνει την μέγιστη απόκριση, για το συγκεκριμένο μέγεθος που μελετάμε (π.χ. απόλυτη επιτάχυνση) όλων των μονοβάθμιων ταλαντωτών με συγκεκριμένη απόσβεση, για δεδομένη σεισμική διέγερση, ανάλογα με την ιδιοπερίοδό τους.

Η μέθοδος κατασκευής του φάσματος απόκρισης σχετικών μετακινήσεων πραγματοποιείται ως εξής :

- επιλογή απόσβεσης ζ , για την οποία θα κατασκευαστεί το φάσμα π.χ. $\zeta=5\%$,
- επιλογή μιας ιδιοπεριόδου T ενός ταλαντωτή π.χ. $T = 0,1s$,
- υπολογισμός της ιστορίας απόκρισης, $u(t)$ αυτού του ταλαντωτή, για τη δεδομένη διέγερση,
- υπολογισμός της απολύτως μέγιστης τιμής της απόκρισης $\max|u(t)|$,
- επανάληψη της διαδικασίας, για πολλές τιμές της ιδιοπεριόδου και κατασκευή του διαγράμματος $\max|u(t)|$, ως προς T .

Μέσω της καμπύλης που δημιουργείται μπορεί να υπολογιστεί η μέγιστη μετακίνηση οποιασδήποτε κατασκευής με απόσβεση ίση με αυτή του φάσματος.



Εικόνα 3.15: Μέθοδος κατασκευής φάσματος απόκρισης.

3.5.5 Ελαστικό Φάσμα Σχεδιασμού

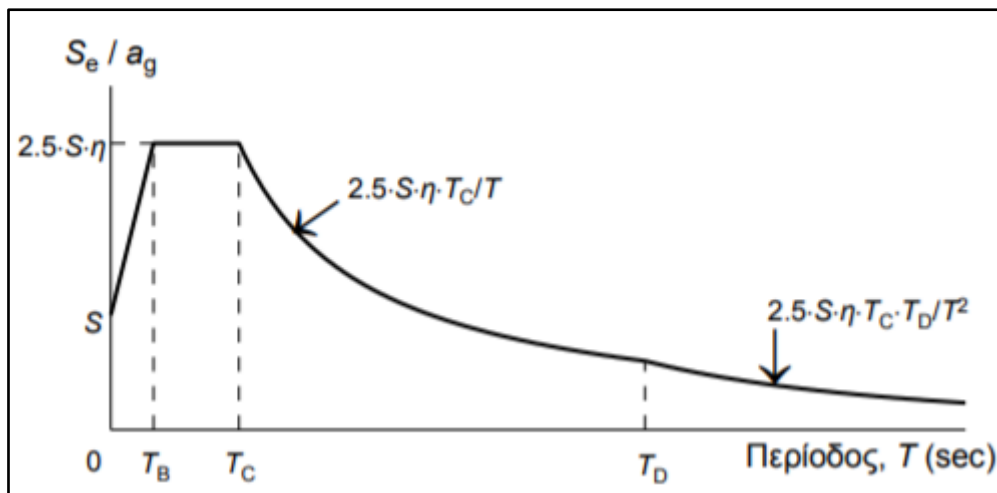
Στα φάσματα απόκρισης καταγεγραμμένων σεισμών παρατηρούνται διαφορές μεταξύ τους, που οφείλονται στα χαρακτηριστικά της σεισμικής δόνησης και των εδαφικών

συνθηκών. Εξαιτίας αυτού, στο σχεδιασμό καινούργιων κατασκευών επιλέγεται ένα εξομαλμένο φάσμα, που καλύπτει όλες τις μορφές φασμάτων πιθανών σεισμών που μπορεί να συμβούν σε μία περιοχή. Για την κατασκευή του φάσματος σχεδιασμού λαμβάνονται υπόψη για την εξεταζόμενη περιοχή, που θα πραγματοποιηθεί το έργο οι εξής παράμετροι:

- Οι ενεργές τιμές της εδαφικής κίνησης
- Οι εδαφικές συνθήκες

Με βάση τον Ευρωκώδικα 8 το φάσμα σχεδιασμού εφαρμόζεται για σχεδιασμό κατασκευών, οι οποίες θέλουμε να συμπεριφέρονται ελαστικά στο σεισμό σχεδιασμού. Η γενική μορφή του ελαστικού φάσματος επιταχύνσεων με απόσβεση 5% δίνεται στο παρακάτω σχήμα και διακρίνεται στις εξής περιοχές:

- $T_B \leq T \leq T_C$: περιοχή σταθερής φασματικής επιτάχυνσης 2,5 φορές την μέγιστη εδαφική επιτάχυνση $a_g S$.
- $T_C \leq T \leq T_D$: περιοχή σταθερής φασματικής ταχύτητας , όπου η φασματική επιτάχυνση είναι ανάλογη του $1/T$.
- $T_D \leq T \leq 4$: μια περιοχή σταθερής φασματικής μετακίνησης , όπου η φασματική επιτάχυνση είναι ανάλογη του $1/T^2$.



Εικόνα 3.16: Γενική μορφή ελαστικού φάσματος σχεδιασμού

Εφαρμόζοντας το ελαστικό φάσμα απόκρισης, για την οριζόντια συνιστώσα της σεισμικής φόρτισης, η ελαστική επιτάχυνση σχεδιασμού σε κάθε περιοχή υπολογίζεται από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \left[1 + \frac{T}{T_B} \cdot (\eta \cdot 2.5 - 1) \right] \quad \text{για } 0 \leq T \leq T_B \quad (3.7)$$

$$S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2.5 \quad \text{για } T_B \leq T \leq T_C \quad (3.8)$$

$$S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2.5 \cdot \frac{T_C}{T} \quad \text{για } T_C \leq T \leq T_D \quad (3.9)$$

$$S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2.5 \cdot \frac{T_C \cdot T_D}{T^2} \quad \text{για } T_D \leq T \leq 4 \text{ sec} \quad (3.10)$$

όπου:

$a_g = \gamma_1 \cdot a_{gR}$ μέγιστη οριζόντια σεισμική επιτάχυνση,

γ συντελεστής σπουδαιότητας κτιρίου,

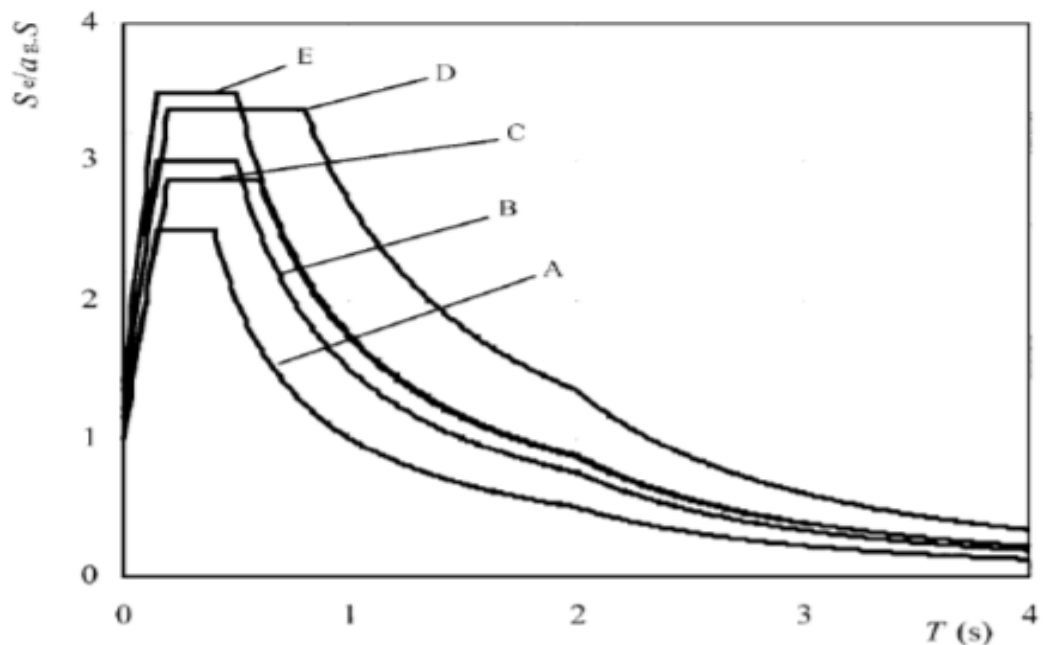
S συντελεστής εδάφους,

η συντελεστής απόσβεσης.

Για $\xi=5\%$ τίθεται $\eta = 1$. Επομένως, οι παραπάνω σχέσεις αντιστοιχούν σε απόσβεση $\xi=5\%$. Για διαφορετικές τιμές απόσβεσης, η τιμή του η υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\eta = \sqrt{(10/(5 + \xi))} \geq 0,55 \quad (3.11)$$

Με βάση το Εθνικό προσάρτημα, στην Ελλάδα εφαρμόζεται στο φάσμα τύπου 1, με τιμές χαρακτηριστικών περιόδων και συντελεστή εδάφους όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.17 και στον Πίνακα 3.3.



Σχήμα 3.17:Προτεινόμενο ελαστικό φάσμα Τύπου 1 κατά τον ΕΚ8 για απόσβεση 5%

Κατηγορία εδάφους	S	T _B (sec)	T _C (sec)	T _D (sec)
A	1.00	0.15	0.40	2.50
B	1.20	0.15	0.50	2.50
C	1.15	0.20	0.60	2.50
D	1.35	0.20	0.80	2.50
E	1.40	0.15	0.50	2.50

Πίνακας 3.3: Συντελεστές εδάφους και χαρακτηριστικές ιδιοπερίοδοι φάσματος σχεδιασμού σύμφωνα με τον ΕΚ8

Για την ελαστική φασματική επιτάχυνση στην κατακόρυφη διεύθυνση εφαρμόζονται οι έξης εξισώσεις:

$$S_{ve}(T) = a_{vg} \cdot S \cdot \left[1 + \frac{T}{T_B} \cdot (\eta \cdot 3.0 - 1) \right] \quad \text{για } 0 \leq T \leq T_B \quad (3.12)$$

$$S_{ve}(T) = a_{vg} \cdot S \cdot \eta \cdot 3.0 \quad \text{για } T_B \leq T \leq T_C \quad (3.13)$$

$$S_{ve}(T) = a_{vg} \cdot S \cdot \eta \cdot 3.0 \cdot \frac{T_C}{T} \quad \text{για } T_C \leq T \leq T_D \quad (3.14)$$

$$S_{ve}(T) = a_{vg} \cdot S \cdot \eta \cdot 3.0 \cdot \frac{T_C \cdot T_D}{T^2} \quad \text{για } T_D \leq T \leq 4 \text{ sec} \quad (3.15)$$

Στον Πίνακα 3.4 δίνονται η τιμή της κατακόρυφης επιτάχυνσης του εδάφους και οι τιμές των χαρακτηριστικών περιόδων σύμφωνα με το Εθνικό Προσάρτημα.

a_{vg}/a_g	T _B (sec)	T _C (sec)	T _D (sec)
0.90	0.05	0.15	1

Πίνακας 3.4: Τιμές επιτάχυνσης και χαρακτηριστικών περιόδων για την κατακόρυφη συνιστώσα της σεισμικής διέγερσης

3.5.6 Υπολογισμός Μαζών

Για τον υπολογισμό της σεισμικής δράσης σχεδιασμού (αδρανειακά φορτία) λαμβάνονται υπόψη οι μάζες που συνδέονται με όλα τα φορτία βαρύτητας, οι οποίες περιλαμβάνονται στο παρακάτω συνδυασμό:

$$\sum G_{k,j} + \sum \psi_{\varepsilon,i} \cdot Q_{k,i} \quad (3.16)$$

όπου :

$\sum G_{k,j}$: οι μόνιμες δράσεις,

$\psi_{\varepsilon,i}$: $\varphi * \psi_{2,i}$,

φ : μειωτικός συντελεστής σύμφωνα με τον Πίνακα 3.5,

$\sum \psi_{\varepsilon,i} \cdot Q_{k,i}$: μεταβλητές δράσεις,
 $\psi_{2,i}$ = συντελεστής συνδυασμού για τη μεταβλητή δράση i σύμφωνα με τον πίνακα Α1-1 του προσαρτήματος Α1 του ΕΚ0, ίσος με 0,3 για την περίπτωση των κατοικιών.

Κατηγορία κτιρίου	Όροφος	ϕ
A-C	Δώμα	1.0
	Όροφοι με συσχετισμένες χρήσεις	0.8
	Όροφοι με μη-συσχετισμένες χρήσεις	0.5
D-F		1.0

Πίνακας 3.5: Τιμές του συντελεστή ϕ ο οποίος υιοθετείται από το Εθνικό Προσάρτημα.

3.5.7 Μέθοδοι ανάλυσης

Στον ΕΚ8, η ανάλυση είναι ελαστική. Αν η ανάλυση γίνεται για τον υπολογισμό της έντασης στα μέλη υπό την «σεισμική δράση σχεδιασμού» χρησιμοποιεί το φάσμα σχεδιασμού. Οι μέθοδοι ελαστικής ανάλυσης είναι :

1. Ιδιομορφική φασματική ανάλυση
2. Στατική με ισοδύναμα οριζόντια σεισμικά φορτία (μέθοδος οριζόντια φόρτισης)

Στη δυναμική ανάλυση των κατασκευών χρησιμοποιείται η ιδιομορφική ανάλυση (modal analysis). Η ιδιομορφική ανάλυση είναι βασισμένη στα φάσματα απόκρισης, μέσω των οποίων προσδιορίζεται η φασματική επιτάχυνση της κατασκευής, σε συνάρτηση με την περίοδό της. Όσον αφορά τα φάσματα απόκρισης, ορίζονται ως «διάγραμμα», το οποίο δίνει την μέγιστη απόκριση για το μέγεθος ενδιαφέροντος (π.χ., απόλυτη επιτάχυνση) για την κατασκευή.

Ο προσδιορισμός των ιδιομορφών μέσω της ιδιομορφικής ανάλυσης δεν αποτελεί κάποια μορφή φόρτισης και είναι εντελώς ανεξάρτητος από τις δράσεις που έχουν εφαρμοστεί. Σχετίζεται αποκλειστικά με τα χαρακτηριστικά δυναμικής απόκρισης ενός κτιρίου, δηλαδή τη μάζα και τη δυσκαμψία της κατασκευής.

Κεφάλαιο 4^ο

Δυναμική Αλληλεπίδραση Εδάφους-Θεμελίωσης-Κατασκευής

4.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο θα εξετασθεί το φαινόμενο της δυναμικής αλληλεπίδρασης εδάφους – κατασκευής (soil-structure interaction–SSI) καθώς και οι επιπτώσεις του στην ανωδομή. Αποτελεί ένα από τα ζητήματα που απασχολεί ιδιαίτερα την ερευνητική κοινότητα στην επιστημονική περιοχή της σεισμικής μηχανικής. Ο όρος αναφέρεται στην αλληλεξάρτηση της δυναμικής απόκρισης του συστήματος κατασκευής - εδάφους, η οποία εξαρτάται από την ευκαμψία της κατασκευής και την ενδοσιμότητα του εδάφους υπό εξωτερική δυναμική διέγερση. Η ενδοσιμότητα του εδάφους επηρεάζει την μεταβιβαζόμενη σεισμική ένταση στην κατασκευή και κατ' επέκταση την καταπόνηση της.

Συνήθως, στην μελέτη της απόκρισης μια κατασκευής, οι συνθήκες στήριξης της θεωρούνται ως πάκτωση. Η πακτωμένη βάση μιας κατασκευής θεωρείται ρεαλιστική μόνο στην περίπτωση όπου η θεμελίωση βρίσκεται σε βράχο. Όμως, στην πραγματικότητα η ικανότητα του εδάφους να παραμορφώνεται επιτρέπει μετακινήσεις στη βάση της κατασκευής. Ουσιαστικά η μεμονωμένη μελέτη της απόκρισης της κατασκευής διευρύνεται στην μελέτη της απόκρισης του ενιαίου συστήματος εδάφους-θεμελίωσης-κατασκευής. Η συνολική απόκριση του συστήματος εξαρτάται τόσο από τα δυναμικά χαρακτηριστικά της σεισμικής διέγερσης όσο και από τα δυναμικά χαρακτηριστικά του εδάφους θεμελίωσης.

4.2 Γενικές Αρχές

4.2.1 Φυσική του φαινομένου

Κατά τη διάρκεια της σεισμικής διέγερσης, το έδαφος παραμορφώνεται και συμπαρασύρει την θεμελίωση, άρα και την υποστηριζόμενη κατασκευή. Συνεπώς, αναπτύσσονται στην κατασκευή αδρανειακές δυνάμεις, οι οποίες οδηγούν σε

δυναμικές φορτίσεις στη θεμελίωση και διαβιβάζονται στο έδαφος. Επομένως, το έδαφος παραμορφώνεται εξαιτίας της κίνησης του εδάφους και ταυτόχρονα ένα πρόσθετο κινηματικό πεδίο εμφανίζεται στη διεπιφάνεια του εδάφους θεμελίωσης. Το σύνθετο κυματικό πεδίο διεγείρει εκ νέου το σύστημα θεμελίωσης-ανωδομής, με αποτέλεσμα την ανάπτυξη νέων αδρανειακών δυνάμεων και νέου κυματικού πεδίου, λόγω της ταλάντωσης του συστήματος (Mylonakis et al., 2006).

4.2.2 Αποτελέσματα φαινομένου

Η δυναμική απόκριση του φορέα διαφοροποιείται λαμβάνοντας υπ' όψιν το φαινόμενο της δυναμικής αλληλεπίδρασης. Τα αποτελέσματα του φαινομένου της κατασκευής είναι τα εξής (Veletsos & Meek, 1974) :

- Το σύστημα θεμελίωσης – κατασκευής γίνεται πιο εύκαμπτο σε σχέση με τον πλήρως πακτωμένο ισοδύναμο μονοβάθμιο ταλαντωτή, εξαιτίας της ενδοσιμότητας του συστήματος εδάφους - θεμελίωσης. Επομένως, παρατηρείται πάντα μια αύξηση της ιδιοπεριόδου του συστήματος.
- Ένα μεγάλο τμήμα της ενέργειας ταλάντωσης του συστήματος αποσβένεται λόγω γεωμετρικής απόσβεσης του εκπεμπόμενου, ταλαντούμενης θεμελίωσης προς το έδαφος, κυματικού πεδίου καθώς και λόγω υστερικής απόσβεσης του εδαφικού υλικού.

Το σύστημα εδάφους - θεμελίωσης - κατασκευής έχει περισσότερους βαθμούς ελευθερίας, συνεπώς διαφορετικό συχνοτικό περιεχόμενο δυναμικής απόκρισης, από έναν μονοβάθμιο ταλαντωτή που προσομοιώνει τη δυναμική απόκριση της ανωδομής. Επιπροσθέτως, η γεωμετρική απόσβεση ενέργειας, που παρατηρείται μόνο κατά την ταλάντωση της θεμελίωσης της κατασκευής, οδηγεί σε μείωση του πλάτους της απόκρισης.

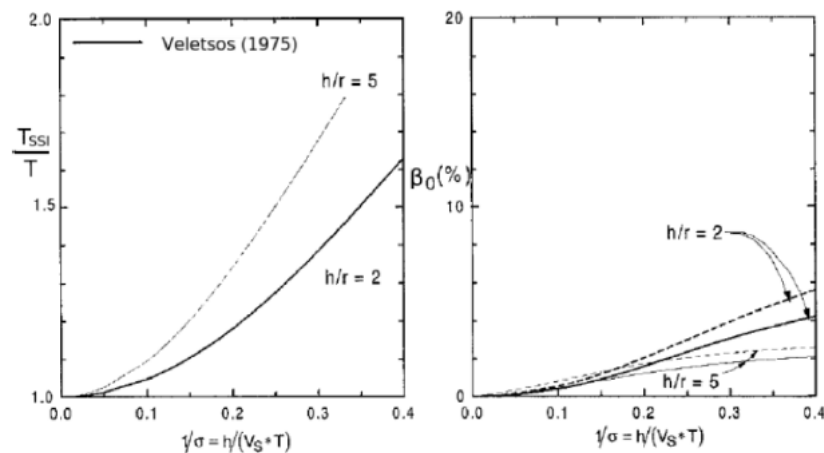
4.2.3 Παράγοντες επίδρασης του φαινομένου

Οι κυριότεροι παράγοντες που επηρεάζουν το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης είναι οι ακόλουθοι (Veletsos & Meek , 1974):

- σχετική δυσκαμψία $\sigma = V_s/f_0h$ μεταξύ του εδάφους θεμελίωσης και της ανωδομής,

- λόγος h/r του ύψους h της κατασκευής προς την χαρακτηριστική διάσταση r της θεμελίωσης (π.χ. ακτίνα κύκλου θεμελίου),
- σχέση f_p/f_o μεταξύ της ιδιοσυχνότητας της διέγερσης f_p και της θεμελιώδους συχνότητας του συστήματος θεμελίωση-κατασκευής f_o ,
- λόγος $\delta = m/\rho\pi r^2 h$ της σχετικής μάζας της κατασκευής προς την σχετική μάζα του εδάφους θεμελίωσης,
- λόγος m_f/m της μάζας της θεμελίωσης m_f προς την μάζα την κατασκευής m ,
- συντελεστής κρίσιμης απόσβεσης β της πλήρους πακτωμένης βάσης,
- λόγος Poisson ν του εδάφους.

Στην περίπτωση που το έδαφος θεωρηθεί γραμμικό ελαστικό, μόνο οι τρεις πρώτες παράμετροι επηρεάζουν σημαντικά το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης (Veletsos, 1977). Η επιρροή της σχετικής δυσκαμψίας εδάφους κι ανωδομής στη μεταβολή της ιδιοπεριόδου και του συντελεστή απόσβεσης του ισοδύναμου μονοβάθμιου ταλαντωτή φαίνεται στην Εικόνα 4.1.



Εικόνα 4.1: Μεταβολή ιδιοπεριόδου και συντελεστή απόσβεσης ισοδύναμου μονοβάθμιου ταλαντωτή συναρτήσει της σχετικής δυσκαμψίας (Πηγή: Stewart et al., 2008).

Στα μαλακά εδάφη κατά τη διάρκεια της σεισμικής δόνησης, όσο μειώνεται η δυσκαμψία τους, η ιδιοπερίοδος του συνολικού συστήματος αυξάνεται συγκριτικά με την περίπτωση της πλήρους πάκτωσης. Αντίστοιχα, η συνολική απόσβεση του συστήματος αυξάνεται με την μείωση της δυσκαμψίας του εδάφους. Επίσης, παρατηρείται ότι η αύξηση της ιδιοπεριόδου είναι μεγαλύτερη, για τις κατασκευές με μεγάλο λόγο ύψους προς πλάτος, ενώ είναι μικρότερη για κατασκευές σχετικά

χαμηλές και πλατιές. Αντίθετα, η αύξηση της απόσβεσης εμφανίζεται μεγαλύτερη, για τις χαμηλές και πλατιές κατασκευές.

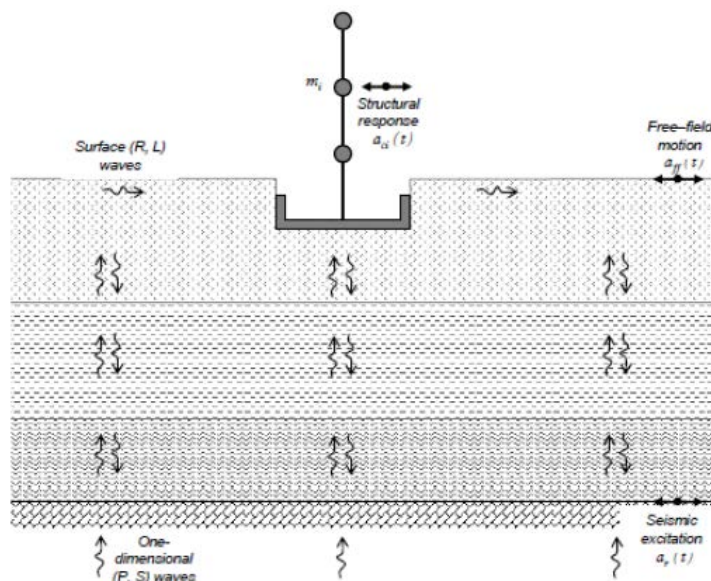
4.3 Μέθοδοι ανάλυσης της αλληλεπίδρασης εδάφους – θεμελίωσης – κατασκευής

Στη διεθνή βιβλιογραφία υπάρχουν δύο κατηγορίες ανάλυσης του προβλήματος αλληλεπίδρασης εδάφους – θεμελίωσης - κατασκευής. Η κατηγορία των *άμεσων* και η κατηγορία των *έμμεσων* μεθόδων:

Άμεση μέθοδος

Στην κατηγορία των άμεσων μεθόδων (direct methods) ανήκουν οι μέθοδοι, που αναλύουν ενιαία το σύστημα της κατασκευής του εδάφους κι ένα τμήμα του εδάφους, με την χρήση πεπερασμένων ή συνοριακών στοιχείων για την προσομοίωση. Επίσης, είναι καταλληλότερες για μη - γραμμικές αναλύσεις.

Σε αυτήν την μέθοδο, η σεισμική διέγερση εισάγεται στους εξωτερικούς κόμβους του εδάφους θεμελίωσης. Συνήθως, το κατώτερο όριο του προσομοιώματος ταυτίζεται με το βραχώδες υπόβαθρο. Το βασικό πλεονέκτημα της άμεσης μεθόδου επίλυσης με πεπερασμένα στοιχεία είναι η ικανότητα να συμπεριλαμβάνει στην ανάλυση σύνθετες γεωμετρίες τόσο του υπεδάφους όσο και της ανωδομής. Παρότι όμως, η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιείται ευρέως και παρουσιάζει αρκετά πλεονεκτήματα, έχει ορισμένα μειονεκτήματα που περιορίζουν τις εφαρμογές σε προβλήματα τριών διαστάσεων. Ένα εξ αυτών των μειονεκτημάτων είναι ότι το ημι-άπειρο έδαφος προσομοιώνεται ως ένας χώρος πεπερασμένων διαστάσεων, με αποτέλεσμα την δημιουργία τεχνητών ανακλάσεων των σεισμικών κυμάτων πάνω στα σύνορά του. Η χρήση πολύ απομακρυσμένων συνόρων από την κεντρική περιοχή ή η χρήση ειδικών συνόρων που απορροφούν τα κύματα ελαττώνει σημαντικά το μειονέκτημα αυτό, αλλά ταυτόχρονα αυξάνει τον βαθμό διακριτοποίησης, την πολυπλοκότητα και το κόστος του υπολογισμού.



Εικόνα 4.2: Άμεση μέθοδος προσέγγισης του προβλήματος αλληλεπίδρασης εδάφους-θεμελίωσης-κατασκευής.

Μέθοδος αποσυζευγμένων συστημάτων

Στην κατηγορία των έμμεσων μεθόδων (substructure methods) ανήκουν εκείνες που διακριτοποιούν το σύστημα σε ένα υποσύστημα ημι-άπειρου εδάφους κι ένα υποσύστημα της κατασκευής ξεχωριστά. Στην συνέχεια, πραγματοποιείται η σύζευξη των δύο συστημάτων κι υπολογίζεται η συνολική απόκριση του συστήματος. Οι κινηματικές συνθήκες στο κοινό όριο των δύο υποσυστημάτων, πρέπει να επαληθεύονται. Η ανάλυση γίνεται θεωρώντας γραμμική συμπεριφορά, ώστε να είναι δυνατή η εφαρμογή της αρχής της επαλληλίας, προκειμένου να υπολογιστεί η συνολική απόκριση του συστήματος. Συνεπώς, το μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι δεν υπάρχει η δυνατότητα διεξαγωγής πλήρους μη - γραμμικής ανάλυσης.

Η αναλυτική προσέγγιση της μεθόδου αποσυζευγμένων συστημάτων, στην περίπτωση συμπαγών άκαμπτων θεμελιώσεων, μπορεί να συνοψιστεί στο παρακάτω σύστημα εξισώσεων με έξι αγνώστους:

$$[K_s] - \omega^2 [M] \{q\} = \{F_s\} \quad (4.1)$$

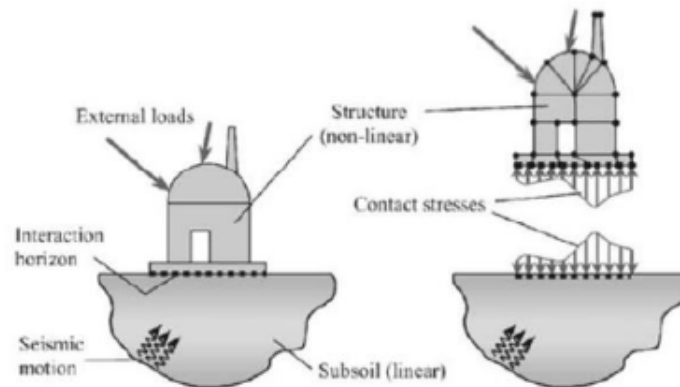
όπου:

q = το διάνυσμα των αγνώστων μετακινήσεων, για τους έξι βαθμούς ελευθερίας του στερεού σώματος θεμελίωσης,

K_s = ο γενικευμένος δυναμικός δείκτης εμπίδησης του εδάφους, υπολογισμένος στην διεπιφάνεια εδάφους – θεμελίωσης,

M = το ισοδύναμο μητρώο μάζας της κατασκευής, που περιέχει τη μάζα της θεμελίωσης,

F_s = το διάνυσμα των ισοδύναμων σεισμικών δυνάμεων που ασκούνται στο σύστημα θεμελίωσης – κατασκευής, από τη σεισμική διέγερση του εδάφους.



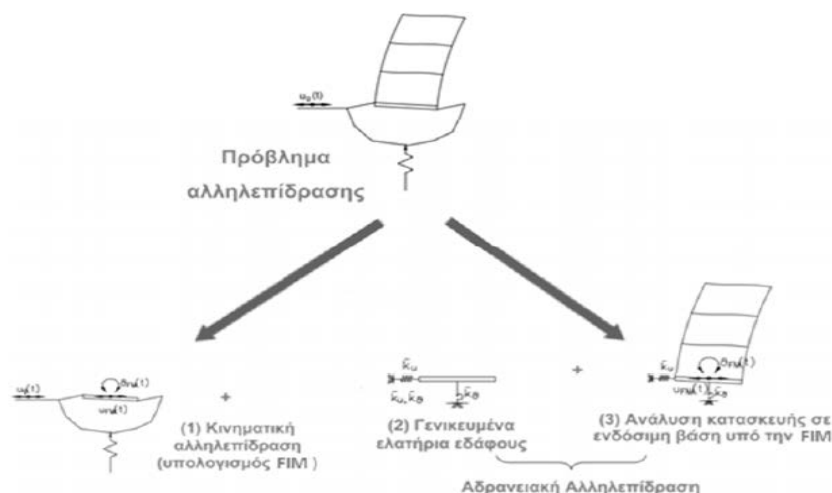
Εικόνα 4.3: σχηματική αναπαράσταση της μεθόδου αποσυνζευγμένων συστημάτων (Πηγή: Bode et al., 2002).

4.4 Κινηματική και Αδρανειακή Αλληλεπίδραση

Το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης εδάφους – κατασκευής - θεμελίωσης εμφανίζεται, όταν η κίνηση ενός σημείου της διεπιφάνειας εδάφους – κατασκευής, διαφέρει από την κίνηση που θα υλοποιείτο στο ίδιο σημείο αν δεν υπήρχε η ανωδομή (κατασκευή συν θεμελίωση), που αναφέρεται ως κίνηση ελεύθερου πεδίου (free-field motion).

Ουσιαστικά το φαινόμενο αυτό οδηγεί σε δύο αποτελέσματα. Πρώτον, η διαφορά δυσκαμψιών μεταξύ της θεμελίωσης και του εδάφους προκαλεί διαφορά στην κίνηση μεταξύ μιας δύσκαμπτης θεμελίωσης και στην κίνηση του ελεύθερου πεδίου, το οποίο μπορεί να συμβεί και στη περίπτωση θεμελίωσης χωρίς μάζα. Αυτή η κίνηση είναι αποτέλεσμα της γεωμετρικής ισοστάθμισης της σεισμικής κίνησης εισαγωγής του ελεύθερου πεδίου. Δεύτερον, η παραμορφωσιμότητα του εδάφους επηρεάζει την απόκριση της κατασκευής, που υπόκειται στην διαφοροποιημένη κίνηση, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, με αποτέλεσμα το σύστημα έδαφος - κατασκευή να συμπεριφέρεται ως ένα ενιαίο σύστημα με διαφορετικά δυναμικά χαρακτηριστικά (ιδιοπερίοδος κι απόσβεση). Επομένως, τα είδη της αλληλεπίδρασης εδάφους - θεμελίωσης - κατασκευής χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, οι οποίες είναι:

1. Κινηματική αλληλεπίδραση (kinematic interaction): αφορά τον προσδιορισμό της σεισμικής κίνησης στη βάση της θεμελίωσης, για την οποία υποθέτουμε ότι έχει δυσκαμψία αλλά στερεΐται μάζας. Πιο συγκεκριμένα αναφέρεται στην ύπαρξη της θεμελίωσης, που διαφοροποιεί την κίνηση του ελεύθερου πεδίου (δηλαδή την κίνηση απουσία της κατασκευής -η οποία εξαρτάται από φαινόμενα διάδοσης κύματος-, τα χαρακτηριστικά της πηγής και φαινόμενα που σχετίζονται με τις τοπικές εδαφικές συνθήκες). Η κινηματική αλληλεπίδραση επηρεάζεται, από το μέγεθος και το βάθος της θεμελίωσης και ο συνυπολογισμός της οδηγεί στην τροποποίηση της εδαφικής κίνησης ελεύθερου πεδίου (FFM) σε κίνηση εισαγωγής της θεμελίωσης (foundation input motion- FIM).
2. Αδρανειακή αλληλεπίδραση (inertial interaction): αναφέρεται στην αδράνεια, στη δυσκαμψία και στην απόσβεση της κατασκευής και του εδάφους που επηρεάζουν την απόκριση του συστήματος υπό σεισμική δράση στην διεπιφάνεια εδάφους – θεμελίου. Η ταλάντωση της θεμελίωσης προκαλεί αδρανειακές δυνάμεις, οι οποίες αυξάνουν την ασκούμενη τέμνουσα βάσης, τα κατακόρυφα φορτία και τις καμπτικές ροπές στην θεμελίωση και στο έδαφος. Αποτέλεσμα του φαινομένου είναι ότι ένα κυματικό πεδίο μεταβιβάζεται από την κατασκευή πίσω στο έδαφος.



Εικόνα 4.4: Σχηματική απεικόνιση της αντιμετώπισης της ΑΕΘΚ με έμμεσες μεθόδους.

Στη δυναμική ανάλυση των κατασκευών, θεωρείται ότι η σεισμική κίνηση που καταγράφεται στην ελεύθερη επιφάνεια του εδάφους σε συνθήκες ελευθέρου πεδίου, είναι εκείνη που εισάγεται και στην θεμελίωση της κατασκευής. Η

συγκεκριμένη θεώρηση ισχύει μόνο στην περίπτωση, όπου η κατασκευή είναι πακτωμένη σε άκαμπτη θεμελίωση κι άρρηκτα συνδεδεμένη με το έδαφος θεμελίωσης, το οποίο δεν μπορεί να παραμορφωθεί τοπικά κάτω από την θεμελίωση. Όμως, στις περιπτώσεις όπου η κατασκευή εδράζεται σε ένα σύστημα εδάφους - θεμελίωσης -που είναι πιο εύκαμπτο- η ταλάντωση της θεμελίωσης σε έναν σεισμό είναι διαφορετική από αυτήν του εδάφους. Συνεπώς, μεταβάλλεται και της ανωδομής σε αντίθεση με την περίπτωση της άκαμπτης θεμελίωσης.

4.5 Κανονιστική αντιμετώπιση της αλληλεπίδρασης εδάφους – κατασκευής

Στους σύγχρονους αντισεισμικούς κανονισμούς, το φαινόμενο της δυναμικής αλληλεπίδρασης εδάφους-θεμελίωσης-κατασκευής αντιμετωπίζεται συνήθως προσεγγιστικά, όταν δεν αγνοείται πλήρως. Η πολύπλοκη φύση του φαινομένου λόγω της εξάρτησής του από τις ειδικές συνθήκες κάθε τεχνικού έργου δικαιολογεί εν μέρει, την διατήρηση των κανονιστικών πλαισίων σε επίπεδο επισήμανσης, με έμφαση στις περιπτώσεις όπου η αλληλεπίδρασή είναι ικανή να διαφοροποιήσει την σεισμική απόκριση του συστήματος.

Παρόλα αυτά οι σύγχρονοι αντισεισμικοί κανονισμοί αναγνωρίζουν την επιρροή της αλληλεπίδρασης στην σεισμική απόκριση των κατασκευών. Αρκετές φορές μάλιστα υπεισέρχονται και σε ειδικότερα θέματα, αντικατοπτρίζοντας τα βασικά συμπεράσματα τα οποία έχουν προκύψει κατά την μελέτη του φαινομένου σε επίπεδο έρευνας αλλά και παρατήρησης από πραγματικές σεισμικές καταγραφές. Μερικοί από τους σύγχρονους κανονισμούς είναι ο αμερικάνικος κανονισμός FEMA, ο Ελληνικός Κανονισμός Επεμβάσεων (ΚΑΝ.ΕΠΕ.), ο Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός (ΕΑΚ2000) και οι Ευρωκώδικες, με έμφαση στις κτιριακές κατασκευές. Στην Ελλάδα εφαρμόζεται πλέον ο Ευρωκώδικας.

Ευρωκώδικες

Στο μέρος 1-1 του Ευρωκώδικα 2, περί γενικών αρχών και κανόνων για κτίρια από σκυρόδεμα, πιο συγκεκριμένα στο Παράρτημα G, αναφέρεται η αλληλεπίδραση εδάφους - θεμελίωσης - κατασκευής τόσο για αβαθείς θεμελιώσεις όσο και για θεμελιώσεις με πασσάλους. Αναφέρεται ότι η αλληλεπίδραση μεταξύ εδάφους -

θεμελίωσης κι ανωδομής, πρέπει να λαμβάνεται υπόψη. Ακόμα αναφέρεται ότι η κατανομή των τάσεων επαφής στις θεμελιώσεις κι οι δυνάμεις υποστρωμάτων εξαρτώνται από τις σχετικές καθιζήσεις. Επίσης, η επίλυση του προβλήματος μπορεί να γίνει με εξασφάλιση συμβιβαστού των μετακινήσεων και των σχετικών αντιδράσεων.

Στον Ευρωκώδικα 8 εξαιτίας της αβεβαιότητας στη φόρτιση και για την αντιμετώπιση φαινομένων, όπως ο ερπυσμός, καθορίζονται διαφορετικά επίπεδα ανάλυσης. Σε μία εύκαμπτη ανωδομή, τα μεταφερόμενα φορτία είναι ανεξάρτητα των σχετικών καθιζήσεων και αυτό οφείλεται στην έλλειψη στιβαρότητας της κατασκευής. Συνεπώς, τα φορτία σταματούν να είναι άγνωστα και το πρόβλημα γίνεται πρόβλημα θεμελίωσης επί ελαστικού εδάφους.

Από την άλλη πλευρά, στην περίπτωση μιας δύσκαμπτης ανωδομής τα φορτία μπορούν να υπολογιστούν με την προϋπόθεση ότι οι καθιζήσεις πρέπει, να βρίσκονται σε ένα αποδεκτό επίπεδο. Αυτό ισχύει μέχρι την οριακή κατάσταση αστοχίας. Υπάρχει η δυνατότητα να αγνοηθούν οι καθιζήσεις στην περίπτωση, όπου η θεμελίωση είναι αρκετά δύσκαμπτη ή το υποκείμενο έδαφος είναι πολύ στιβαρό. Επομένως, δεν απαιτείται καμία τροποποίηση στα μεταβιβαζόμενα από την ανωδομή φορτία. Η δυσκαμψία του συστήματος μπορεί να προσδιοριστεί με συγκριτική ανάλυση της συνδυαζόμενης δυσκαμψίας K_R της θεμελίωσης, της ανωδομής και του εδάφους. Μέσω αυτής της δυσκαμψίας θα καθοριστεί αν η θεμελίωση ή το σύστημα θεωρούνται εύκαμπτα ή δύσκαμπτα.

Τα αποτελέσματα της αλληλεπίδρασης εδάφους - θεμελίωσης - κατασκευής είναι ευεργετικά, για τις περισσότερες κατασκευές. Όμως, εξαιτίας του ότι μειώνουν τις καμπτικές ροπές και τις τέμνουσες δυνάμεις σε διάφορα μέλη της ανωδομής, η επίδραση τους μπορεί να είναι επιβαρυντική. Πρέπει λοιπόν, να υπολογίζονται, για τις κατασκευές που αναφέρονται στο Μέρος 5 του Ευρωκώδικα 8. Εκεί αναφέρεται ότι η αλληλεπίδραση εδάφους – κατασκευής θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη σε περιπτώσεις, όπου τα φαινόμενα P-δ παίζουν σημαντικό ρόλο, σε κατασκευές με ογκώδη ή βαθιά εγκιβωτισμένη θεμελίωση, σε κατασκευές μεγάλου ύψους με σημαντικό λόγο ύψους/πλάτους καθώς και σε περιπτώσεις, όπου το έδαφος θεμελίωσης αποτελείται από πολύ μαλακούς σχηματισμούς (π.χ., εδάφη τύπου S1). Για αυτές τις περιπτώσεις επισημαίνεται μεταξύ άλλων ότι ο μηχανισμός απόσβεσης λόγω ακτινοβολίας των σεισμικών κυμάτων θα πρέπει, να λαμβάνεται υπόψη κατά

Κεφάλαιο 4^ο - Δυναμική Αλληλεπίδραση Εδάφους-Θεμελίωσης-Κατασκευής

τον καθορισμό των εδαφικών ιδιοτήτων, ξεχωριστά από τη υστερητική απόσβεση λόγω μη-γραμμικής εδαφικής δράσης.

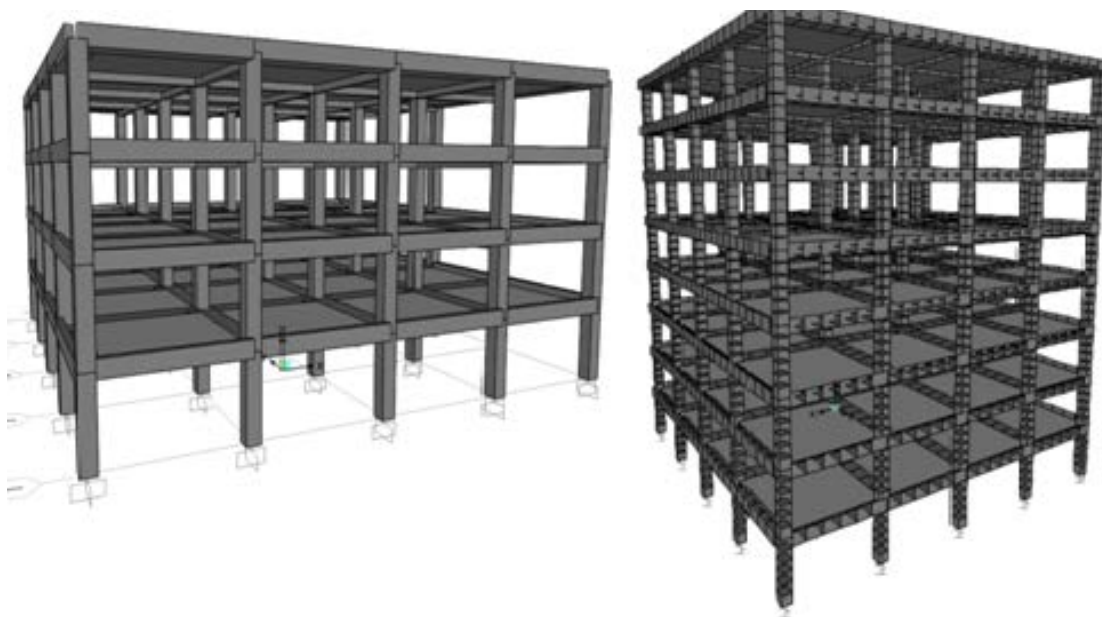
Κεφάλαιο 5^ο

Περιγραφή Προσομοίωσης

5.1 Περιγραφή Κτιρίων

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, θα εξεταστεί η στατική και σεισμική επάρκεια δυο κτιρίων, έτσι ώστε να αξιολογηθεί η υφιστάμενη κατάστασή τους. Στην συνέχεια, θα πραγματοποιηθεί αριθμητική διερεύνηση, για την επίδραση «πράσινου» δώματος εντατικού τύπου στην κατασκευή.

Στην ακόλουθη αριθμητική διερεύνηση, μελετήθηκε ένα τυπικό κτίριο σε δύο διαφορετικά ύψη κι εδάφη θεμελίωσης, με και χωρίς προσθήκη «πράσινου» δώματος σε καθένα εξ αυτών, στην εκάστοτε περίπτωση. Σε όλες τις παρακάτω περιπτώσεις η κάτοψη είναι ορθογωνική, διαστάσεων 20m*20m. Το κατακόρυφο σύστημα στήριξης των κτιρίων αποτελείται από υποστυλώματα. Κατά μήκος των αξόνων x,y υπάρχουν τέσσερα ανοίγματα των 5m και το ύψος κάθε ορόφου είναι 3m. Παρακάτω απεικονίζεται ενδεικτικά η πρώτη εκδοχή «Κτίριο τεσσάρων ορόφων χωρίς «πράσινο» δώμα, σε έδαφος θεμελίωσης Α» (Εικόνα 5.1).



Εικόνα 5.1: Κτίρια τεσσάρων ορόφων και οκτώ ορόφων χωρίς «πράσινο» δώμα, σε έδαφος θεμελίωσης Α.

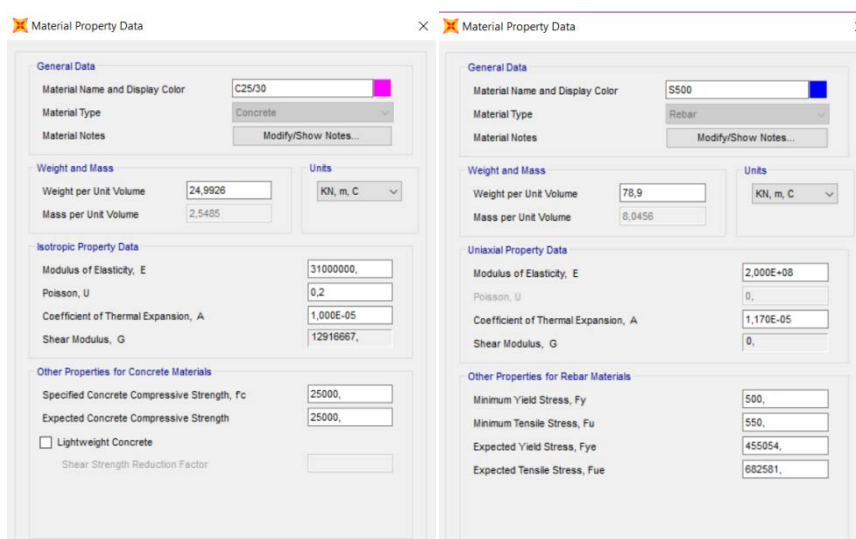
Πιο συγκεκριμένα, οι περιπτώσεις που εξετάστηκαν είναι οι εξής:

- I. Κτίριο τεσσάρων ορόφων χωρίς «πράσινο» δώμα, σε έδαφος θεμελίωσης A.
- II. Κτίριο τεσσάρων ορόφων χωρίς «πράσινο» δώμα, σε έδαφος θεμελίωσης D.
- III. Κτίριο τεσσάρων ορόφων με «πράσινο» δώμα, σε έδαφος θεμελίωσης A.
- IV. Κτίριο τεσσάρων ορόφων με «πράσινο» δώμα, σε έδαφος θεμελίωσης D.
- V. Κτίριο οκτώ ορόφων χωρίς «πράσινο» δώμα, σε έδαφος θεμελίωσης A.
- VI. Κτίριο οκτώ ορόφων χωρίς «πράσινο» δώμα, σε έδαφος θεμελίωσης D.
- VII. Κτίριο οκτώ ορόφων με «πράσινο» δώμα, σε έδαφος θεμελίωσης A.
- VIII. Κτίριο οκτώ ορόφων με «πράσινο» δώμα, σε έδαφος θεμελίωσης D.

5.1.2 Περιγραφή των Υλικών –Μηχανικές Παράμετροι

Η ποιότητα του σκυροδέματος που χρησιμοποιήθηκε, για την κατασκευή του φέροντος οργανισμού, του υπό μελέτη κτιρίου είναι C25/30 με μέτρο ελαστικότητας $E_c = 31 \text{ GPa}$. Το ειδικό βάρος του οπλισμένου σκυροδέματος είναι 25 kN/m^3 και η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος είναι $f_c = 28 \text{ MPa}$. Όσον αφορά στην ποιότητα του χάλυβα, στην παρούσα μελέτη χρησιμοποιήθηκε χάλυβας S500 με όριο διαρροής $f_y = 500 \text{ MPa}$ και το μέτρο ελαστικότητας λαμβάνεται ως $E_s = 200 \text{ GPa}$.

Τα υλικά καθώς και οι μηχανικές τους ιδιότητες υπάρχουν αποθηκευμένα στο λογισμικό SAP2000 (εικ.5.2), οπότε αρκεί απλά η εισαγωγή τους μέσω της εντολής Define→Materials → Add new Material .



Εικόνα 5.2: ιδιότητες των υλικών (σκυροδέματος και χάλυβα) στο SAP2000.

5.1.3 Περιγραφή των Διατομών

Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της κατασκευής είναι τα εξής: η διατομή των εξωτερικών δοκών είναι μορφής T με ύψος 0.6m, συνεργαζόμενο πλάτος 1.20m, πάχος πλάκας 0.17m και πάχος του κορμού της δοκού 0.25m (Εικόνα 5.3α). Ενώ, η διατομή των δοκών εσωτερικά είναι της μορφής Γ με τις ίδιες διαστάσεις της διατομής T με διαφορετικό το συνεργαζόμενο πλάτος ίσο με 0.9m, (Εικόνα 5.3β). Τα υποστυλώματα σε ολόκληρη την κατασκευή έχουν ορθογωνική διατομή με διαστάσεις 0.5m*0.5m (Εικόνα 5.3γ).

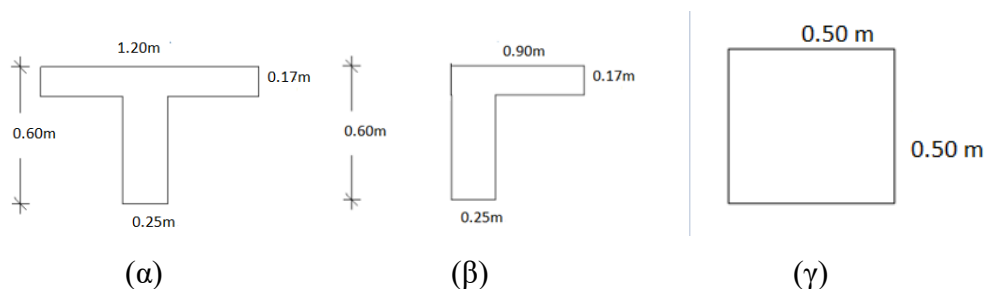
Η εισαγωγή των δεδομένων έγινε ακολουθώντας την παρακάτω σειρά εντολών :

1. Για τις δοκούς

Define → *Section Properties* → *Frame Section* → *Add New Property* → *Steel* → *Tee* (μορφής T) κι αντίστοιχα *Angle*, για τις διατομές μορφής Γ

2. Για τα υποστυλώματα

Define → *Section Properties* → *Frame Section* → *Add New Property* → *Concrete* → *Rectangular*



Εικόνα 5.3: Απεικόνιση διατομών (α) Εσωτερικές δοκοί, (β) Υποστυλώματα και (γ) Περιμετρικές δοκοί.

5.2 Καθορισμός Φορτίσεων

Όλα τα στοιχεία της κατασκευής (πλάκες, δοκοί κι υποστυλώματα) επιβαρύνονται με στατικά φορτία, ομοιόμορφα κατανεμημένα, τα οποία υπολογίζονται μέσω των γεωμετρικών χαρακτηριστικών κάθε στοιχείου και του σκυροδέματος που χρησιμοποιήθηκε, όπως φαίνεται παρακάτω. Ο τρόπος που θα εφαρμοστούν οι φορτίσεις στην κατασκευή, θα γίνει μέσω της δυνατότητας που παρέχει το πρόγραμμα SAP200, να κατανεμηθούν στα επιμέρους στοιχεία που την απαρτίζουν ως κατανεμημένα φορτία. Τα παρακάτω μόνιμα και κινητά φορτία θα χρησιμοποιηθούν για να υπολογιστεί η μάζα που θα εφαρμοστεί.

Υπολογισμός κατακόρυφων φορτίων :

Το ειδικό βάρος του οπλισμένου σκυροδέματος έχει την τιμή $25 \text{ kN}/\text{m}^3$:

Πλάκες

→ πάχος πλάκας 0,17m:

$$G_{\text{πλάκας}} = 25 \text{ kN}/\text{m}^3 * 0,17 \text{ m} = 4,25 \text{ kN}/\text{m}^2$$

→ Τιμή φορτίου επίστρωσης : $G_{\text{επίστρωσης}} = 1,5 \text{ kN}/\text{m}^2$

$$G_{\text{ολικό πλάκας}} = 4,25 \text{ kN}/\text{m}^2 + 1,5 \text{ kN}/\text{m}^2 = 5,75 \text{ kN}/\text{m}^2$$

Δοκοί

→ Ύψος δοκού $Y=0,53$ & πλάτος δοκού $\Pi=0,25$:

$$G_{\text{δοκού}} = 25 \text{ kN}/\text{m}^2 * 0,25 \text{ m} * 0,53 = 3,31 \text{ kN}/\text{m}$$

Υποστυλώματα

→ Υποστυλωμάτων $0,5*0,5$:

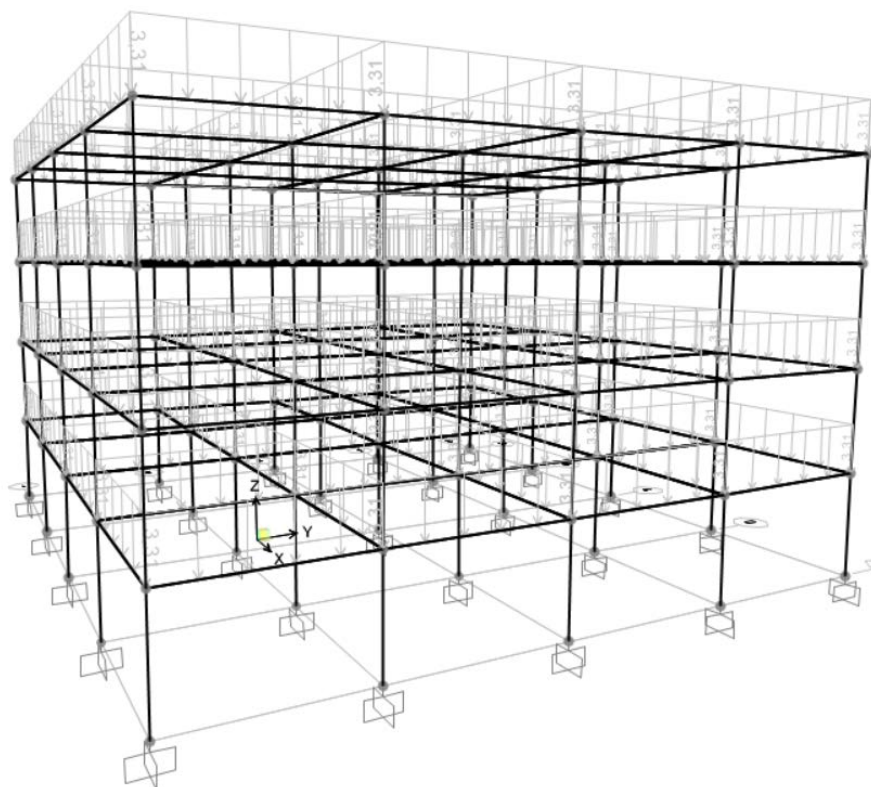
$$G_{\text{υποστυλωμάτων}} = 25 \text{ kN}/\text{m}^2 * 0,5 \text{ m} * 0,5 = 6,25 \text{ kN}/\text{m}$$

Κινητό φορτίο: $Q = 2 \text{ kN}/\text{m}^2$.

Μόνιμα φορτία	Τιμές
Ειδικό βάρος σκυροδέματος	$25 \text{ kN}/\text{m}^2$
Πλάκες	$4,25 \text{ kN}/\text{m}^2$
Δοκοί	$3,31 \text{ kN}/\text{m}$
Υποστυλώματα	$6,25 \text{ kN}/\text{m}$
Επικάλυψη των δαπέδων	$1,5 \text{ kN}/\text{m}^2$
Γενικό μεταβλητό φορτίο	$2 \text{ kN}/\text{m}^2$

Πίνακας 5.1: Συγκεντρωτικός πίνακας φορτίων κάθε μέλους.

Αφού υπολογίστηκαν τα μόνιμα φορτία, τοποθετούνται και στατικά φορτία ως κατανεμημένα, στα μέλη της κατασκευής. Στο λογισμικό τα κατανεμημένα φορτία εισάγονται με την σειρά εντολών *Assign → Frame Load → Distributed*.



Εικόνα 5.4: απεικόνιση κατανεμημένων φορτίων στις δοκούς.

5.2.1 Φορτίσεις λόγω φυτεμένου δώματος

Στην παρούσα μελέτη θα προστεθεί «πράσινο» δώμα σε όλη την επιφάνεια του τελευταίου ορόφου της κατασκευής. Το επιπλέον δώμα θα είναι εντατικού τύπου. Ο λόγος που χρησιμοποιήθηκε αυτός ο τύπος φυτεμένου δώματος είναι, γιατί απαραίτητη προϋπόθεση εγκατάστασής του είναι η εκπόνηση στατικής μελέτης του υφιστάμενου κτιρίου.

Ο εντατικός τύπος είναι ένα σύστημα υποδομής και υπόστρωμα ανάπτυξης ύψους 15cm έως 150cm, με κορεσμένο φορτίο 280kg/m^2 . Η «πράσινη» στέγη εντατικού τύπου απαιτεί τακτική συντήρηση (άρδευση, λίπανση κ.λπ.) και περιλαμβάνει ποικιλία φυτών, μικρών δέντρων και θάμνων. Επίσης, μπορεί να υποστηρίξει μονοπάτια, στοιχεία νερού και συστήματα σκίασης.

Τα υλικά κατασκευής είναι :

- i. διαχωριστική μεμβράνη,
- ii. μεμβράνη αντιριζικής προστασίας,
- iii. υπόστρωμα προστασίας και συγκράτησης υγρασίας,
- iv. αποστραγγιστική αποθηκευτική στρώση,
- v. διηθητικό φύλλο συγκράτησης υποστρώματος ανάπτυξης,
- vi. υπόστρωμα ανάπτυξης φυτών,
- vii. βλάστηση.

Το συνολικό βάρος της κατασκευής του πράσινου δώματος είναι 280 kg/m^2 . Το επιπλέον βάρος από το πράσινο δώμα θα εφαρμοστεί στην οροφή της κατασκευής, ως κατανεμημένο φορτίο:

$$W_{GREEN ROOF} = 280 \text{ kg/m}^2 = 2,75 \text{ kN/m}^2$$

και θα προστεθεί στο ήδη υπάρχον μόνιμο φορτίο των πλακών και των δοκών. Τα νέα μόνιμα φορτία που προκύπτουν υπολογίζονται ως εξής:

Πλάκες :

$$G'_{ολικ \acute{o} \text{ πλάκας}} = G_{\text{πλάκας}} + G_{\text{επίστρωσης}} + G_{\text{green roof}}$$

$$G'_{ολικ \acute{o} \text{ πλάκας}} = 4,75 \text{ kN/m}^2 + 1,5 \text{ kN/m}^2 + 5,75 \text{ kN/m}^2 = 8,5 \text{ kN/m}^2$$

Δοκοί:

$$G'_{ολικ \acute{o} \text{ δοκ \acute{o} ν}} = G_{\text{δοκ \acute{o} ν}} + G_{\text{green roof}}$$

$$G'_{ολικ \acute{o} \text{ δοκ \acute{o} ν}} = 3,31 \text{ kN/m} + 2,75 \text{ kN/m}^2 * 1,20 \text{ m} = 6,61 \text{ kN/m}^2$$

Τα καινούργια φορτία εισάγονται ως κατανεμημένα με τον ίδιο τρόπο που περιγράφεται στην παράγραφο 5.2.

5.3 Διαφραγματική λειτουργία

Στον φορέα που μελετάμε, αναφέρεται ότι στο επίπεδο της δοκού νοείται όροφος με πλάκα οπλισμένου σκυροδέματος. Οι πλάκες θεωρείται ότι προσφέρουν διαφραγματική λειτουργία. Έτσι, επιτυγχάνεται ευνοϊκότερη σεισμική συμπεριφορά

καθώς οι πλάκες πρακτικά μένουν απαραμόρφωτες στο επίπεδό τους. Μ' αυτόν τον τρόπο οι σχετικές μετακινήσεις των συνεπιπέδων της κάθε πλάκας είναι μηδενικές.

Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, οι αδρανειακές δυνάμεις οι οποίες παράγονται κατά κύριο λόγο από την μάζα των πλακών, να κατανέμονται στα κατακόρυφα στοιχεία βάσει δυσκαμψιών τους, αφού οι μετακινήσεις είναι κοινές. Η διαφραγματική λειτουργία περιγράφεται στο Ευρωκώδικα 8, όπου αναφέρεται ότι ο φορέας αποτελείται από σύστημα ανάληψης κατακόρυφων και οριζόντιων φορτίων, που συνδέονται μεταξύ τους με οριζόντια διαφράγματα.

Η διαφραγματική λειτουργία μπορεί να ληφθεί με αυτοματοποιημένο τρόπο στο SAP200, δίνοντας την ιδιότητα διαφράγματος στους κόμβους που αποτελούν τον κάθε όροφο. Η παραπάνω διαδικασία πραγματοποιείται αφού επιλεγούν όλοι οι κόμβοι του ορόφου, που συμμετέχουν στο διάφραγμα (κόμβοι δοκών). Με την σειρά εντολών *Assign→Joints →Constraints→Diaphragm* ορίζεται το διάφραγμα γύρω από τον κάθετο στην πλάκα άξονα, που είναι ο z. Στην παρούσα κατασκευή ορίζεται ξεχωριστό διάφραγμα στον κάθε όροφο, ενεργοποιώντας την εντολή *Assign a different diaphragm constraint to each different selected Z level*. Η ίδια διαδικασία εφαρμόζεται και για τον τοπικό άξονα x.

5.4 Προσομοίωση Αλληλεπίδρασης Εδάφους – Κατασκευής

Για την προσομοίωση της θεμελίωσης της κατασκευής επιλέχθηκε η χρήση ελαστικών στηρίξεων και πακτώσεων στην βάση, ώστε να αποτυπώνουν με όσο το δυνατόν ακριβέστερο τρόπο την αλληλεπίδραση εδάφους – κατασκευής, όπως ορίζεται στην παρούσα μελέτη. Τοποθετήθηκαν έτσι μετακινησιακά ελατήρια, ώστε να εξασφαλίσουν την κατακόρυφη μετακίνηση, που ενεργεί επί της θεμελίωσης.

Θεωρώντας το έδαφος θεμελίωσης κατηγορίας D χαλαρή άργιλο, με βάση τον Ευρωκώδικα ορίζεται ως «*αποθέσεις χαλαρών έως μετρίως χαλαρών μη συνεκτικών υλικών ή κυρίως μαλακά έως μετρίως σκληρά συνεκτικά υλικά*».

Για την συγκεκριμένη προσομοίωση, θα υπολογιστούν οι ελατηριακές σταθερές με χρήση της τιμής του δείκτη εδάφους K_s με την διαδικασία που προτάθηκε από τον Terzaghi (1955). Ο δείκτης εδάφους κυμαίνεται από 10000 kN/m^3 - 30000 kN/m^3 και στην παρούσα εργασία λαμβάνεται ίσος με $k_s = 20000 \text{ kN/m}^3$. Έτσι, τοποθετούνται ελατήρια στις τρεις διευθύνσεις, η δυσκαμψία των οποίων προκύπτει από τις εξισώσεις:

$$K_z = K_s \cdot L \cdot B \quad (5.1)$$

$$K_{r,L} = K_s \cdot \frac{B^3 \cdot L}{12} \quad (5.2)$$

$$K_{r,B} = K_s \cdot \frac{L^3 \cdot B}{12} \quad (5.3)$$

Επομένως, για τετραγωνική διατομή πεδילוδοκού προκύπτουν οι τιμές στους Πίνακες 5.2 και 5.3.

Πέδιλα	Τετραώροφο	Οκταώροφο
Μήκος (L)	1,5m	3,00m
Πλάτος (B)	1,5m	3,00m

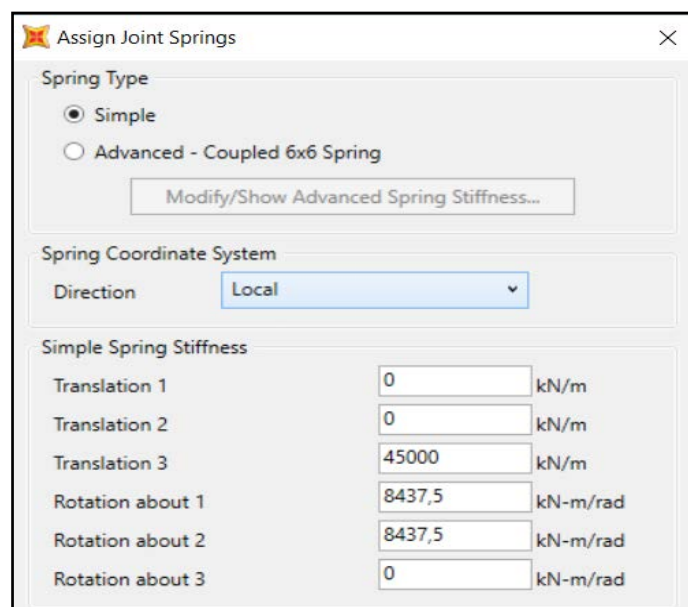
Πίνακας 5.2: Γεωμετρία τετραγωνικών των πεδύλων.

	A(m ²)	K _s (kN/m ³)	K _z (kN/m)	K _{r,L} (kN/m)	K _{r,B} (kN/m)
Τετραώροφο	2,25	20.000	45.000	8.437,5	8.437,5
Οκταώροφο	9	20.000	180.000	135.000	135.000

Πίνακας 5.3: Υπολογισμός τιμών δυσκαμψιών ελαστικών στηρίξεων

Η τοποθέτηση των ελαστικών στηρίξεων στο προσομοίωμα γίνεται με τις εντολές:

Assign→ Joint →Springs



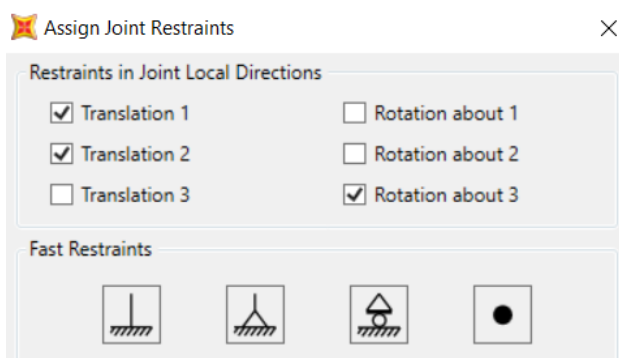
Εικόνα 5.5: Ορισμός κατακόρυφων ελαστικών στηρίξεων στο SAP2000.

Ταυτόχρονα, όμως, η στάθμη θεμελίωσης δεσμεύτηκε κατά την οριζόντια μετακίνηση τόσο στην διεύθυνση x όσο και στην y. Με την χρήση ενός περιορισμού

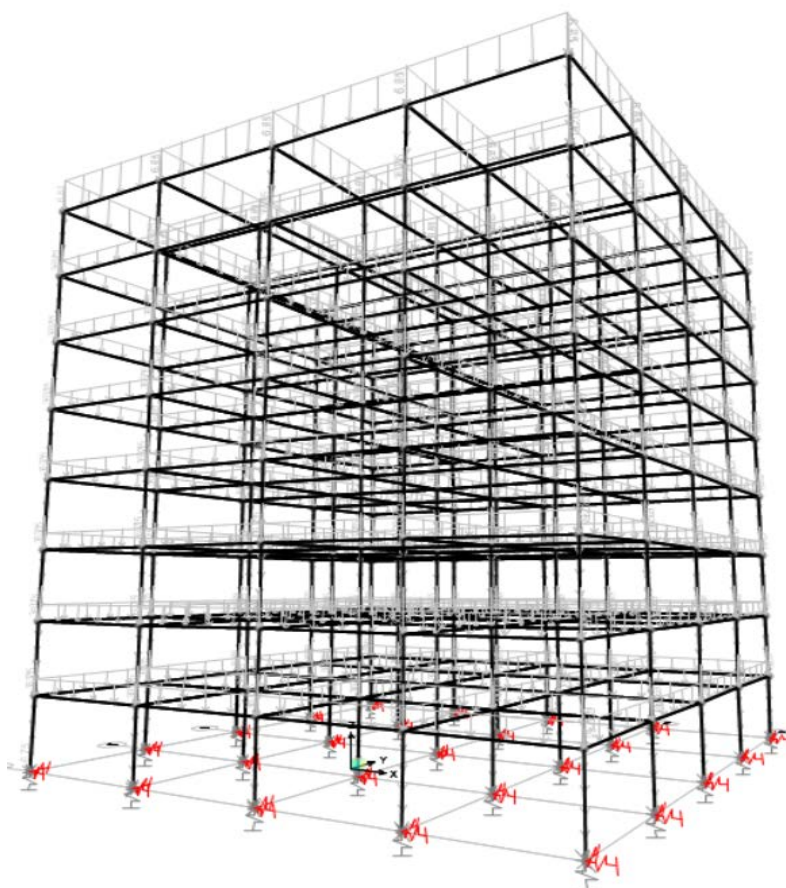
οριζόντιας κίνησης ενός εκ των κόμβων θεμελίωσης, ούτως ή αλλιώς η δέσμευση και των υπόλοιπων κόμβων ισχύει, από την στιγμή που έχει οριστεί διαφραγματική λειτουργία της στάθμης.

Η εισαγωγή της δέσμευσης στο λογισμικό του SAP2000 πραγματοποιείται επιλέγοντας τους κόμβους θεμελίωσης κι ακολουθώντας τις εντολές :

Assign→ Joint →Restraints



Εικόνα 5.6: Ορισμός δέσμευσης κόμβου θεμελίωσης στο SAP2000.



Εικόνα 5.7: Απεικόνιση οκταόροφου κτιρίου με τα ελατηρία και τα καταναμημένα φορτία.

Κεφάλαιο 6^ο

Αριθμητική διερεύνηση

6.1 Ιδιομορφική ανάλυση

Για την επίλυση δυναμικών προβλημάτων είναι συνήθως απαραίτητος ο προσδιορισμός της θεμελιώδους ιδιοπεριόδου της κατασκευής. Στα δυναμικά φαινόμενα, όπως είναι ο σεισμός, τα δεδομένα μεταβάλλονται συναρτήσει του χρόνου. Επομένως, μόνο η προσέγγιση του προβλήματος είναι δυνατή καθώς μοναδική και ακριβής λύση δεν υπάρχει.

Με την ιδιομορφική ανάλυση μετατρέπεται η απόκριση ενός πολυβάθμιου συστήματος σε άθροισμα αποκρίσεων μονοβάθμιων ταλαντωτών. Αυτό σε συνδυασμό με τα φάσματα σχεδιασμού μας βοηθά να υπολογίσουμε, με ικανοποιητική προσέγγιση, μετακινήσεις/παραμορφώσεις και κατ' επέκταση τις τάσεις, που προκύπτουν από δυναμικά φαινόμενα, όπως ο σεισμός. Με τη σύγκριση των αρχικών ιδιοπεριόδων μπορεί να γίνει ένας προσεγγιστικός έλεγχος της απόκρισης της κατασκευής.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, πραγματοποιείται ιδιομορφική ανάλυση, για τον προσδιορισμό της θεμελιώδους ιδιοπεριόδου της κατασκευής. Ο προσδιορισμός της θεμελιώδους ιδιοπεριόδου είναι απαραίτητη προϋπόθεση, για να είναι δυνατός ο προσδιορισμός των μη-γραμμικών δυναμικών αναλύσεων.

Οι ιδιομορφικές αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν στο SAP2000, για το αρχικό κτίριο σε βράχο, δηλαδή «έδαφος» κατηγορίας A και μαλακό έδαφος κατηγορίας D σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 8. Παρομοίως και για το κτίριο που προστέθηκε το «πράσινο» δώμα. Στο πρόγραμμα SAP2000 η ιδιομορφική ανάλυση του συστήματος καθώς κι ο υπολογισμός των ιδιοπεριόδων εκτελούνται αυτόματα από το λογισμικό. Αρχικά, ορίζεται νέα φορτιστική κατάσταση, με το όνομα *MODAL* τύπου *Modal* και πραγματοποιείται με την εντολή *Define → Load Case → Add New Load Case* (Εικόνα 6.1). Η ταλαντούμενη μάζα της κατασκευής προέκυψε από τα κατακόρυφα φορτία σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 8, όπως αναφέρεται στο Κεφάλαιο 3.

Load Case Data - Modal

Load Case Name: MODAL

Load Case Type: Modal

Stiffness to Use: ☒ Zero Initial Conditions - Unstressed State

Type of Modes: ☒ Eigen Vectors

Number of Modes: Maximum Number of Modes: 12, Minimum Number of Modes: 1

Mass Source: MSSSRC1

Other Parameters: Frequency Shift (Center): 0, Cutoff Frequency (Radius): 0, Convergence Tolerance: 1,000E-09

Buttons: OK, Cancel

Εικόνα 6.1: Καθορισμός συνθηκών ιδιομορφικής ανάλυσης στο SAP2000.

Mass Source Data

Mass Source Name: Mass

Mass Source: ☒ Specified Load Patterns

Mass Multipliers for Load Patterns

Load Pattern	Multiplier
G	1,
G	1,
Q	0,3

Buttons: Add, Modify, Delete

Εικόνα 6.2: Ορισμός της μάζας της κατασκευής στο SAP2000.

6.1.1 Αποτελέσματα ιδιομορφικής ανάλυσης

Οι προκύπτουσες ιδιοπερίοδοι για το τετραόροφο και το οκταόροφο καθώς και τα αντίστοιχα ποσοστά ιδιομορφικών μαζών των κτιρίων, που εξετάστηκαν, για κάθε ιδιομορφή και διεύθυνση παρουσιάζονται στους Πίνακες 6.1 έως 6.8.

StepNum	Period	UX
Unitless	Sec	Unitless
1	0.362986	0.85806
2	0.118381	0.09999
3	0.070014	0.03317
4	0.052235	0.00877

Πίνακας 6.1: Κτίριο τεσσάρων ορόφων χωρίς «πράσινο» δώμα σε έδαφος Α.

StepNum	Period	UX
Unitless	Sec	Unitless
1	0.402386	0.85741
2	0.126587	0.10084
3	0.072085	0.03311
4	0.052583	0.00864

Πίνακας 6.2: Κτίριο τεσσάρων ορόφων με «πράσινο» δώμα σε έδαφος Α.

StepNum	Period	UX	UY	UZ
Unitless	Sec	Unitless	Unitless	Unitless
1	0.49861	37.733049	-1.051E-13	-3.298E-14
2	0.333817	1.27E-13	27.640417	-4.406E-13
3	0.230387	-5.599E-14	-3.124E-13	-38.891452
4	0.142726	7.322712	5.848E-14	-1.274E-13

Πίνακας 6.3: Κτίριο τεσσάρων ορόφων χωρίς «πράσινο» δώμα σε έδαφος D.

StepNum	Period	UX	UY	UZ
Unitless	Sec	Unitless	Unitless	Unitless
1	0.541301	39.875336	-1.113E-13	-7.748E-14
2	0.366748	1.366E-13	30.068873	-4.279E-13
3	0.243672	-9.338E-14	-3.112E-13	-41.134111
4	0.153875	-8.074499	-4.456E-14	9.277E-14

Πίνακας 6.4: Κτίριο τεσσάρων ορόφων με «πράσινο» δώμα σε έδαφος D.

Κεφάλαιο 6^ο Αριθμητική διερεύνηση

StepNum	Period	UX	UY	UZ
Unitless	Sec	Unitless	Unitless	Unitless
1	0.718238	0.83128	0	0
2	0.366095	0	0.85585	2.253E-19
3	0.272674	0	0	0
4	0.238101	0.09509	0	1.535E-20

Πίνακας 6.5: Κτίριο οκτώ ορόφων χωρίς «πράσινο» δώμα σε έδαφος Α.

StepNum	Period	UX	UY	UZ
Unitless	Sec	Unitless	Unitless	Unitless
1	0.759844	0.83055	0	0
2	0.406102	0	0.85524	5.081E-19
3	0.300747	0	0	0
4	0.250369	0.09557	5.201E-20	1.212E-19

Πίνακας 6.6: Κτίριο οκτώ ορόφων με «πράσινο» δώμα σε έδαφος Α.

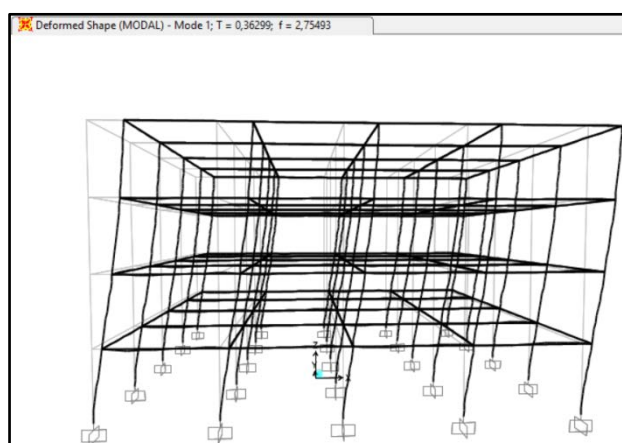
StepNum	Period	UX	UY	UZ
Unitless	Sec	Unitless	Unitless	Unitless
1	0.765133	0.86986	0	0
2	0.499482	0	0.78709	0
3	0.272674	0	1.661E-20	0
4	0.252563	0.08661	0	0

Πίνακας 6.7: Κτίριο οκτώ ορόφων χωρίς «πράσινο» δώμα σε έδαφος D.

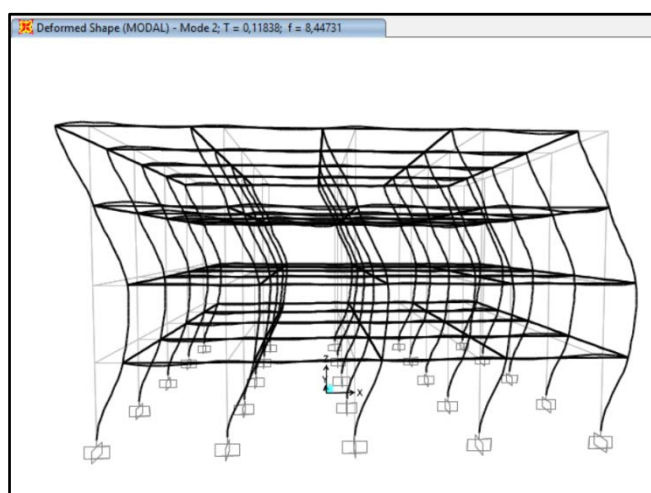
StepNum	Period	UX	UY	UZ
Unitless	Sec	Unitless	Unitless	Unitless
1	0,806847	0,8676	0	0
2	0,545632	0	0,78527	0
3	0,300747	0	0	0
4	0,265164	0,0878	0	2,622E-20

Πίνακας 6.8: Κτίριο οκτώ ορόφων με «πράσινο» δώμα σε έδαφος D.

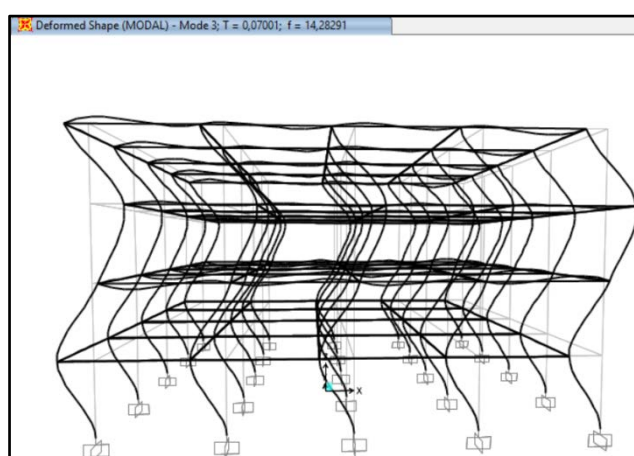
Οι πρώτες τρεις ιδιομορφές για το κτίριο των τεσσάρων ορόφων χωρίς «πράσινο» δώμα σε έδαφος Α απεικονίζονται στις Εικόνες 6.3 έως 6.5. Όμοιως, οι πρώτες τρεις ιδιομορφές για το κτίριο των οκτώ ορόφων χωρίς «πράσινο» δώμα σε έδαφος Α παρουσιάζονται στις Εικόνες 6.6 έως 6.8.



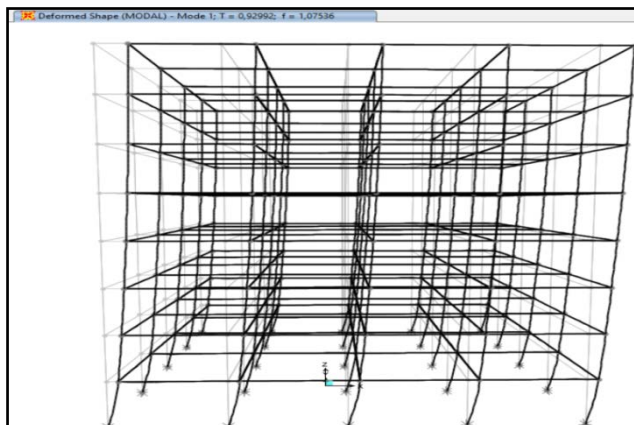
Εικόνα 6.3: 1η Ιδιομορφή με $T=0,36s$ (Μετακίνηση κατά x).



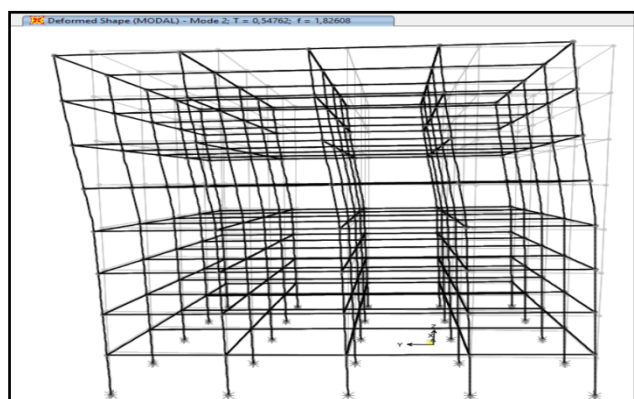
Εικόνα 6.4: 2η ιδιομορφή με $T= 0,118s$ (Μετακίνηση κατά y).



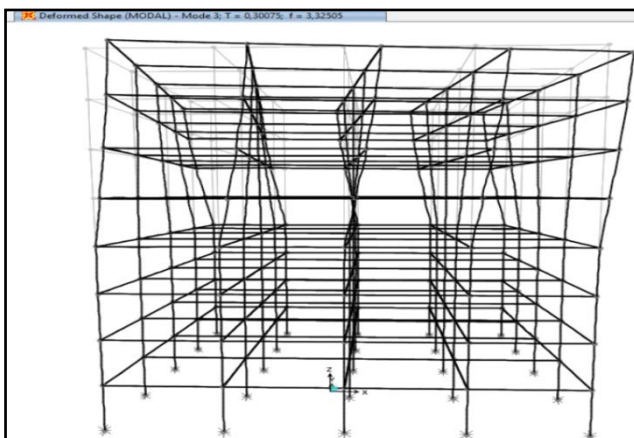
Εικόνα 6.5: 3η ιδιομορφή με $T= 0,070s$ (Στροφική).



Εικόνα 6.6: 1η Ιδιομορφή με $T=0,92s$ (Μετακίνηση κατά x).



Εικόνα 6.7: 2η Ιδιομορφή με $T=0,54s$ (Μετακίνηση κατά y).



Εικόνα 6.8: 3η Ιδιομορφή με $T=0,30s$ (Στροφική).

6.2 Δυναμική Μη-γραμμική Ανάλυση

Η μη-γραμμική ανάλυση χρονοϊστορίας αποτελεί τη δεύτερη από τις κατηγορίες μη-γραμμικών αναλύσεων των κατασκευών. Με την πάροδο του χρόνου και με την εξέλιξη σε διάφορους τομείς της τεχνολογίας, οι αναλύσεις αυτές έχουν κερδίσει έδαφος τόσο σε ερευνητικό επίπεδο όσο και στην πράξη στον σχεδιασμό κατασκευών.

Στη δυναμική ανελαστική ανάλυση χρησιμοποιείται ένα προσομοίωμα του φορέα, το οποίο ενσωματώνει ανελαστικούς νόμους φορτίου - παραμόρφωσης για τα επιμέρους δομικά στοιχεία του κτιρίου. Στον φορέα εφαρμόζεται σεισμική φόρτιση, με την μορφή επιταχυνσιογραφημάτων εδαφικών κινήσεων, από όπου υπολογίζεται μέσω επαναληπτικής διαδικασίας, η απόκριση του φορέα.

Τα αποτελέσματα της μεθόδου θα πρέπει να ελέγχονται σε κάθε περίπτωση κι αν κρίνεται απαραίτητο να μειώνεται το χρονικό βήμα της ολοκλήρωσης. Μ' αυτόν τον τρόπο είναι δυνατό να μειωθούν κάποιοι παράγοντες, όπως για παράδειγμα η απότομη μείωση της δυσκαμψίας από ένα βήμα στο επόμενο, που επηρεάζουν την ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Η διόρθωση της λύσης σε κάθε χρονικό βήμα γίνεται, μέσω της επαναληπτικής διαδικασίας σύγκλισης Newton - Raphson.

Η δυναμική μη-γραμμική ανάλυση χρονοϊστορίας εξαρτάται από δυο παράγοντες. Πρώτον, από την εξιδανίκευση του φορέα, δηλαδή την ορθή και αξιόπιστη προσομοίωση της μη-γραμμικής συμπεριφοράς του. Δεύτερον, από την επιλογή του επιταχυνσιογραφήματος, που θα χρησιμοποιηθεί. Το τελευταίο απαιτεί καλή γνώση της αναμενόμενης σεισμικής κίνησης στο σημείο στο οποίο εδράζεται η κατασκευή. Το στοιχείο αυτό δεν είναι εύκολο να προσδιοριστεί, παρά μόνο πιθανοτικά.

Τα υπολογιζόμενα εντατικά μεγέθη του φορέα αποτελούν ορθολογικές προσεγγίσεις των αναμενόμενων μεγεθών κατά την διάρκεια του σεισμού. Αυτό συμβαίνει, γιατί το μοντέλο προσομοίωσης κι η μεθοδολογία προσεγγίζουν με μεγάλη αμεσότητα την ανελαστική απόκριση του φορέα κατά την διάρκεια του σεισμικού φαινομένου.

Επομένως, η δυναμική ανελαστική ανάλυση χρονοϊστορίας μπορεί να εφαρμοστεί, χωρίς περιορισμούς σε οποιονδήποτε φορέα ή έδαφος θεμελίωσης. Παρόλα αυτά η απόκριση της κατασκευής ενδέχεται να είναι ιδιαίτερα ευαίσθητη,

Κεφάλαιο 6^ο Αριθμητική διερεύνηση

στα χαρακτηριστικά των συγκεκριμένων επιταχυνσιογραφημάτων που χρησιμοποιούνται.

Συνεπώς, η ανάλυση χρονοϊστορίας πρέπει να επαναλαμβάνεται για περισσότερες από μια εδαφικές διεγέρσεις κι από ένα πλήθος σεισμών κι άνω (>7) να υπολογίζονται οι μέσες αποκρίσεις. Εξ αιτίας αυτού, τα επιταχυνσιογραφήματα που χρησιμοποιήθηκαν είναι κατάλληλα επιλεγμένες φυσικές καταγραφές, συμβατά με τα φάσματα σχεδιασμού.

Όμως, αν κι η ανελαστική δυναμική ανάλυση χρονοϊστορίας είναι η ακριβέστερη μέθοδος ανάλυσης, χρησιμοποιείται σε περιορισμένο βαθμό στο σχεδιασμό των κατασκευών, λόγω του μεγάλου υπολογιστικού κόστους, της ανάγκης προσεκτικής επιλογής επιταχυνσιογραφημάτων και της δυσκολίας στην επεξεργασία του μεγάλου όγκου των εξαγόμενων αποτελεσμάτων.

Χρησιμοποιείται κυρίως για ερευνητικούς σκοπούς ως σημείο αναφοράς κι εργαλείο αξιολόγησης της ακρίβειας των αποτελεσμάτων των υπόλοιπων μεθόδων ανάλυσης και κατά κύριο λόγο, της ανελαστικής στατικής μεθόδου. Σε ειδικές περιπτώσεις παρόλα αυτά χρησιμοποιείται μόνο επιβαρυντικά έναντι της αντίστοιχης φασματικής μεθόδου.

Στο παρόν κεφάλαιο της αριθμητικής διερεύνησης εκτελέσθηκε δυναμική μη-γραμμική ανάλυση στις διαφορετικές περιπτώσεις των εξεταζόμενων κατασκευών, όπως αναφέρονται στο Κεφάλαιο 5. Ομοίως, πραγματοποιήθηκε δυναμική μη-γραμμική ανάλυση και στα κτίρια όταν είχε προστεθεί το «πράσινο» δώμα. Σε όλες τις περιπτώσεις έγινε εφαρμογή επτά σεισμικών καταγραφών, οι οποίοι επιλέχθηκαν από τη βάση δεδομένων PEER του πανεπιστημίου Berkeley.

6.2.1 Σεισμικές καταγραφές

Οι σεισμοί επιβάλλουν πρόσθετα δυναμικά φορτία στις κατασκευές. Η σεισμική καταπόνηση είναι συνήθως μικρής διάρκειας. Απαραίτητη προϋπόθεση είναι η κατασκευή να μπορεί να παραλάβει διάφορες σεισμικές καταπονήσεις, που μπορεί να επηρεάσουν το σύστημα τόσο λόγω των αδρανειακών δυνάμεων όσο και λόγω :

- i. Της μείωσης της εδαφικής φέρουσας ικανότητας.
- ii. Της ρευστοποίησης και απώλειας αντοχής σε διάτμηση, που προκύπτει από την αύξηση της πίεσης των πόρων από τον σεισμό.
- iii. Των διαφορών μετακινήσεων λόγω εδαφικής αστοχίας,

Κεφάλαιο 6^ο Αριθμητική διερεύνηση

iv. Της πλευρικής εξάπλωσης εδάφους ή των κατολισθήσεων.

Οι πιθανές σεισμικές καταπονήσεις εξαρτώνται από τους εξής βασικούς παράγοντες:

- τη σεισμικότητα της εκάστοτε περιοχής,
- το είδος των εδαφικών υλικών,
- τις ειδικές τοπογραφικές συνθήκες,
- τον τύπο και την τρωτότητα της κατασκευής.

Επιλογή χρονοϊστοριών

Η επιλογή των εγγραφών σεισμού, που χρησιμοποιήθηκαν στην εργασία, έγινε από την βάση δεδομένων του πανεπιστημίου Berkeley, με βάση τα εξής κριτήρια:

- συμβατότητα με το φάσμα σχεδιασμού τύπου 1 του Ευρωκώδικα 8, το οποίο χρησιμοποιείται στην Ελλάδα,
- σεισμοί κοντινού πεδίου και μέσου πεδίου,
- σεισμοί μεγέθους από 6R μέχρι 7.5R,
- τοπικές εδαφικές στρωματογραφικές συνθήκες κατηγορίας Site Class A,D.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι πίνακες με τις χρονοϊστορίες που επιλέχθηκαν, για τους δύο τύπους κτιρίων: τετραόροφο και οκταόροφο.

Region	Station name	Eq. magnitude	Ep. Distance
Imperial Valley -02	El Centro Array #9	6.95	6.09
Kern County	Santa Barbara Courthouse	7.36	81.3
El Alamo	El Centro Array #9	6.8	121.7
Borrego Mtn	San Onofre –So CalEdison	6.63	129.11
San Fernando	Borrego Springs Fore Sta	6.61	214.32
Gazli_USSR	Karakyr	5.46	3.92
Tabas_Iran	Tabas	7.35	1.79

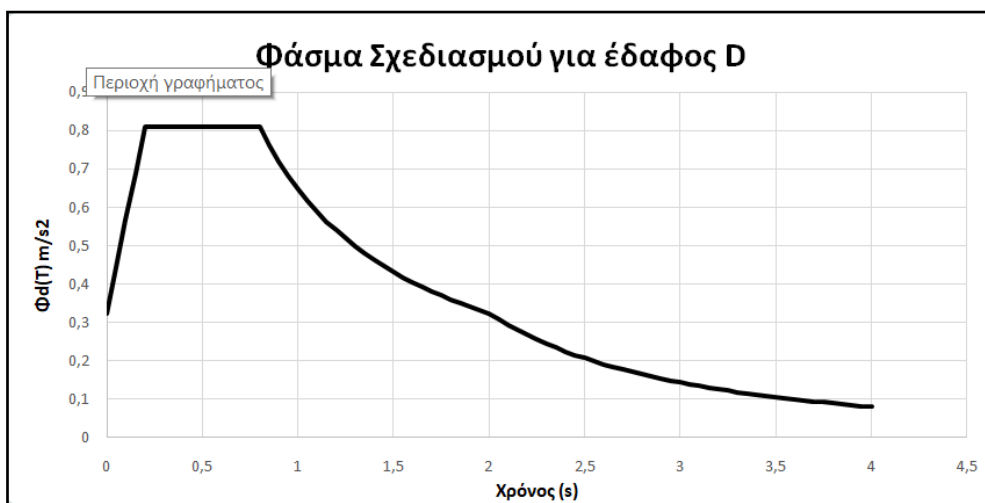
Πίνακας 6.9: Επιλεγμένες χρονοϊστορίες για το τετραόροφο κτίριο.

Region	Station name	Eq. magnitude	Ep. Distance
Imperial Valley -02	El Centro Array #9	6.95	6.09
Kern County	LA - Hollywood Stor FF	7.36	114.62
Borrego Mtn	LB - Terminal Island	6.63	129.11
San Fernando	Borrego Springs Fore Sta	6.61	214.32
Gazli_USSR	Karakyr	6.8	3.92
Tabas_Iran	Tabas	7.35	1.79
Imperial Valley -06	El Centro Array #3	6.53	10.79

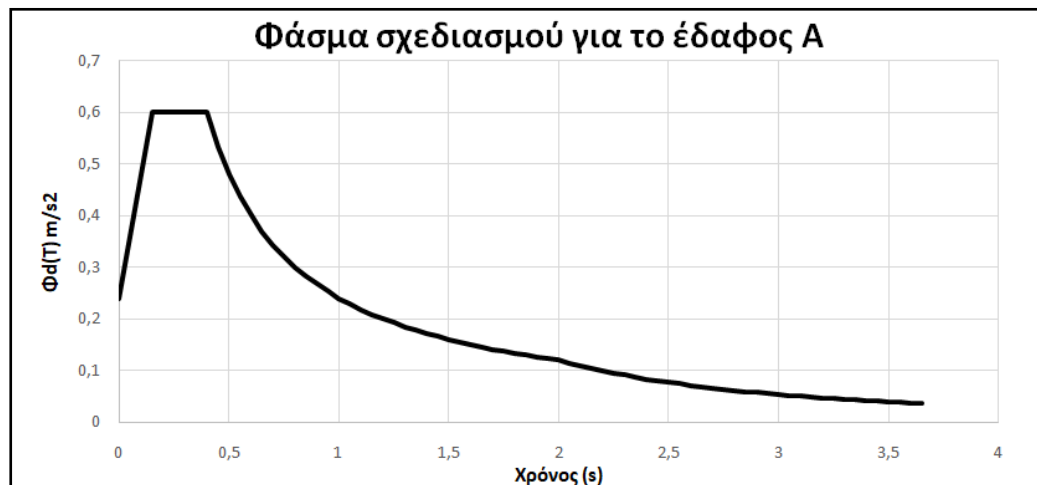
Πίνακας 6.10: Επιλεγμένες χρονοϊστορίες για το οκταόροφο κτίριο.

Προκειμένου να πραγματοποιηθεί μια ρεαλιστική σύγκριση στα αποτελέσματα, τα επιταχυνσιογραφήματα που επιλέχθηκαν προσαρμόστηκαν κατάλληλα στο φάσμα σχεδιασμού του Ευρωκώδικα 8 (EC8). Χρησιμοποιήθηκε για τον σκοπό αυτό η αναβαθμισμένη έκδοση της βάσης δεδομένων εδαφικής κίνησης του PEER («Pacific Earthquake Engineering Research Center»). Επιτρέπεται έτσι η προσαρμογή των επιλεγμένων επιταχυνσιογραφημάτων στο φάσμα σχεδιασμού, όπου δίνεται η δυνατότητα να φορτωθεί στη βάση από το χρήστη. Το διάστημα τιμών, που ορίζεται από του κανονισμούς και στο οποίο επιζητείται να συμπίπτουν όσο δυνατόν τα μέγιστα των επιταχύνσεων του φάσματος σχεδιασμού με τα μέγιστα των επιταχύνσεων του φάσματος είναι το $(0,2T_{\Theta EME\Lambda}, 2T_{\Theta EME\Lambda})$, όπου ως $T_{\Theta EME\Lambda}$ ορίζεται η θεμελιώδης ιδιοπερίοδος του κτιρίου. Τα φάσματα σχεδιασμού του Ευρωκώδικα 8 υπολογίστηκαν για $PGA=0,24g$, με βάση την οποία έγινε η κανονικοποίηση των επιταχυνσιογραφημάτων (δηλαδή PGA ίση με εκείνη των φασμάτων σχεδιασμού του Ευρωκώδικα 8).

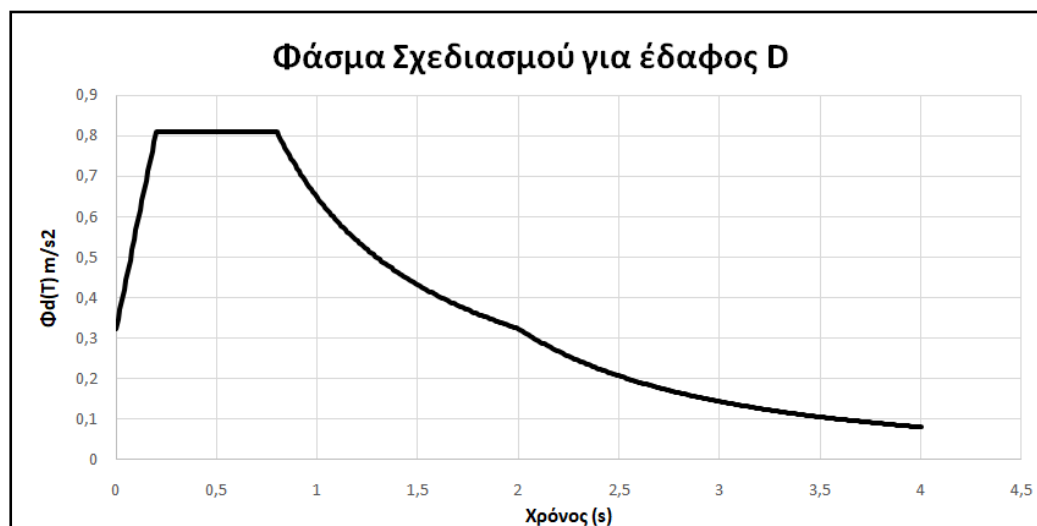
Στην αρχική σελίδα της βάσης δεδομένων του PEER δίνεται η δυνατότητα επιλογής αναζήτησης ακατέργαστων επιταχυνσιογραφημάτων ή επιταχυνσιογραφημάτων που μπορούν να προσαρμοστούν στο εκάστοτε φάσμα επιλογής του χρήστη. Η επιλογή που έγινε ήταν τα επιταχυνσιογραφήματα με κλιμάκωση (scaled). Τα φάσματα σχεδιασμού που φορτώθηκαν στην βάση δεδομένων για τους δυο διαφορετικούς τύπους κτιρίων παρουσιάζονται παρακάτω στα Διαγράμματα 6.1 και 6.2 για το τετραόροφο κτίριο και 6.3 & 6.4 για το οκταόροφο κτίριο, αντίστοιχα.



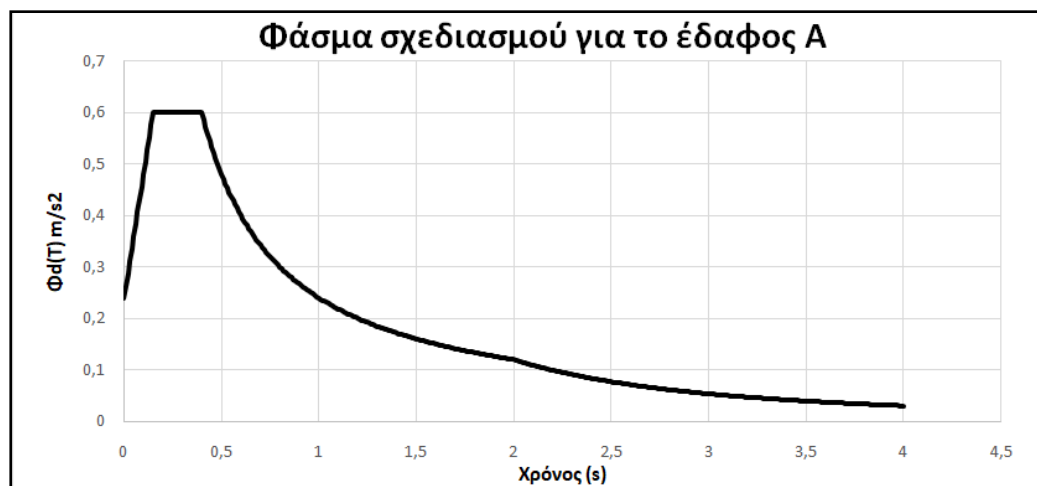
Διάγραμμα 6.1: Φάσμα σχεδιασμού για το τετραόροφο κτίριο με έδαφος D.



Διάγραμμα 6.2: Φάσμα σχεδιασμού για το τετραόροφο κτίριο με έδαφος Α.



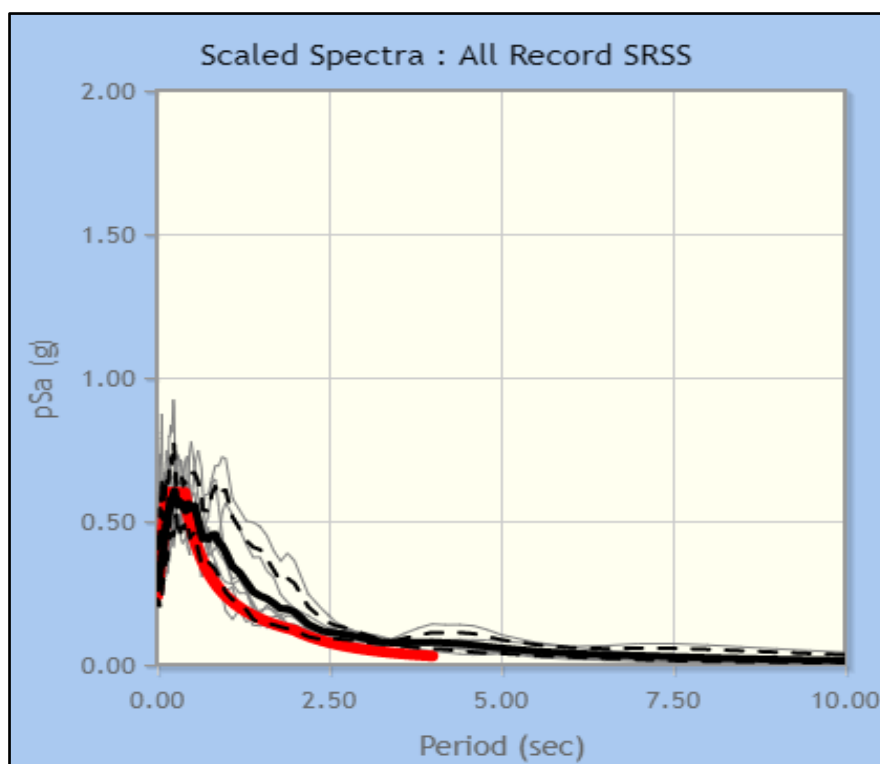
Διάγραμμα 6.3: Φάσμα σχεδιασμού για το τετραόροφο κτίριο με έδαφος D.



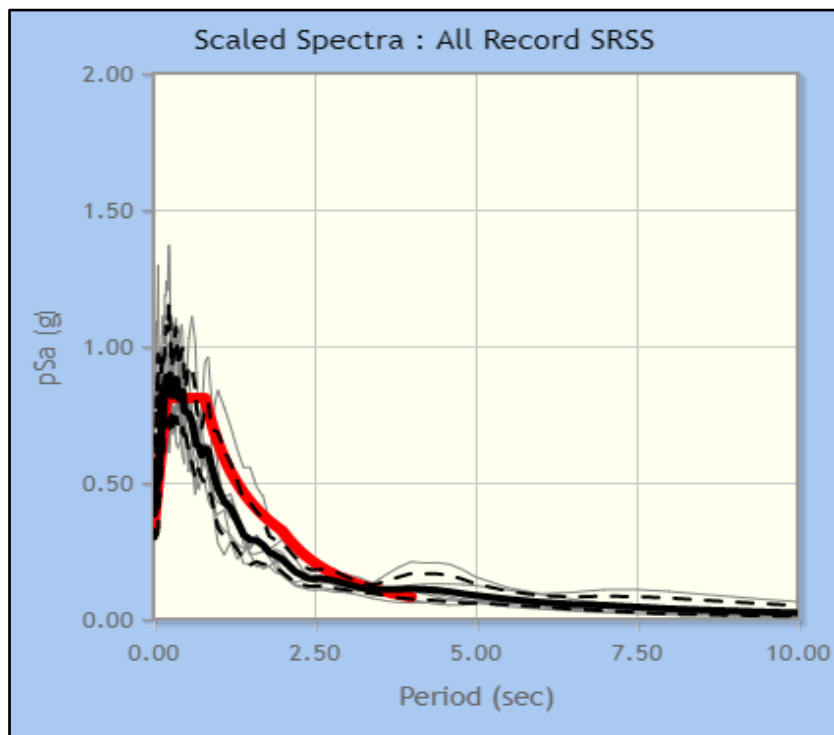
Διάγραμμα 6.4: Φάσμα σχεδιασμού για το τετραόροφο κτίριο με έδαφος Α.

Κεφάλαιο 6^ο Αριθμητική διερεύνηση

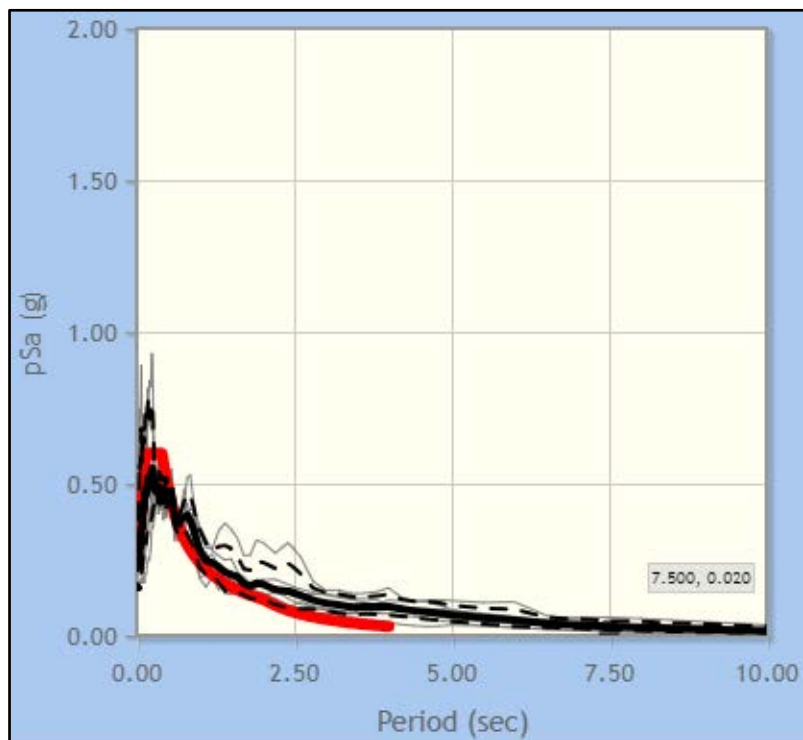
Εφόσον έγινε η κλιμάκωση των επτά σεισμικών καταγραφών για τους δύο διαφορετικούς τύπους κτιρίων, στο φάσμα σχεδιασμού του Ευρωκώδικα 8, για δυο διαφορετικού τύπους εδάφη, τα δεδομένα που λήφθηκαν μετατράπηκαν με την βοήθεια του λογισμικού SesmoSignal, από αρχεία μορφής (.dat) σε αρχεία μορφής (.txt), ώστε να είναι συμβατά με αυτά που μπορεί να δεχτεί το λογισμικό SAP2000. Παρακάτω παρουσιάζονται τα φάσματα σχεδιασμού της κατασκευής μαζί με τα φάσματα των επτά σεισμικών καταγραφών. Το φάσμα σχεδιασμού κατασκευάστηκε στη βάση σεισμικών δεδομένων PEER στο Πανεπιστήμιο του Berkeley για απόσβεση 5% και PGA 0,24g και για κάθε μια κατηγορία εδάφους A, D του Ευρωκώδικα 8. Τα συγκεντρωτικά διαγράμματα για το τετραώροφο κτίριο απεικονίζονται στα Διαγράμματα 6.5 και 6.6 για το έδαφος A και D, αντίστοιχα. Η δεσπόζουσα ιδιοπερίοδος για τα τετραώροφα κτίρια είναι περίπου ίση με $T=0.38s$. Ομοίως, για το οκταώροφο κτίριο η δεσπόζουσα ιδιοπερίοδος είναι $T=0.76s$ και τα συγκεντρωτικά διαγράμματα για τους δύο τύπους εδαφών A, D είναι τα Διαγράμματα 6.7 και 6.8, αντίστοιχα.



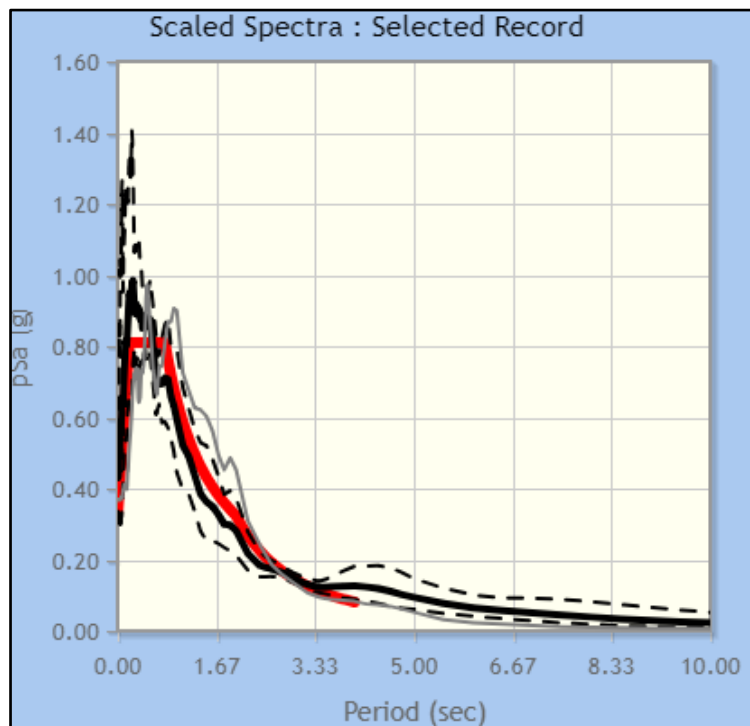
Διάγραμμα 6.5: Φάσματα επιταχύνσεων των 7 διεγέρσεων & φάσμα σχεδιασμού EC8 για κατηγορία εδάφους A σε τετραώροφο κτίριο.



Διάγραμμα 6.6: Φάσματα επιταχύνσεων των 7 διεγέρσεων & φάσμα σχεδιασμού EC8 για κατηγορία εδάφους D, σε τετραόροφο κτίριο.

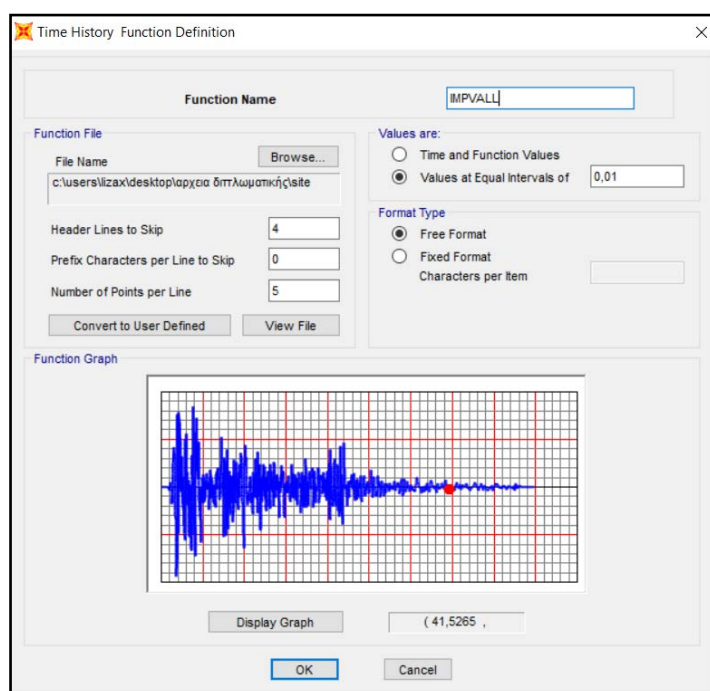


Διάγραμμα 6.7: Φάσματα επιταχύνσεων των 7 διεγέρσεων & φάσμα σχεδιασμού EC8 για κατηγορία εδάφους A σε οκταόροφο κτίριο.



Διάγραμμα 6.8: Φάσματα επιταχύνσεων των 7 διεγέρσεων & φάσμα σχεδιασμού EC8 για κατηγορία εδάφους A σε οκτάορο κτίριο.

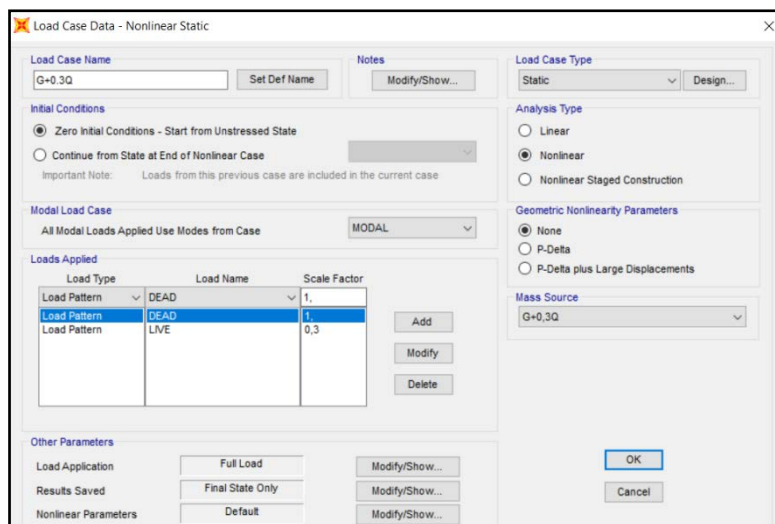
Η εισαγωγή των επιταχυνσιογραφημάτων στο πρόγραμμα SAP2000 πραγματοποιήθηκε με τις ακόλουθες εντολές : *Define* → *Function* → *Time History* → *(Choose Function Type to Add)* → *From File* .



Εικόνα 6.9: Εισαγωγή χρονοϊστορίας στο SAP2000.

6.2.2 Δυναμική Ανάλυση στο SAP2000

Η επιβολή των φορτίων γίνεται σε δύο φάσεις. Αρχικά, επιβάλλονται τα μόνιμα και τα κινητά φορτία με το συνδυασμό $G+0.3Q$, ώστε να προκληθούν οι αντίστοιχες εντάσεις και παραμορφώσεις. Έπειτα, εισάγονται οι ανελαστικές αναλύσεις έχοντας ως σημείο εκκίνησης την ολοκλήρωση της μη-γραμμικής ανάλυσης $G+0.3Q$. Η διαδικασία παρουσιάζεται παρακάτω: *Define* → *Load Case* → *Add New Load Case*.

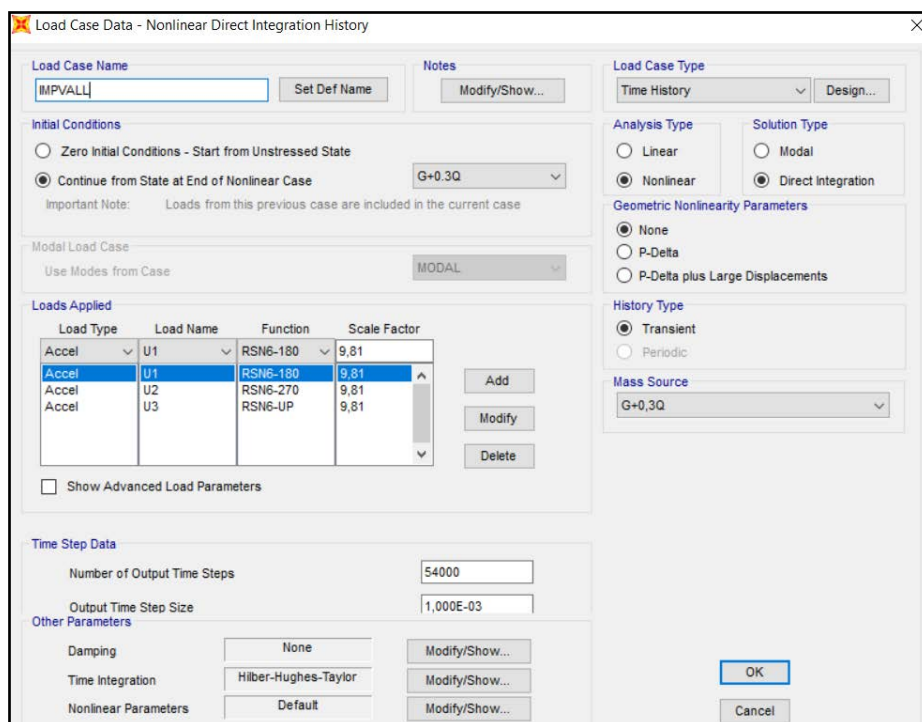


Εικόνα 6.10: Εισαγωγή μη-γραμμικής ανάλυσης $G+0.3Q$.

Η δημιουργία των φορτιστικών καταστάσεων, για κάθε σεισμική διέγερση -σε όλες τις διευθύνσεις x, y, z - που αφορούν στα φορτία λόγω της σεισμική διέγερσης γίνεται ακολουθώντας τα παρακάτω βήματα:

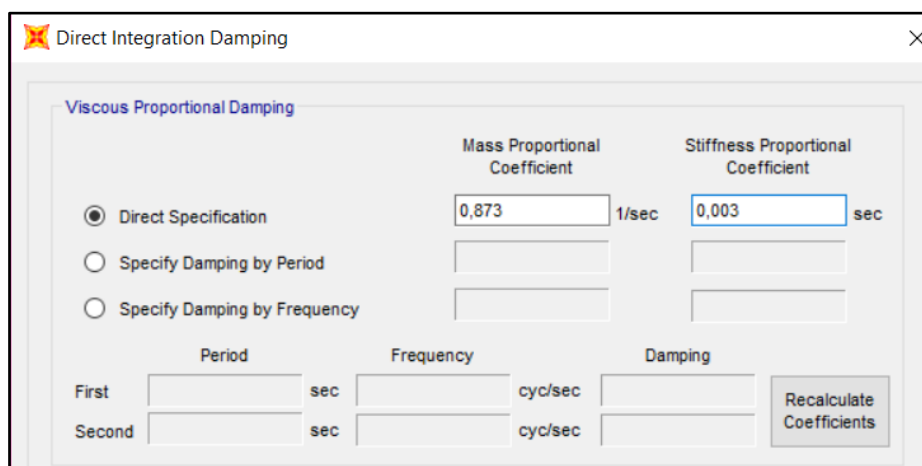
Ενδεικτικά παρουσιάζεται η δημιουργία της σεισμικής φόρτισης του σεισμού Imperial Valley-02. Καθορίζεται ο συνολικός αριθμός των χρονικών βημάτων, που επιθυμούμε να χρησιμοποιήσουμε από το επιλεγμένο αρχείο, καθώς και το μέγεθος του χρονικού βήματος. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στην επιλογή των μοναδων, Συγκεκριμένα το αρχείο (.txt) που φορτώνεται στο SAP2000 περιέχει μονάδες επιταχύνσεων σε g.

Όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 6.11, η επιβαλλομένη φορτιστική κατάσταση είναι τύπου Accel (επιτάχυνση), σε όλες τις διευθύνσεις $x(U1)$, $y(U2)$, $z(U3)$ και χρησιμοποιείται η χρονοϊστορία (function) όπως ορίστηκε παραπάνω. Ο τύπος της ανάλυσης που χρησιμοποιείται είναι μη-γραμμική ανελαστική ανάλυση (no-Linear) και στη θέση του time history type επιλέγεται άμεση ολοκλήρωση (Direct integration method). Οι υπόλοιπες μη γραμμικές παράμετροι ελήφθησαν όπως ήταν ορισμένες εξαρχής από το λογισμικό.



Εικόνα 6.11: Ορισμός σεισμικής φόρτισης κατά της διεύθυνση X,Y,Z.

Στη συνέχεια, ορίζεται η απόσβεση (damping) ίση με 5%. Συγκεκριμένα χρησιμοποιείται απόσβεση τύπου Rayleigh, η οποία ορίζεται με την χρήση δύο συντελεστών (μάζας και δυσκαμψίας), όπως φαίνεται στην Εικόνα 6.12.



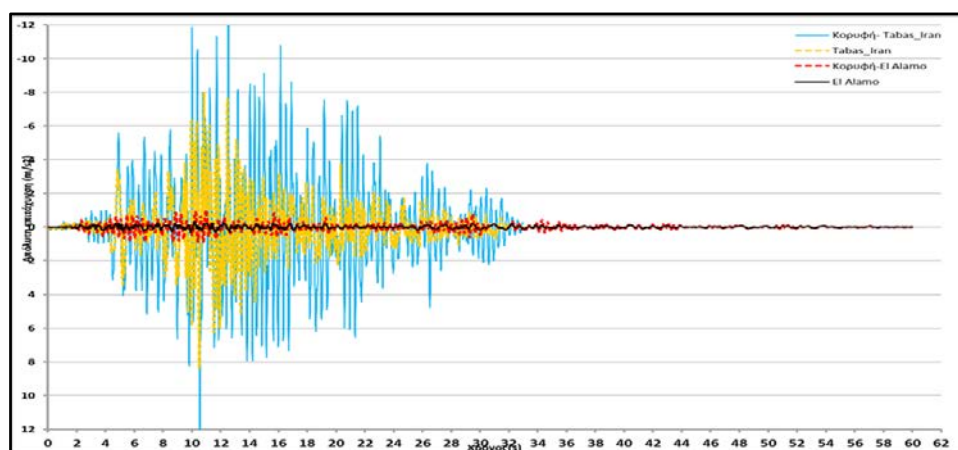
Εικόνα 6.12: Καθορισμός παραμέτρων απόσβεσης τύπου Rayleigh.

6.3 Αποτελέσματα Ανελαστικής Δυναμικής Ανάλυσης

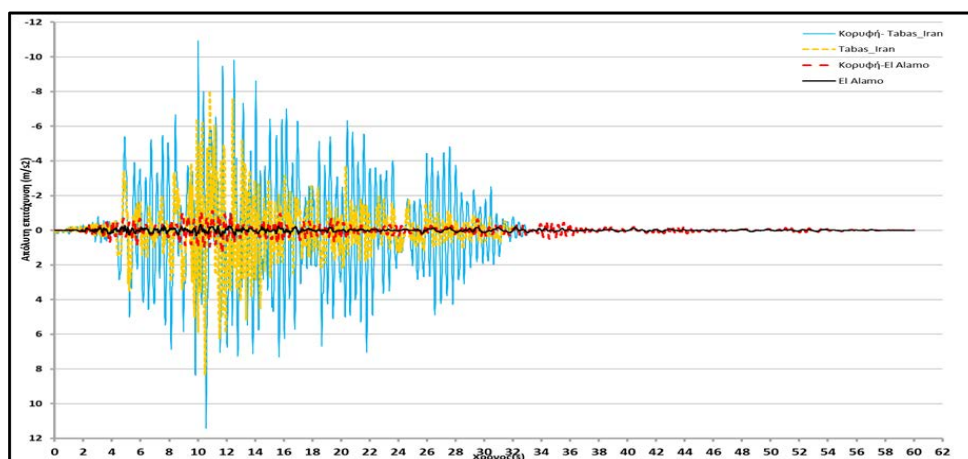
6.3.1 Τετραόροφο κτίριο

6.3.1.1. Χρονοϊστορίες απόλυτης επιτάχυνσης

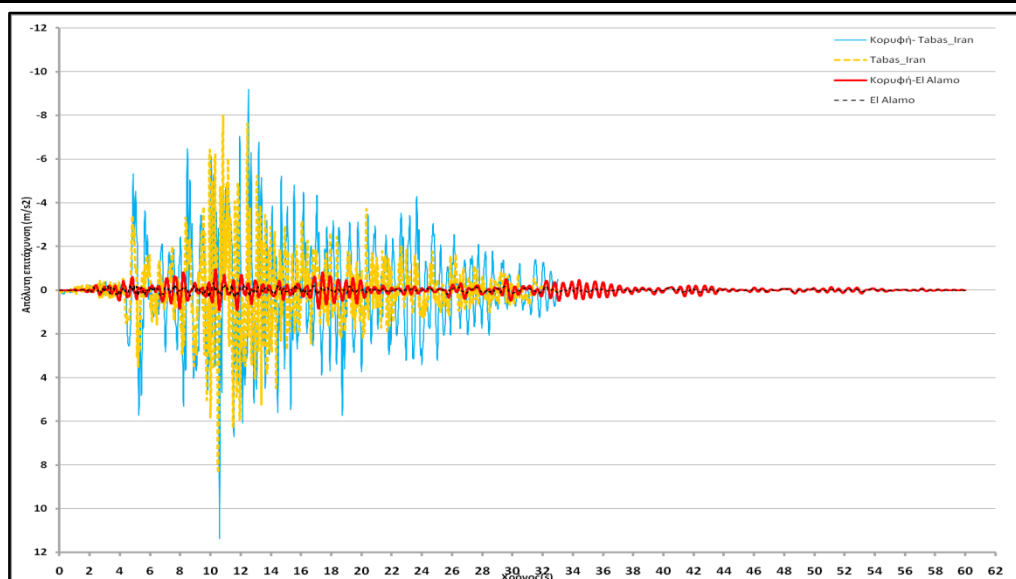
Στα Διαγράμματα 6.9 έως 6.12 παρουσιάζονται οι χρονοϊστορίες των απόλυτων οριζόντιων επιταχύνσεων του τελευταίου ορόφου ($4^{ος}$). Συγκρίνονται οι χρονοϊστορίες δυο διαφορετικών σεισμικών διεγέρσεων. Οι σεισμικές διεγέρσεις που επιλέχθηκαν ενδεικτικά είναι ένας σεισμός κοντινού πεδίου (Tabas_Iran) και ένας κοντινού πεδίου (El Alamo) μακρινού πεδίου (βλ. Πίνακα 6.9).



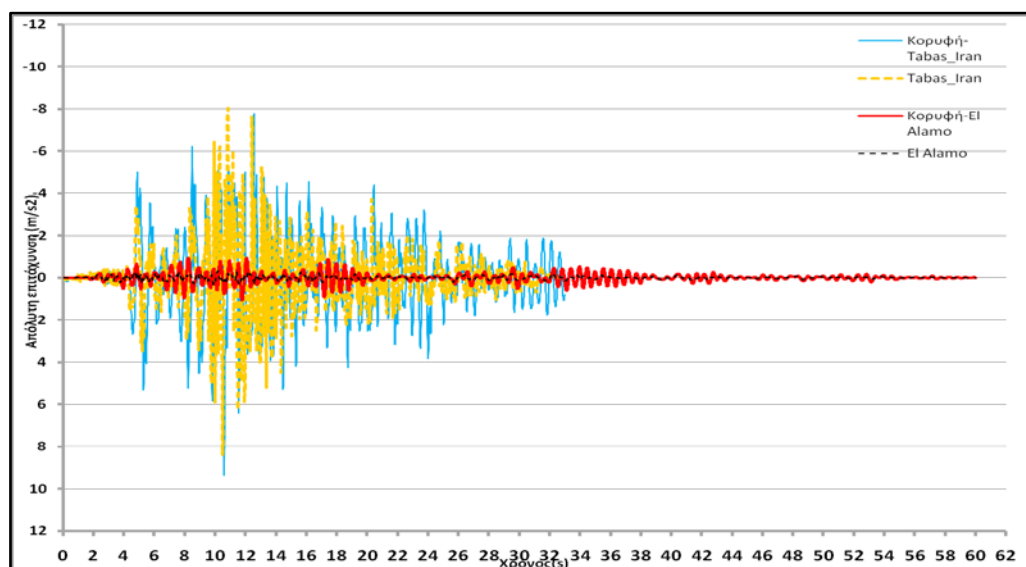
Διάγραμμα 6.9: Κτίριο χωρίς «πράσινο» δώμα θεμελιωμένο σε έδαφος Α.



Διάγραμμα 6.10: Κτίριο με «πράσινο» δώμα θεμελιωμένο σε έδαφος Α.



Διάγραμμα 6.11: Κτίριο χωρίς «πράσινο» δώμα θεμελιωμένο σε έδαφος D.



Διάγραμμα 6.12: κτίριο με «πράσινο» δώμα θεμελιωμένο σε έδαφος D.

Αρχικά, παρατηρώντας τα διαγράμματα, είναι εμφανές ότι η μεγαλύτερη ενίσχυση της κορυφής προέκυψε όταν η κατασκευή ήταν θεμελιωμένη σε βράχο, λαμβάνοντας μεγαλύτερη τιμή από την σεισμική διέγερση Tabas_Iran. Πιο συγκεκριμένα, στην περίπτωση που υπάρχει έδαφος θεμελίωσης A και χωρίς την προσθήκη «πράσινου» δώματος (Διάγραμμα 6.9), την χρονική στιγμή (περίπου) 10s, η κορυφή εμφανίζει τιμή επιτάχυνσης 12 m/s^2 σε σύγκριση με την βάση που αποκτά τιμή 8 m/s^2 . Αντίστοιχα, στα Διαγράμματα 6.11 και 6.12 όπου το έδαφος έχει αλλάξει σε χαλαρή άργιλο ενισχύεται και πάλι η επιτάχυνση στην κορυφή της κατασκευής, όμως με μικρότερες τιμές από ότι στο έδαφος A. Συνολικά στις χρονοϊστορίες των

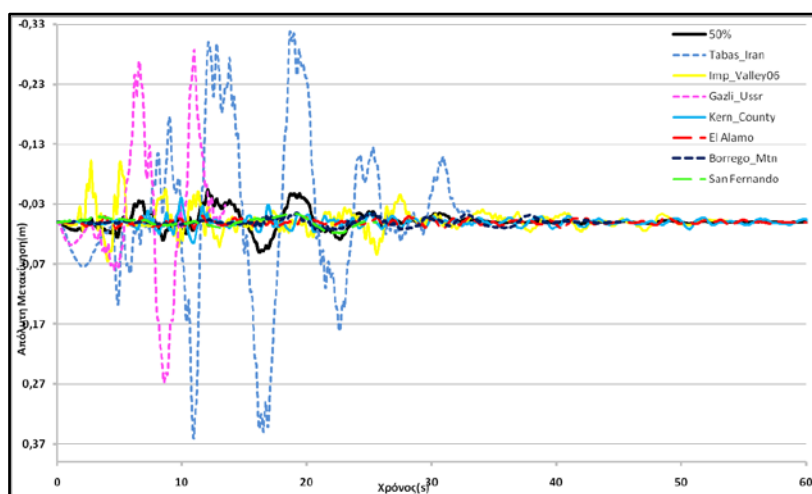
απόλυτων επιταχύνσεων παρατηρείται ότι το επιπλέον φορτίο από το «πράσινο» δώμα στην κορυφή της κατασκευής μείωσε την ενίσχυση της κορυφής

Όσον αφορά τη σεισμική διέγερση El Alamo, εμφανίζονται στη κορυφή τιμές που κυμαίνονται από -1m/s^2 έως 1m/s^2 . Επομένως, και στις δυο σεισμικές καταγραφές η κορυφή παρουσιάζει σχεδόν σε όλη την διάρκεια μεγαλύτερη επιτάχυνση από εκείνη της βάσης. Η έντονη διαφορά στις τιμές που παρουσιάζει το κτίριο οφείλεται στην επίκεντρη απόσταση του εκάστοτε σεισμικού γεγονότος.

6.3.1.2 Χρονοϊστορίες απόλυτης μετακίνησης

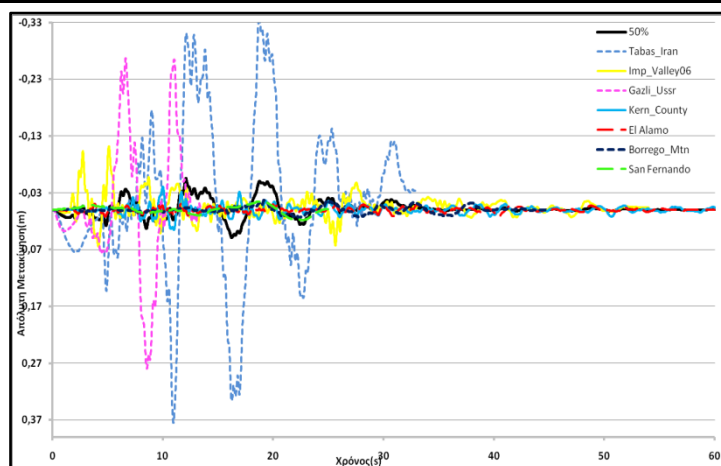
Τα Διαγράμματα 6.13-6.16 απεικονίζουν τις χρονοϊστορίες των απόλυτων μετακινήσεων της κορυφής και των επτά σεισμικών γεγονότων που εφαρμόστηκαν, για κάθε έδαφος θεμελίωσης, πριν και μετά την προσθήκη «πράσινου» δώματος στην κατασκευή. Παρατηρείται εντονότερη διακύμανση, από τους τρεις σεισμούς κοντινού πεδίου, σχεδόν σε όλη την διάρκεια του εκάστοτε σεισμού.

Όπως είναι αναμενόμενο, στις περιπτώσεις του εδάφους A (βράχος), η απόλυτη μετακίνηση της κορυφής είναι μεγαλύτερη, 0,37m με μικρή διαφορά στην περίπτωση του εδάφους D που φτάνει τα 0,35m, όπου οι τιμές αυτές λαμβάνονται από τα πρώτα κιόλας δευτερόλεπτα. Μελετώντας και τα υπόλοιπα σεισμικά γεγονότα των διαγραμμάτων, σε κανένα από αυτά η απόλυτη μετακίνηση της κορυφή δεν ξεπερνά το 0,01m.

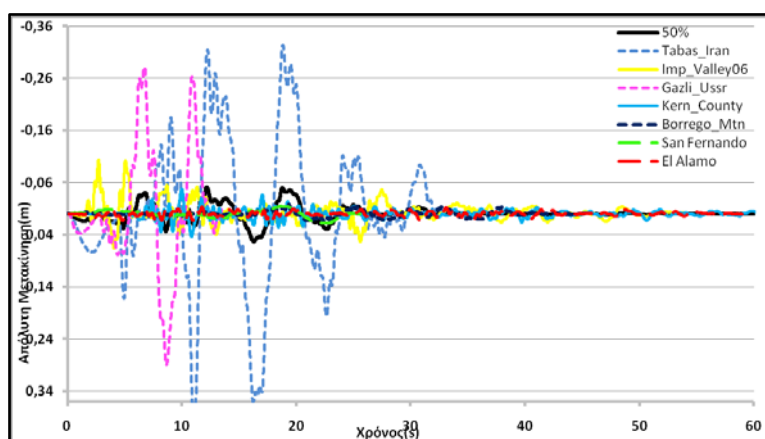


Διάγραμμα 6.13: Κτίριο χωρίς «πράσινο» δώμα θεμελιωμένο σε έδαφος A.

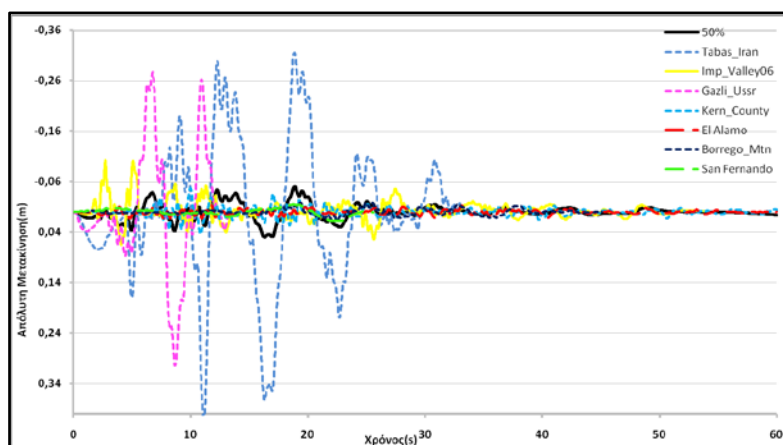
Κεφάλαιο 6^ο Αριθμητική διερεύνηση



Διάγραμμα 6.14: Κτίριο με χωρίς «πράσινο» δώμα θεμελιωμένο σε έδαφος Α.



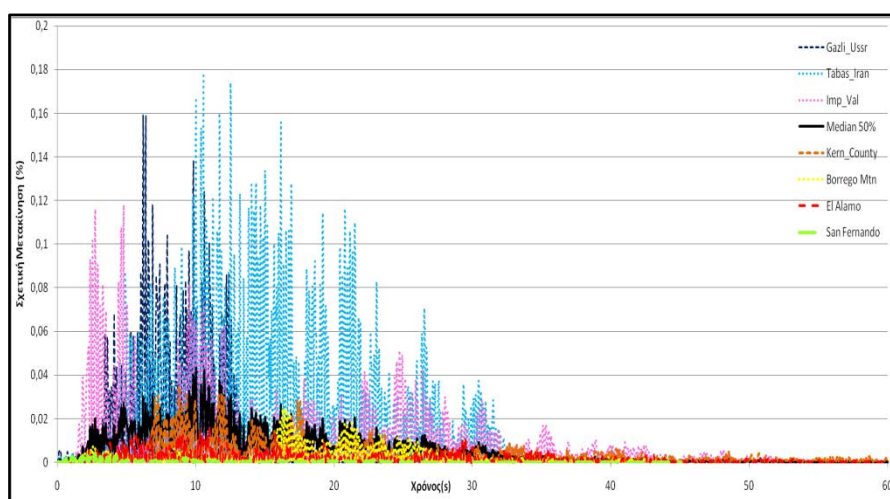
Διάγραμμα 6.15: Κτίριο χωρίς «πράσινο» δώμα θεμελιωμένο σε έδαφος D.



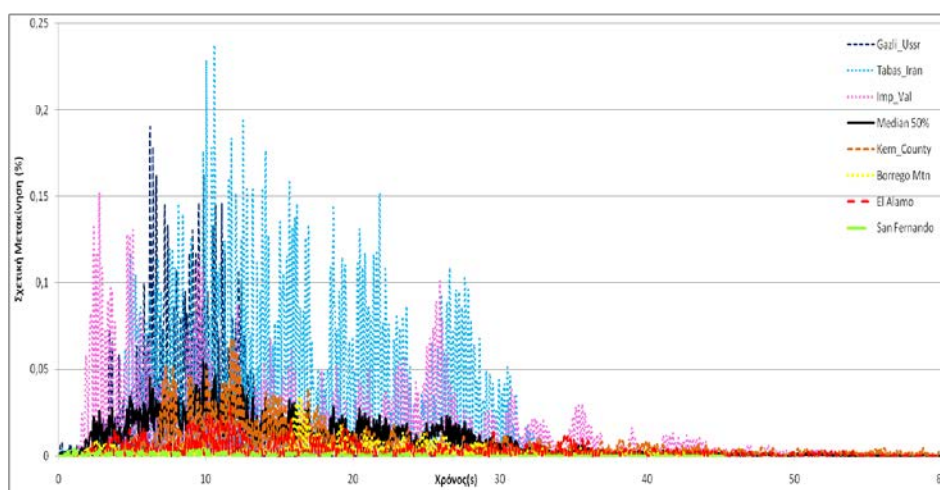
Διάγραμμα 6.16 Κτίριο με «πράσινο» δώμα θεμελιωμένο σε έδαφος D.

6.3.1.3 Χρονοϊστορίες σχετικής μετακίνησης

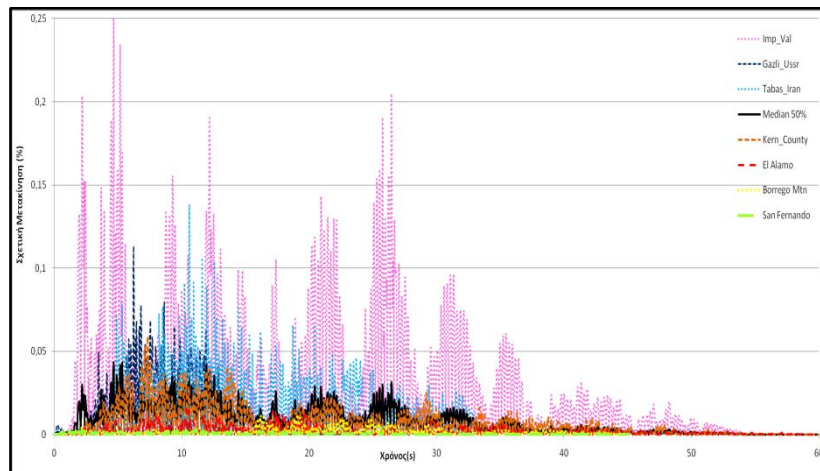
Σε αυτήν την ενότητα παρουσιάζονται τα διαγράμματα σχετικών μετακινήσεων της κορυφής σε κάθε ένα από τα επτά σεισμικά γεγονότα που μελετήθηκαν. Είναι εμφανές ότι οι σεισμοί με την μικρότερη επίκεντρη απόσταση παρουσιάζουν την μεγαλύτερη σχετική μετακίνηση της κορυφής. Πιο συγκεκριμένα, στις περιπτώσεις με το έδαφος Α, πριν και χωρίς την προσθήκη του πράσινου δώματος, η σχετική μετακίνηση της κορυφής είναι 0,18% και 0,24%, αντίστοιχα, από το σεισμικό γεγονός Tabas_Iran. Παράλληλα, στο έδαφος θεμελίωσης D (μαλακό) πριν την προσθήκη του «πράσινου» δώματος η μέγιστη σχετική μετακίνηση φτάνει στο 0,24% εξαιτίας της σεισμικής διέγερσης Imperial_Valley02. Γενικότερα, από τα Διαγράμματα 6.17-6.20 η μικρότερη σχετική μετακίνηση της κορυφής είναι στην περίπτωση που υπάρχει το πράσινο δώμα σε συνδυασμό με έδαφος θεμελίωσης D.



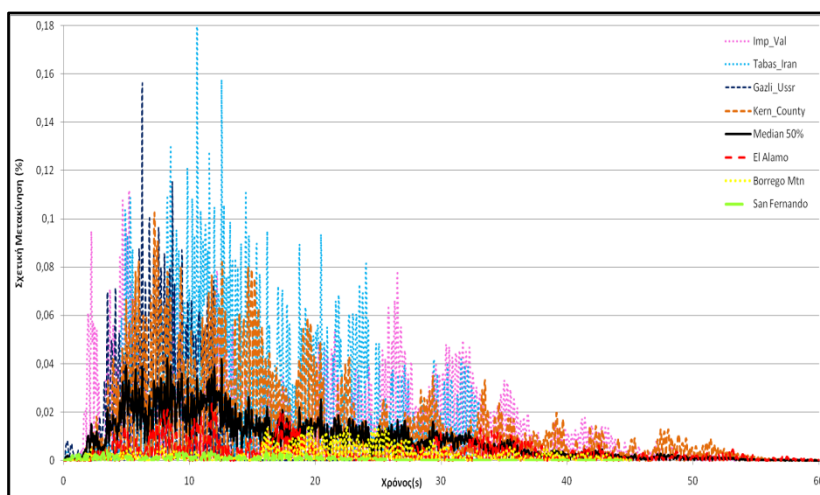
Διάγραμμα 6.17: Κτίριο χωρίς «πράσινο» δώμα θεμελιωμένο σε έδαφος Α.



Διάγραμμα 6.18: Κτίριο με «πράσινο» δώμα θεμελιωμένο σε έδαφος Α.



Διάγραμμα 6.19: Κτίριο χωρίς «πράσινο» δώμα θεμελιωμένο σε έδαφος D.



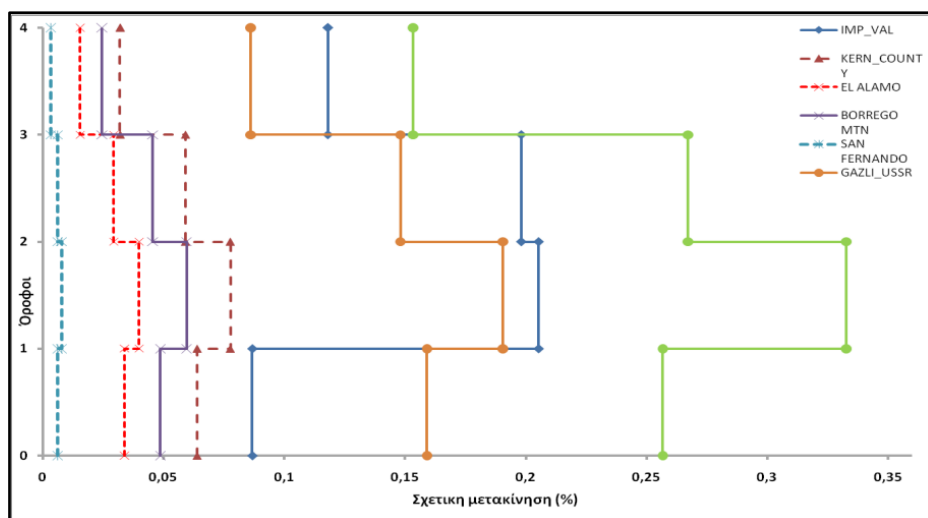
Διάγραμμα 6.20: Κτίριο με «πράσινο» δώμα θεμελιωμένο σε έδαφος D.

6.3.1.4 Σχετικές μετακινήσεις ανά όροφο

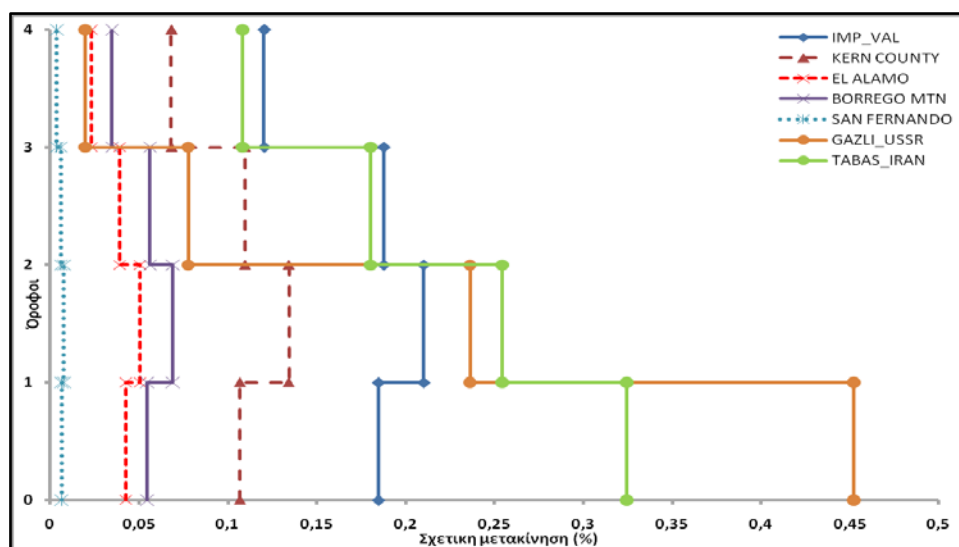
Στα Διαγράμματα 6.21 έως 6.24, παρουσιάζονται σχετικές μετακινήσεις ανά όροφο και στις τέσσερις περιπτώσεις της τετραόροφης κατασκευής για τις επτά σεισμικές διεγέρσεις. Γενικά, είναι εμφανές ότι τις μεγαλύτερες μετακινήσεις της προκαλούν οι σεισμικές καταγραφές κοντινού πεδίου. Όταν το κτίριο δεν έχει δεχθεί το επιπλέον φορτίο εμφανίζει μεγαλύτερη σχετική μετακίνηση ανάμεσα στον 1^ο και 2^ο όροφο.

Κεφάλαιο 6^ο Αριθμητική διερεύνηση

Ενώ, όταν προστεθεί το επιπλέον φορτίο στην κατασκευή η μεγαλύτερη σχετική μετακίνηση εμφανίζεται μεταξύ της βάσης και του 1^{ου} ορόφου.

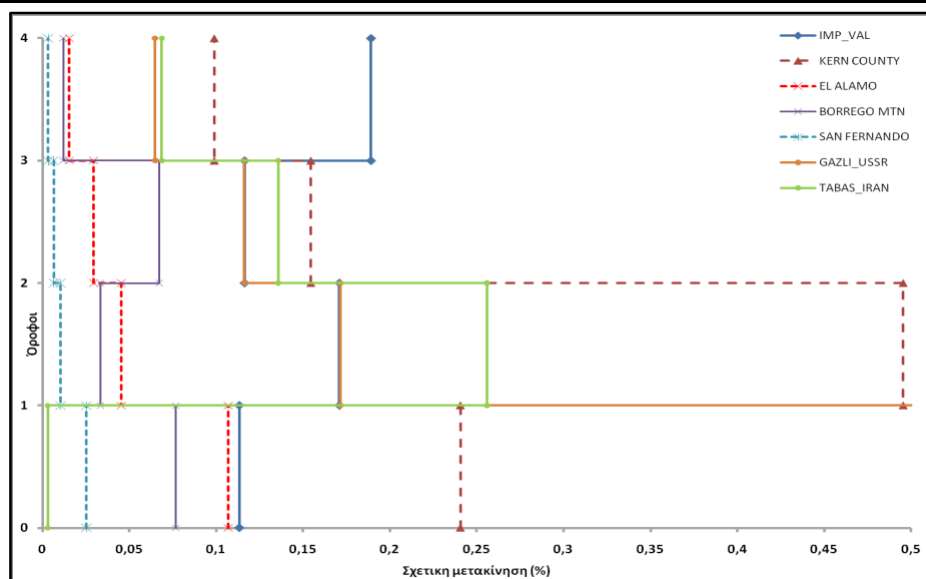


Διάγραμμα 6.21: Κτίριο χωρίς «πράσινο» δώμα θεμελιωμένο σε έδαφος Α.



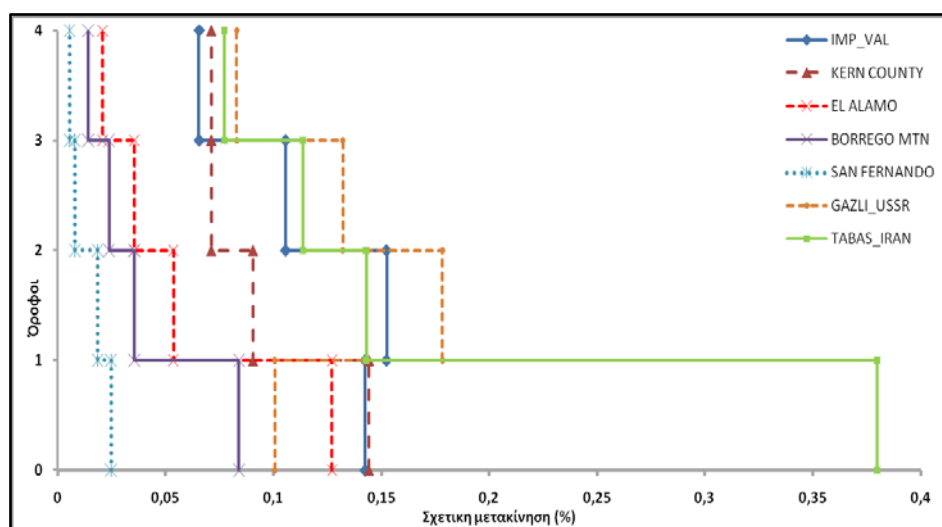
Διάγραμμα 6.22: Κτίριο με «πράσινο» δώμα θεμελιωμένο σε έδαφος Α.

Συγκρίνοντας τα Διαγράμματα 6.21 και 6.22 για βραχώδες έδαφος Α και τη σεισμική καταγραφή Tabas_Iran χωρίς το δώμα η σχετική μετακίνηση λαμβάνει τιμή ίση με 0,25% (βάση-1^{ος}) ενώ μετά την προσθήκη του επιπλέον φορτίου αυξάνεται σε 0,33%.



Διάγραμμα 6.23: Κτίριο χωρίς «πράσινο» δώμα θεμελιωμένο σε έδαφος D.

Αντίστοιχα, αλλάζοντας το έδαφος θεμελίωσης της κατασκευής σε μαλακή άργιλο και για το ίδιο σεισμικό γεγονός Tabas_Iran παρατηρείται η ίδια συμπεριφορά. Όμως, στην περίπτωση της σεισμικής καταγραφής GAZLI_USSR η κατασκευή εμφανίζει μικρότερη αστοχία μετά την προσθήκη του επιπλέον φορτίου στην κορυφή. Πιο συγκεκριμένα πριν το επιπλέον φορτίο εμφανίζει σχετική μετακίνηση 0,5% ($1^{ος}$ - $2^{ος}$) ενώ μετά το πρόσθετο φορτίο στην κορυφή η σχετική μετακίνηση είναι 0,17% (Διάγραμμα 6.24). Γενικά, στις διάφορες σεισμικές καταγραφές προέκυψαν ποικίλα αποτελέσματα, όπως φαίνεται στα διαγράμματα συνεπώς, το επιπλέον φορτίο άλλες φορές λειτούργησε και θετικά και άλλες αρνητικά ως προς τις σχετικές μετακινήσεις της κατασκευής.

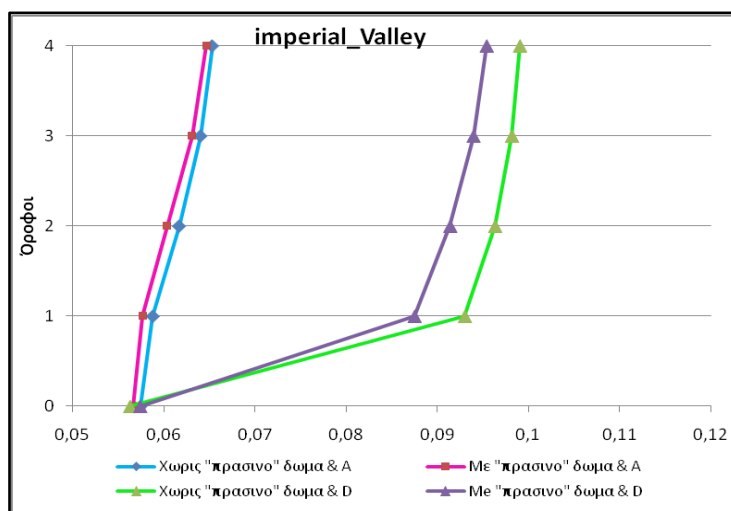


Διάγραμμα 6.24: Κτίριο με «πράσινο» δώμα θεμελιωμένο σε έδαφος D.

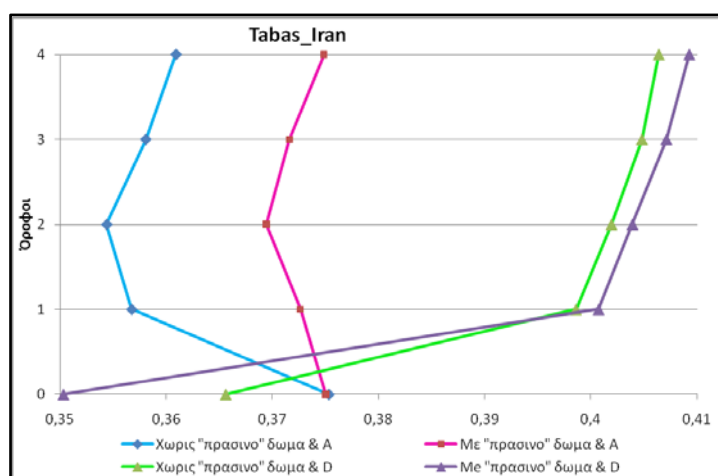
6.3.1.5 Απόλυτη μετακίνηση ανά όροφο

Ι. Σεισμοί κοντινού πεδίου

Στα Διαγράμματα 6.25 έως 6.27 παρουσιάζονται οι απόλυτες μετακινήσεις που προκλήθηκαν στην κατασκευή και στις τέσσερις διαφορετικές περιπτώσεις που εξετάστηκαν, εξαιτίας των τριών σεισμικών καταγραφών κοντινού πεδίου. Παρατηρούμε ότι σε όλες τις σεισμικές καταγραφές, μεγαλύτερη μετακίνηση εμφανίζεται στην περίπτωση του κτιρίου με θεμελίωση D μετά την προσθήκη «πράσινου» δώματος. Γενικότερα, παρόμοια συμπεριφορά έχουν οι περιπτώσεις όπου οι κατασκευές έχουν το ίδιο έδαφος θεμελίωσης, οι οποίες και επηρεάστηκαν ελάχιστα από την προσθήκη του πράσινου δώματος.

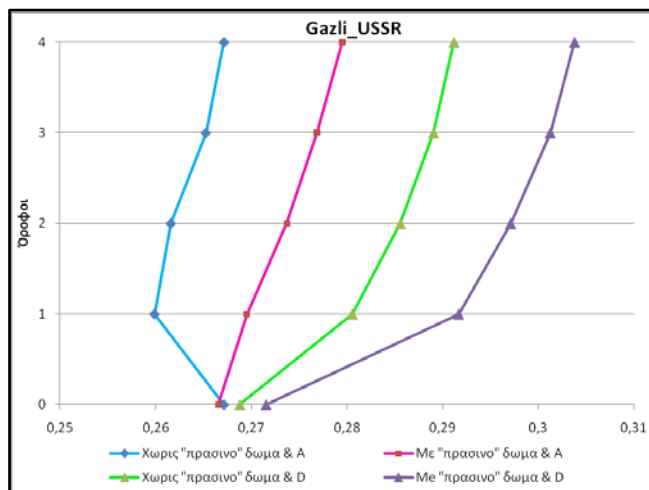


Διάγραμμα 6.25: Απόλυτη μετακίνηση ανά όροφο τη χρονική στιγμή 4s. της σεισμικής καταγραφής Imperial_Valley-02.



Διάγραμμα 6.26: Απόλυτη μετακίνηση ανά όροφο τη χρονική στιγμή 10s της σεισμικής καταγραφής Tabas_Iran.

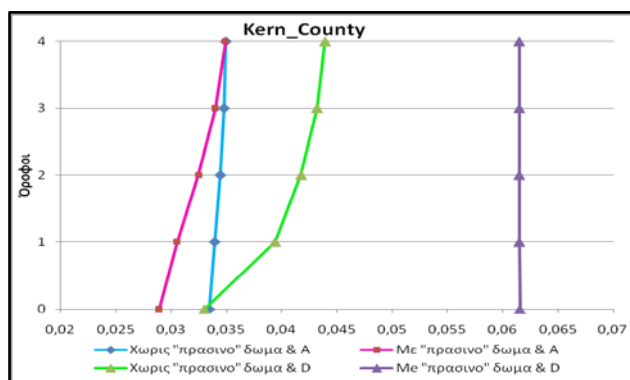
Κεφάλαιο 6^ο Αριθμητική διερεύνηση



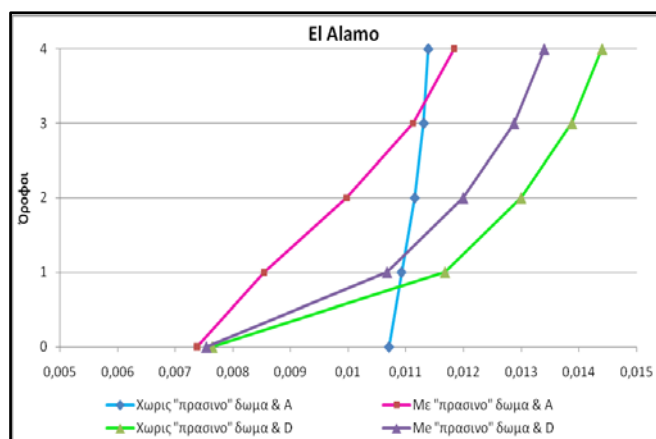
Διάγραμμα 6.27: Απόλυτη μετακίνηση ανά όροφο τη χρονική στιγμή 8s της σεισμικής καταγραφής Gazli_USSR.

II. Σεισμοί μακρινού πεδίου

Τα Διαγράμματα 6.28 έως 6.31 παρουσιάζουν τις απόλυτες μετακινήσεις των σεισμών μακρινού πεδίου (επίκεντρη απόσταση >30km). Αρχικά, ο βασικός παράγοντας που επηρέασε την κατασκευή είναι η αλλαγή του εδάφους θεμελίωσης.

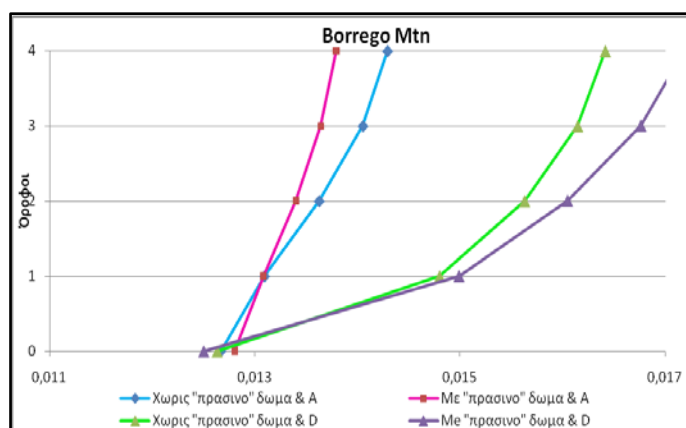


Διάγραμμα 6.28: Απόλυτη μετακίνηση ανά όροφο τη χρονική στιγμή 11s της σεισμικής καταγραφής Kern_County.

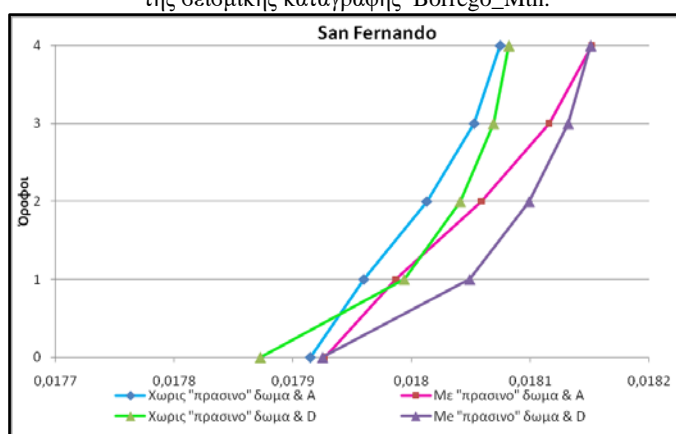


Διάγραμμα 6.29: Απόλυτη μετακίνηση ανά όροφο τη χρονική στιγμή 11s της σεισμικής καταγραφής El Alamo.

Κεφάλαιο 6^ο Αριθμητική διερεύνηση



Διάγραμμα 6.30: Απόλυτη μετακίνηση ανά όροφο τη χρονική στιγμή 23s της σεισμικής καταγραφής Borrego_Mtn.



Διάγραμμα 6.31: Απόλυτη μετακίνηση ανά όροφο τη χρονική στιγμή 22s της σεισμικής καταγραφής San Fernando.

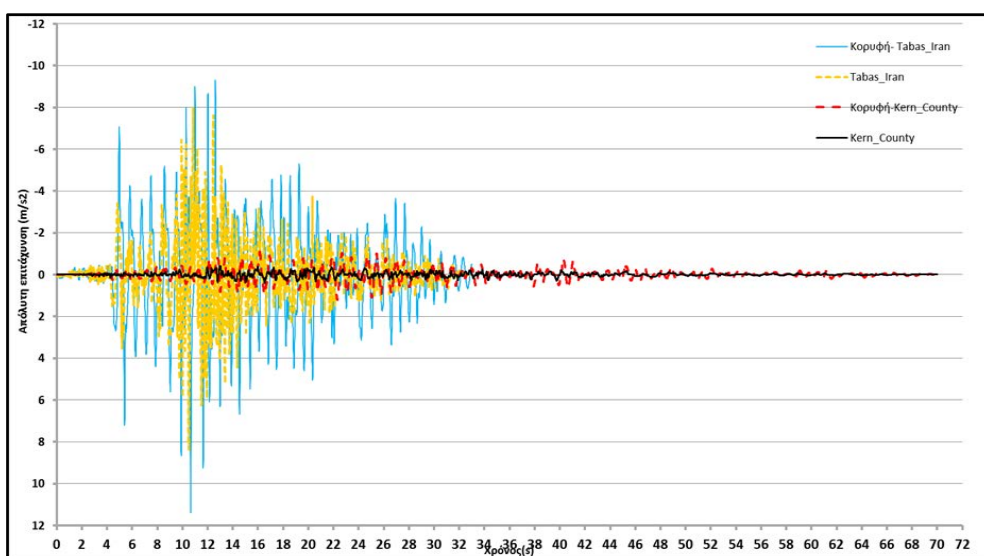
Όροφος	Μέγιστη σχετική μετακίνηση (m)
I. Κτίριο χωρίς «πράσινο» δώμα θεμελιωμένο σε έδαφος A t=10,38s	
1 ^{ος}	0,007701
2 ^{ος}	0,017682
3 ^{ος}	0,025694
4 ^{ος}	0,030294
II. Κτίριο με «πράσινο» δώμα θεμελιωμένο σε έδαφος A t=4,92	
1 ^{ος}	0,009732
2 ^{ος}	0,017364
3 ^{ος}	0,022769
4 ^{ος}	0,026016
III. Κτίριο χωρίς «πράσινο» δώμα θεμελιωμένο σε έδαφος D , για t=5,12s	
1 ^{ος}	0,076783
2 ^{ος}	0,080855
3 ^{ος}	0,082915
4 ^{ος}	0,083826
IV. Κτίριο με «πράσινο» δώμα θεμελιωμένο σε έδαφος D , t=5,14s	
1 ^{ος}	0,08713
2 ^{ος}	0,091813
3 ^{ος}	0,094615
4 ^{ος}	0,096168

Πίνακας 6.11: Σχετικές μετακινήσεις στη χρονική στιγμή που η κορυφή έχει την μέγιστη μετακίνηση για τον σεισμό Tabas_Iran.

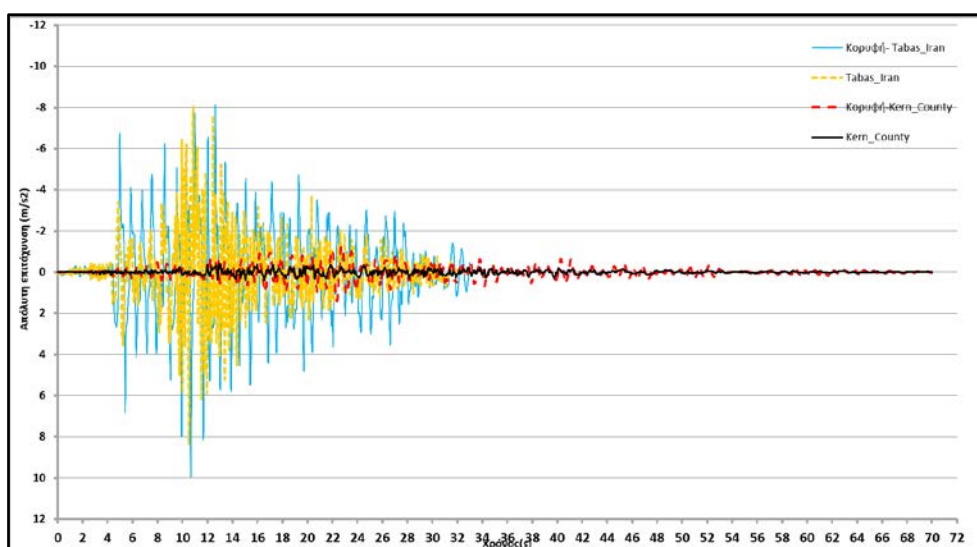
6.3.2 Οκταόροφο κτίριο

6.3.2.1 Χρονοϊστορίες απόλυτης επιτάχυνσης

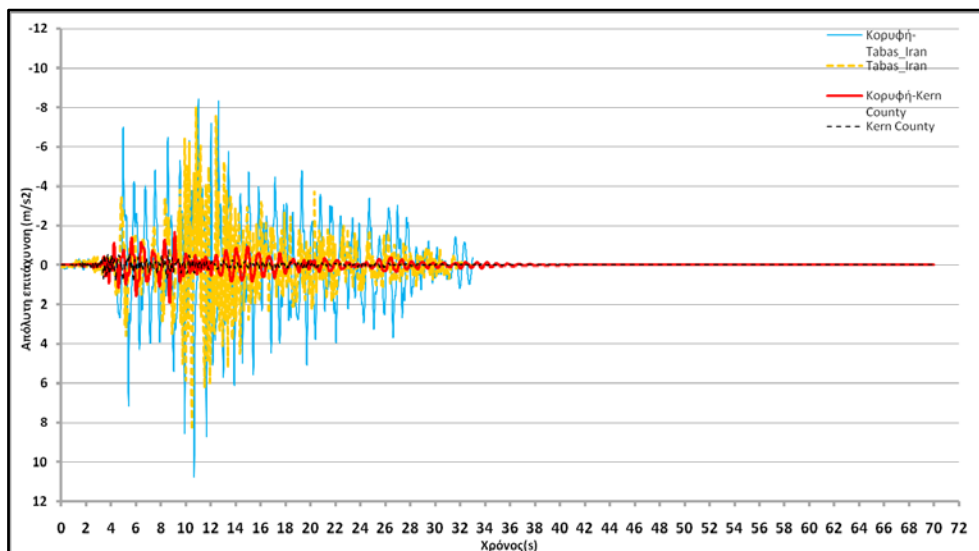
Στα Διαγράμματα 6.32 έως 6.35 παρουσιάζονται οι χρονοϊστορίες των απόλυτων οριζόντιων επιταχύνσεων του τελευταίου ορόφου (8^{ος}) και συγκρίνονται οι χρονοϊστορίες δυο σεισμικών διεγέρσεων. Οι σεισμικές διεγέρσεις που επιλέχθηκαν ενδεικτικά είναι ένας σεισμός κοντινού πεδίου (Tabas_Iran) και ένας κοντινού πεδίου (El Alamo) μακρινού πεδίου (βλ. Πίνακα 6.10).



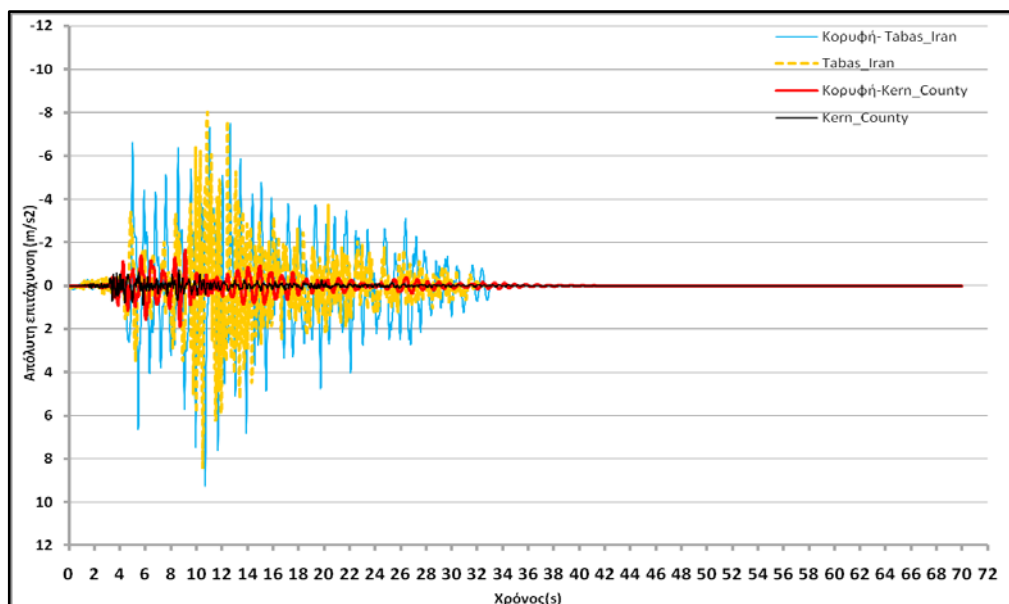
Διάγραμμα 6.32: Κτίριο οκτώ ορόφων χωρίς «πράσινο» δώμα, σε έδαφος θεμελίωσης Α.



Διάγραμμα 6.33: Κτίριο οκτώ ορόφων με «πράσινο» δώμα, σε έδαφος θεμελίωσης Α.



Διάγραμμα 6.34: Κτίριο οκτώ ορόφων χωρίς «πράσινο» δώμα, σε έδαφος θεμελίωσης D.



Διάγραμμα 6.35: Κτίριο οκτώ ορόφων με «πράσινο» δώμα, σε έδαφος θεμελίωσης D.

Παρατηρώντας τα διαγράμματα, διαπιστώνουμε ότι η μεγαλύτερη ενίσχυση της κορυφής προέκυψε όταν η κατασκευή ήταν θεμελιωμένη σε βράχο πρίν την προσθήκη του δώματος, λαμβάνοντας μεγαλύτερη τιμή από την σεισμική διέγερση Tabas_Iran. Σε αυτήν την περίπτωση (Διάγραμμα 6.32), την χρονική στιγμή (περίπου) 10s, η κορυφή εμφανίζει τιμή επιτάχυνσης 12m/s^2 σε σύγκριση με την βάση που αποκτά τιμή 8m/s^2 . Αντίστοιχα, στο Διάγραμμα 6.34 και 6.35 όπου η θεμελίωση της κατασκευής είναι από χαλαρή άργιλο ενισχύεται η κορυφή της κατασκευής, όμως με μικρότερες τιμές από ότι στο έδαφος Α. Συνολικά στις

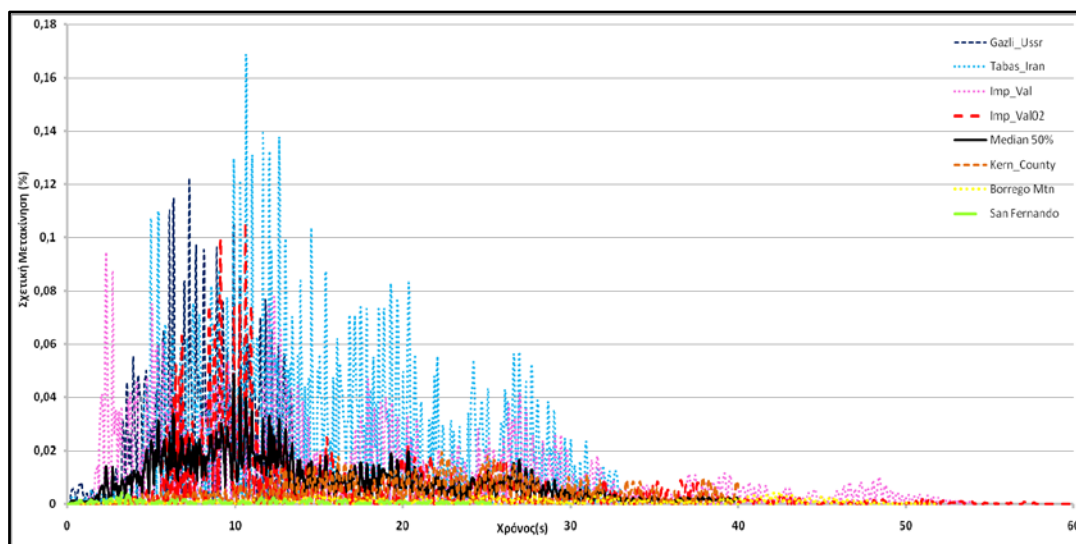
Κεφάλαιο 6^ο Αριθμητική διερεύνηση

χρονοϊστορίες των απόλυτων επιταχύνσεων παρατηρείται ότι το επιπλέον φορτίο από το «πράσινο» δώμα στην κορυφή της κατασκευής μείωσε την ενίσχυση της κορυφής

Όσον αφορά στη σεισμική διέγερση El Alamo, εμφανίζονται στη κορυφή τιμές που κυμαίνονται από 2 m/s^2 όταν η κατασκευή είναι θεμελιωμένη σε χαλαρή άργιλο. Επομένως, και στις δυο σεισμικές καταγραφές η κορυφή παρουσιάζει σχεδόν σε όλη την διάρκεια των χρονοϊστοριών, μεγαλύτερη επιτάχυνση από εκείνη της βάσης όμως οι τιμές μειώθηκαν μετά την προσθή του «πράσινου» δώματος στην κορυφή. Η μεγαλύτερη ενίσχυση της κορυφής παρατηρήθηκε στην περίπτωση του σεισμικού γεγονότος Tabas_Iran, στην κατασκευή που είναι θεμελιωμένη σε βραχώδες έδαφος χωρίς την προσθήκη του πράσινου δώματος.

6.3.2.2 Χρονοϊστορίες σχετικής μετακίνησης

Στη συνέχεια, παρατίθενται τα Διαγράμματα 6.36 έως 6.39 σχετικών μετακινήσεων της κορυφής σε κάθε ένα από τα επτά σεισμικά επιταχυνσιογραφήματα που μελετήθηκαν, τη χρονική στιγμή που ο 8^{ος} όροφος παρουσιάζει τη μεγαλύτερη σχετική μετακίνηση.

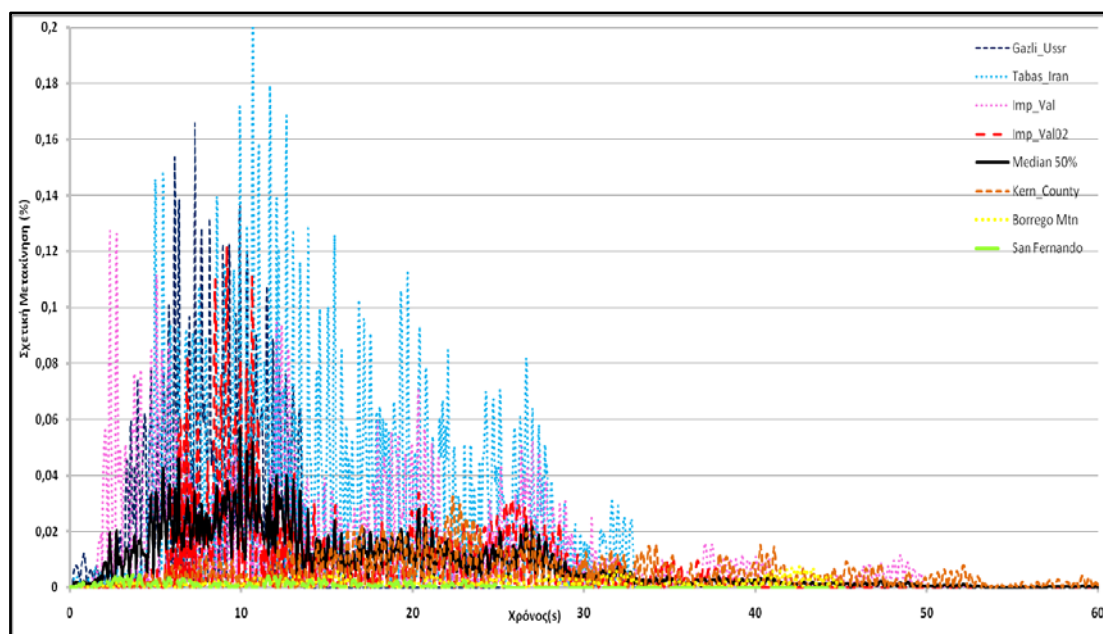


Διάγραμμα 6.36: Κτίριο οκτώ ορόφων χωρίς «πράσινο» δώμα, σε έδαφος θεμελίωσης Α.

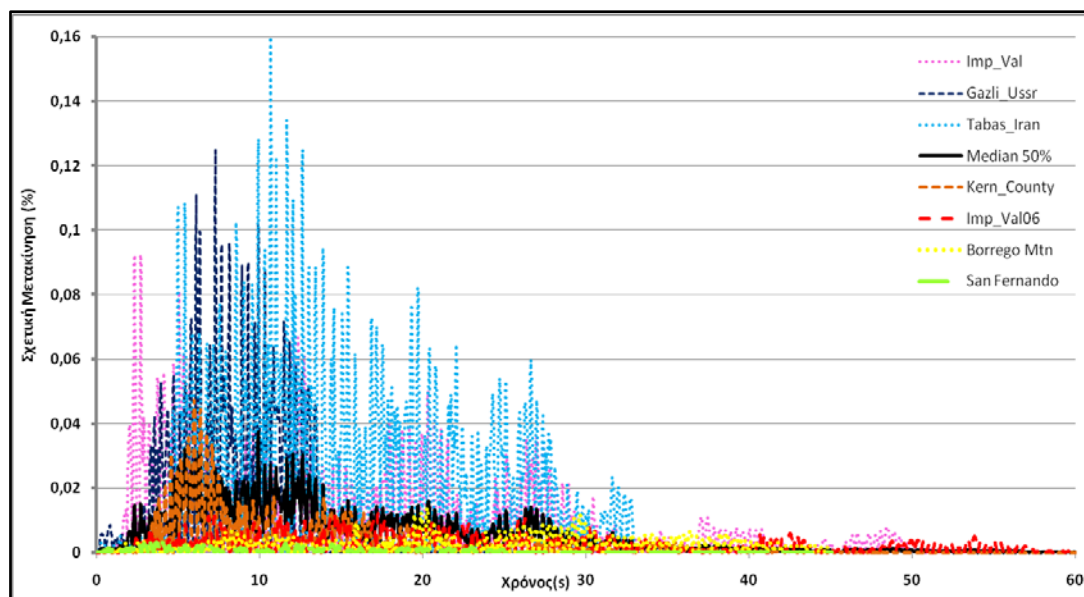
Πιο συγκεκριμένα, στις περιπτώσεις με το έδαφος Α, πριν και χωρίς την προσθήκη του πράσινου δώματος, η σχετική μετακίνηση της κορυφής είναι 0,17% και 0,2% αντίστοιχα, από τη σεισμική διέγερση Tabas_Iran. Παράλληλα, στο έδαφος θεμελίωσης D (μαλακό) πριν την προσθήκη του «πράσινου» δώματος η μέγιστη

Κεφάλαιο 6^ο Αριθμητική διερεύνηση

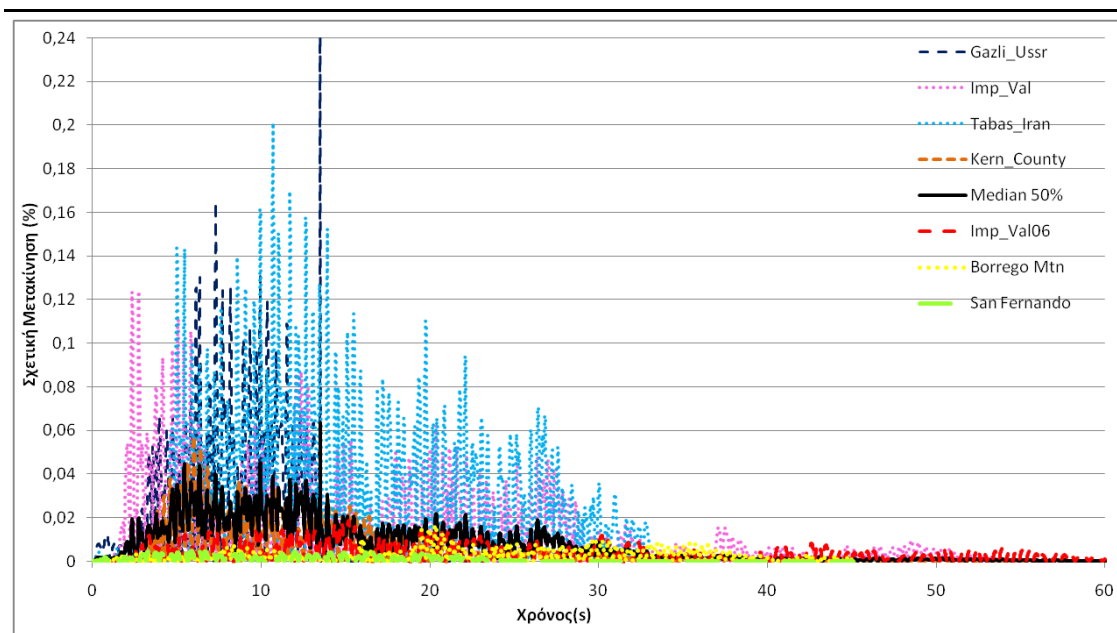
σχετική μετακίνηση φτάνει στο 0,11%. Γενικότερα, από τα Διαγράμματα 6.36 έως 6.39 προκύπτει ότι η μικρότερη σχετική μετακίνηση της κορυφής είναι στην περίπτωση που υπάρχει το πράσινο δώμα σε συνδυασμό με έδαφος θεμελίωσης D.



Διάγραμμα 6.37: κτίριο οκτώ ορόφων με «πράσινο» δώμα, σε έδαφος θεμελίωσης A.



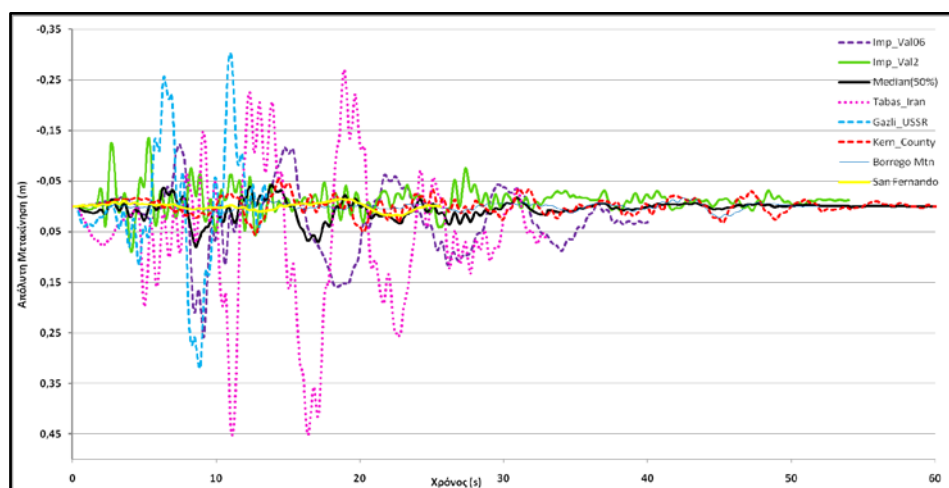
Διάγραμμα 6.38: Κτίριο οκτώ ορόφων χωρίς «πράσινο» δώμα, σε έδαφος θεμελίωσης D.



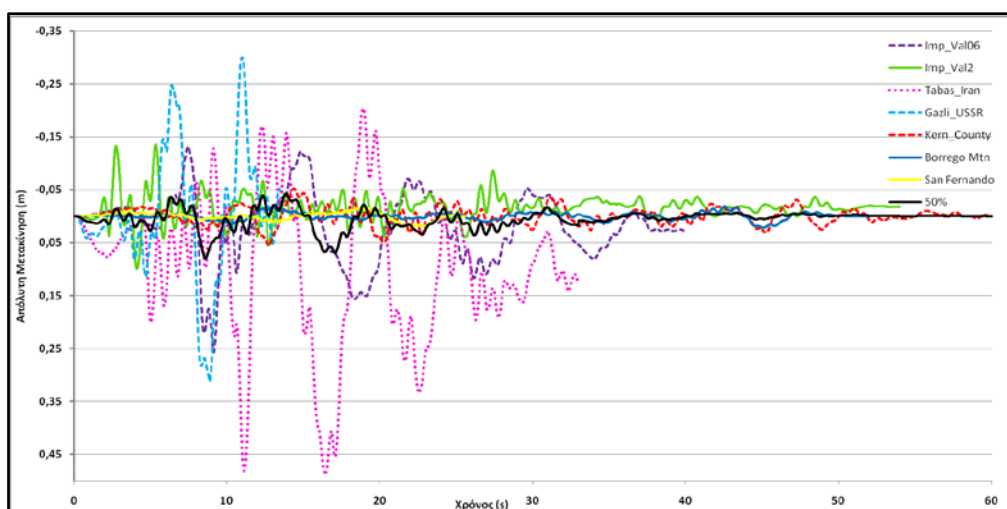
Διάγραμμα 6.39: Κτίριο οκτώ ορόφων με «πράσινο» δώμα, σε έδαφος θεμελίωσης D.

6.3.2.3 Χρονοϊστορίες απόλυτης μετακίνησης

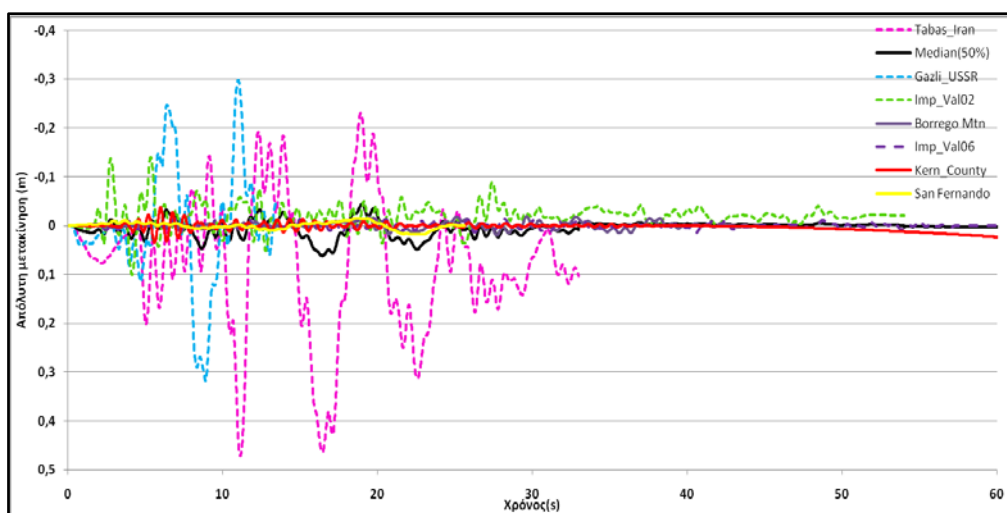
Τα Διαγράμματα 6.40 έως 6.43 απεικονίζουν τις χρονοϊστορίες των απόλυτων μετακινήσεων της κορυφής και των επτά σεισμικών γεγονότων που εξετάστηκαν, για κάθε έδαφος θεμελίωσης, πριν και μετά την προσθήκη «πράσινου» δώματος. Παρατηρείται εντονότερη διακύμανση, από τους τρεις σεισμούς κοντινού πεδίου, σχεδόν σε όλη τη διάρκεια του εκάστοτε σεισμικού γεγονότος. Η απόλυτη μετακίνηση της κορυφής αγγίζει τα 0,45m σε όλες τις περιπτώσεις, όπου οι τιμές αυτές λαμβάνονται από τα πρώτα κίχλας δευτερόλεπτα τις σεισμικής διέγερσης Tabas_Iran. Μελετώντας τα διαγράμματα και για τις υπόλοιπες σεισμικά καταγραφές, σε κανένα από αυτά η απόλυτη μετακίνηση της κορυφής δεν ξεπερνά το 0,01m.



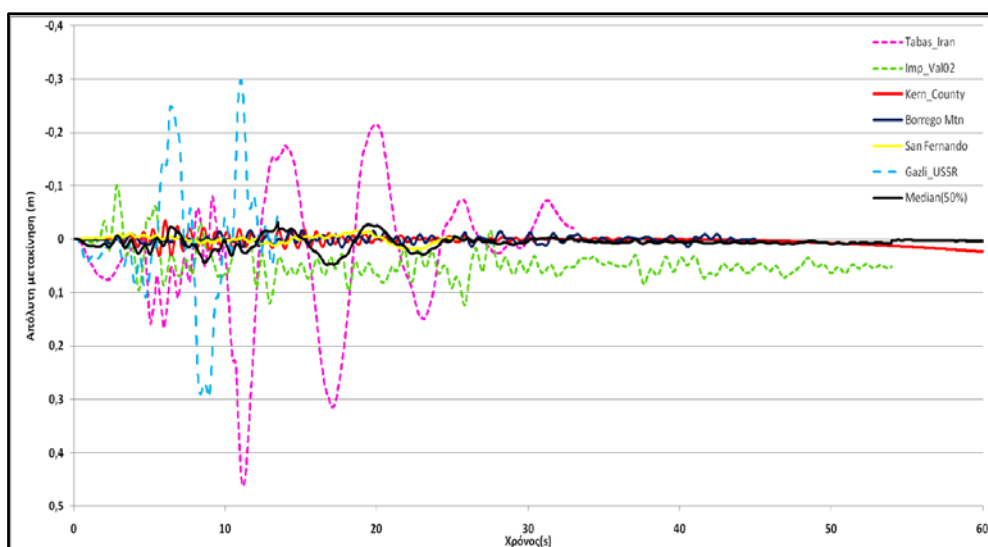
Διάγραμμα 6.40: Κτίριο οκτώ ορόφων χωρίς «πράσινο» δώμα, σε έδαφος θεμελίωσης A.



Διάγραμμα 6.41: Κτίριο οκτώ ορόφων με «πράσινο» δώμα, σε έδαφος θεμελίωσης Α.



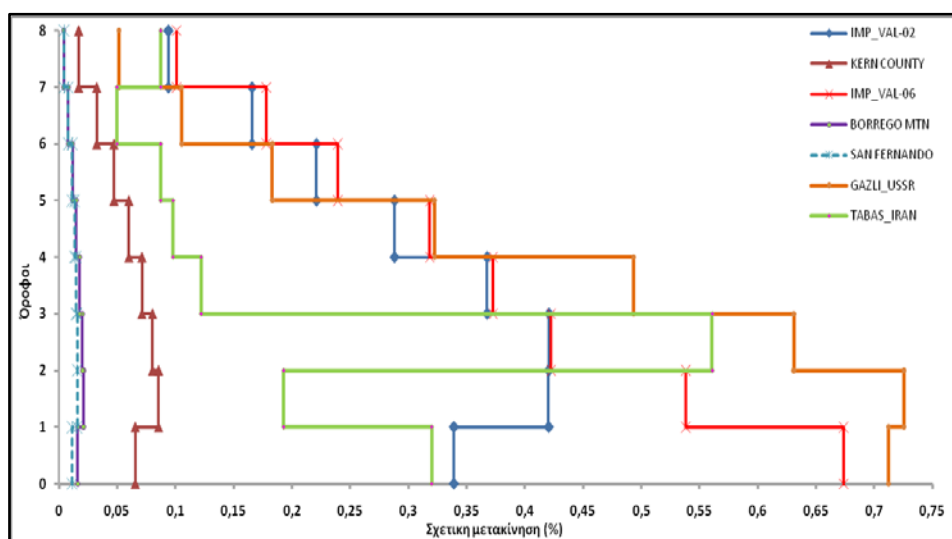
Διάγραμμα 6.42: Κτίριο οκτώ ορόφων χωρίς «πράσινο» δώμα, σε έδαφος θεμελίωσης D.



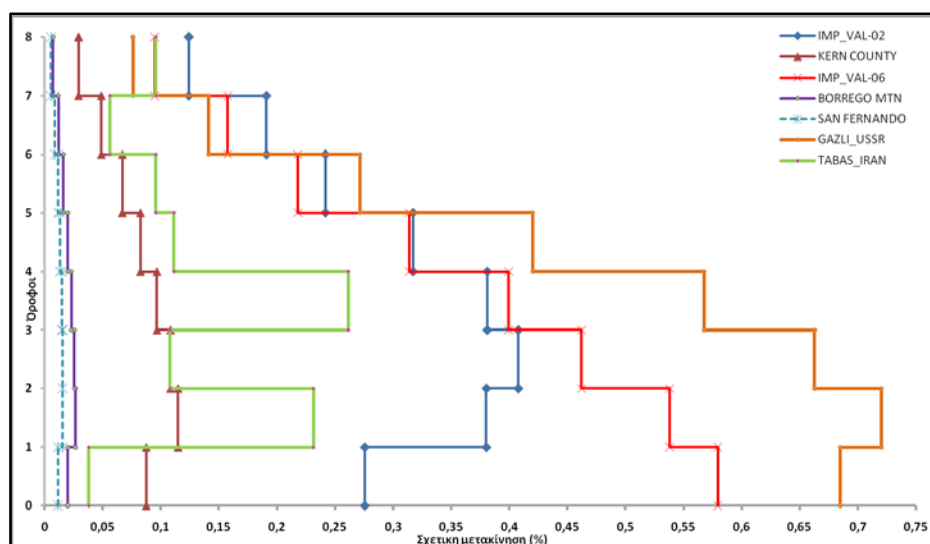
Διάγραμμα 6.43: Κτίριο οκτώ ορόφων με «πράσινο» δώμα, σε έδαφος θεμελίωσης D.

6.3.2.4 Σχετικές μετακινήσεις

Στα Διαγράμματα 6.44 έως 6.47, παρουσιάζονται σχετικές μετακινήσεις ανά όροφο και στις τέσσερις περιπτώσεις για τις επτά σεισμικές διεγέρσεις. Παρατηρείται ότι το κτίριο εμφανίζει την μεγαλύτερη σχετική μετακίνηση κατά την διάρκεια του σεισμικού γεγονότος Gazli_USSR 0,72% ανάμεσα στον 1^ο και το 2^ο όροφο. Αντίθετα, η κατασκευή μετακινήθηκε λιγότερο στη σεισμική καταγραφή San Fernando και η σχετική μετακίνηση σε όλους τους ορόφους είναι μικρότερη από 0,05%.



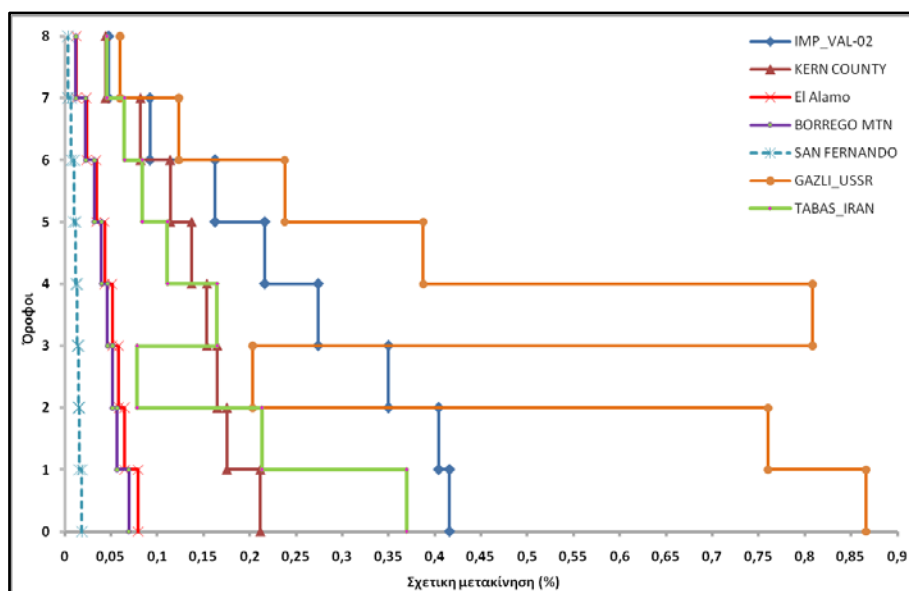
Διάγραμμα 6.44: Κτίριο οκτώ ορόφων χωρίς «πράσινο» δώμα, σε έδαφος θεμελίωσης Α.



Διάγραμμα 6.45: Κτίριο οκτώ ορόφων με «πράσινο» δώμα, σε έδαφος θεμελίωσης Α.

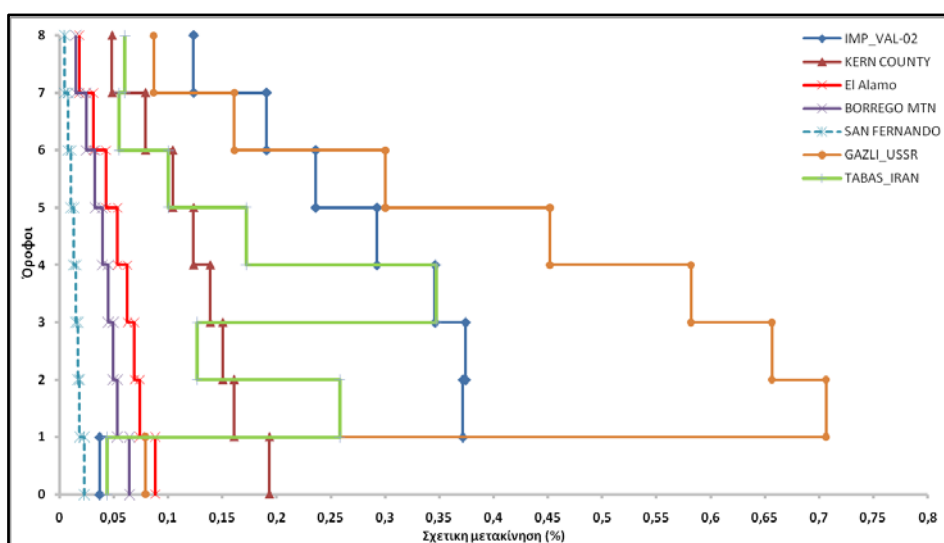
Κεφάλαιο 6^ο Αριθμητική διερεύνηση

Το Διάγραμμα 6.45 αναφέρεται στο οκταόροφο κτίριο που είναι θεμελιωμένο σε έδαφος Α μετά την προσθήκη του «πράσινου» δώματος. Σε αυτήν την περίπτωση η μέγιστη σχετική μετακίνηση είναι 0,73% μεταξύ 1^{ου} και 2^{ου} ορόφου κατά την διάρκεια της σεισμικής διέγερσης GAZLI_USSR.



Διάγραμμα 6.46: Κτίριο οκτώ ορόφων χωρίς «πράσινο» δώμα, σε έδαφος θεμελίωσης D.

Το Διάγραμμα 6.46, αναφέρεται στην περίπτωση κτιρίου χωρίς το «πράσινο» δώμα, όπου έχει αλλάξει το έδαφος θεμελίωσης από βράχο (κατηγορία Α) και έχει αντικατασταθεί με χαλαρό έδαφος (D). Όμως, και σε αυτήν την περίπτωση παρατηρείται ότι οι σεισμικές καταγραφές Kern_County έχουν μέγιστη τιμή 0,27% στην βάση του 1^{ου} και 0,11% στην κορυφή του 2^{ου} ορόφου, αντίστοιχα.



Διάγραμμα 6.47: Κτίριο οκτώ ορόφων με «πράσινο» δώμα, σε έδαφος θεμελίωσης D.

Το Διάγραμμα 6.47 απεικονίζει τις σχετικές μετακινήσεις με έδαφος θεμελίωσης D μετά την προσθήκη του «πράσινου» δώματος. Η μέγιστη σχετική μετακίνηση έχει προκληθεί από την σεισμική καταγραφή Tabas_Iran και φτάνει τα 0,90% στον 4^ο όροφο. Παρατηρώντας τα Διαγράμματα 6.44 έως 6.47, είναι εμφανές ότι στην περίπτωση όπου η θεμελίωση είναι σε έδαφος A, τότε οι όροφοι μεταξύ τους έχουν μεγαλύτερη σχετική μετακίνηση συγκριτικά με τις περιπτώσεις όπου η θεμελίωση είναι σε έδαφος κατηγορίας D. Όπως αναφέρθηκε και στο τετραόροφο κτίριο, η επιρροή και των επτά σεισμικών διεγέρσεων στην κατασκευή εξαρτάται από το συχνотικό περιεχόμενο της διέγερσης με δυσμενέστερες αυτές που είναι εγγύτερα στην εστία, αφού τα σεισμικά γεγονότα με τις μεγαλύτερες σχετικές μετακινήσεις είναι τα Tabas_Iran, Gazli_USSR και Imperial_Valley-02. Αντίστοιχα, οι υπόλοιπες τέσσερις σεισμικές καταγραφές Kern County, Imperial_Valley06, Borrego Mtn και San Fernando, που είναι σεισμοί μακρινού πεδίου (βλ. Πίνακα 6.10), σε όλες τις καταστάσεις που εξετάστηκε η κατασκευή, παρουσιάζουν τις μικρότερες σχετικές μετακινήσεις. Επίσης, τη μεγαλύτερη σχετική μετακίνηση την έχουμε από την κορυφή του 1^{ου} ορόφου έως την βάση του 2^{ου}. Η διαφορά στα διαγράμματα, είναι ότι σε όλες τις περιπτώσεις οι τιμές των σχετικών μετακινήσεων αλλάζουν και κυμαίνονται από 0,25%-0,75%. Η μεγαλύτερη σχετική μετακίνηση είναι 0,90%, στην περίπτωση που δεν έχει προστεθεί το «πράσινο δώμα» με έδαφος θεμελίωσης D. Γενικά, όπως φαίνεται στα διαγράμματα, για τις διάφορες σεισμικές καταγραφές προέκυψαν και πάλι ποικίλα αποτελέσματα, συνεπώς, το επιπλέον φορτίο λειτούργησε και θετικά και αρνητικά ως προς την καταπόνηση της κατασκευής.

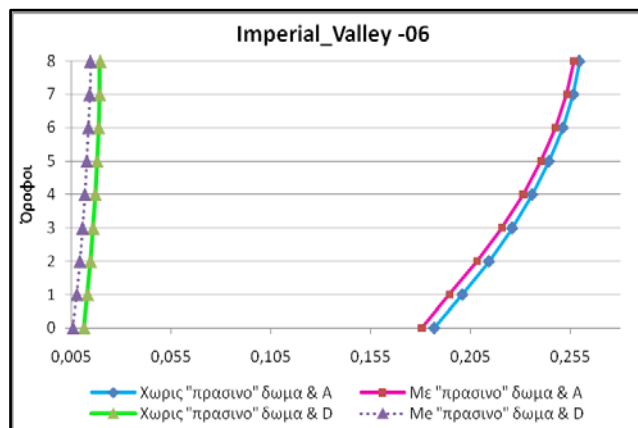
6.3.2.5 Απόλυτη μετακίνηση ανά όροφο

I. Σεισμοί κοντινού πεδίου

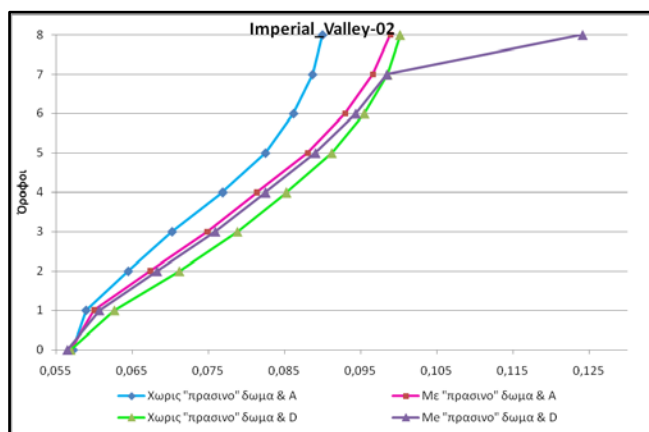
Τα Διάγραμμα 6.48 έως 6.51 απεικονίζουν τις απόλυτες μετακινήσεις των ορόφων στις περιπτώσεις που εξετάστηκαν στην οκταόροφη κατασκευή. Παρατηρώντας τα διαγράμματα για τους σεισμούς κοντινού πεδίου, η συμπεριφορά του κτιρίου με ίδιο έδαφος θεμελίωσης είναι παρόμοια. Στα Διαγράμματα 6.49 και 6.50 παρατηρείται μεγάλη διαφορά στην απόκριση λόγω της διαφοροποίησης του

Κεφάλαιο 6^ο Αριθμητική διερεύνηση

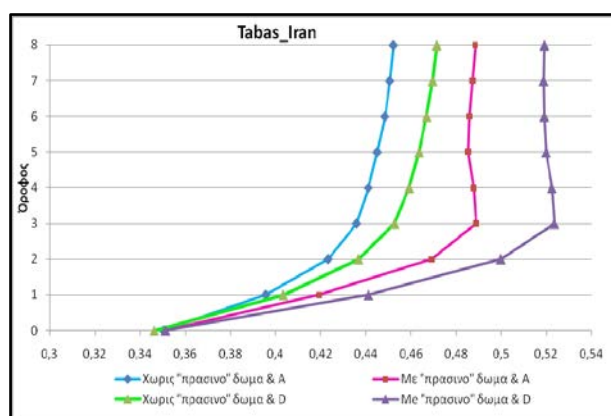
εδάφους και ελάχιστη επιρροή εξαιτίας του επιπλέον φορτίου λόγω πράσινου δώματος



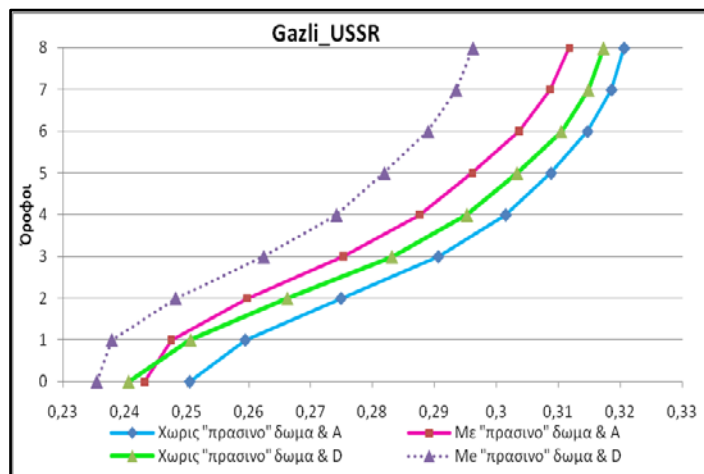
Διάγραμμα 6.48: Απόλυτη μετακίνηση ανά όροφο τη χρονική στιγμή 4s της σεισμικής καταγραφής Imperial_Valley-06.



Διάγραμμα 6.49: Απόλυτη μετακίνηση ανά όροφο τη χρονική στιγμή 9s.



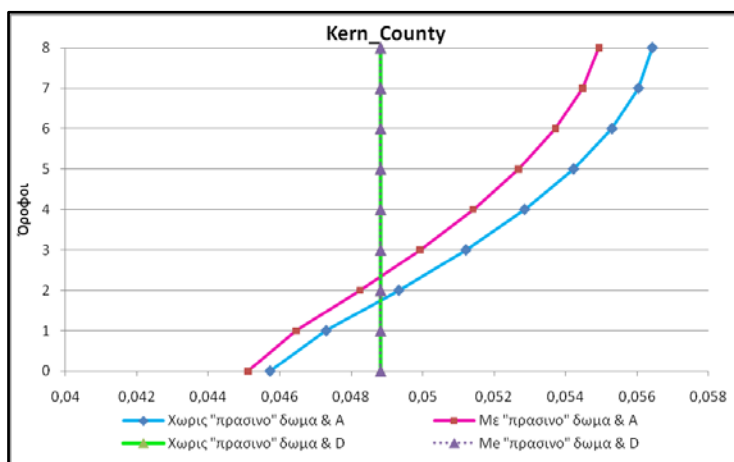
Διάγραμμα 6.50: Απόλυτη μετακίνηση ανά όροφο τη χρονική στιγμή 10s



Διάγραμμα 6.51: Απόλυτη μετακίνηση ανά όροφο τη χρονική στιγμή 8s της σεισμικής καταγραφής Gazli_USSR.

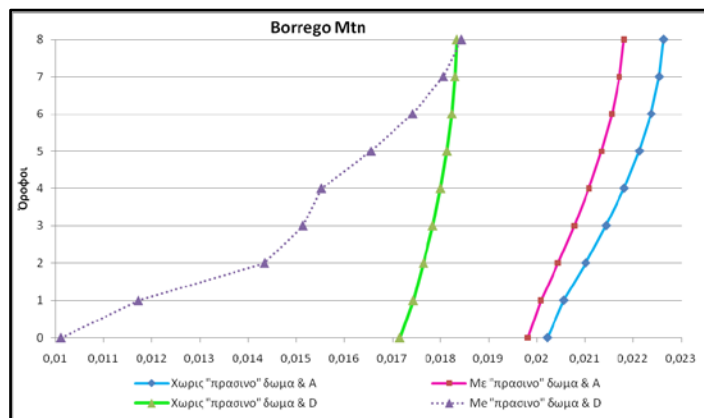
II. Σεισμοί μακρινού πεδίου

Συγκρίνοντας τα Διαγράμματα 6.52 έως 6.54 των απόλυτων μετακινήσεων για τους σεισμούς μακρινού πεδίου, παρατηρείται ότι οι περιπτώσεις με παρόμοια συμπεριφορά είναι όταν υπάρχει το ίδιο έδαφος θεμελίωσης. Επίσης, οι απόλυτες μετακινήσεις δεν διαφοροποιήθηκαν πολύ μετά το φορτίο που προστέθηκε στην κορυφή λόγω του φυτεμένου δώματος.

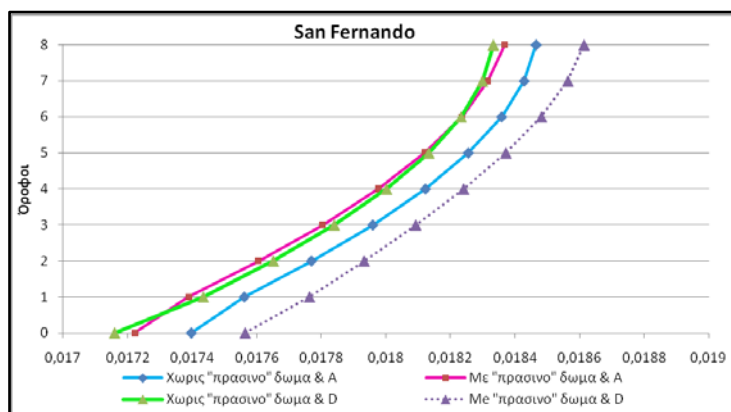


Διάγραμμα 6.52: Απόλυτη μετακίνηση ανά όροφο τη χρονική στιγμή 12s της σεισμικής καταγραφής El Alamo.

Κεφάλαιο 6^ο Αριθμητική διερεύνηση



Διάγραμμα 6.53: Απόλυτη μετακίνηση ανά όροφο τη χρονική στιγμή 10s του σεισμού Borrego_Mtn.



Διάγραμμα 6.54: Απόλυτη μετακίνηση ανά όροφο τη χρονική στιγμή 20s του σεισμού San Fernando.

Όροφος	Μέγιστη σχετική μετακίνηση (m)
I. Κτίριο χωρίς «πράσινο» δώμα θεμελιωμένο σε έδαφος A (t=11,42s)	
1 ^{ος}	0,095986
2 ^{ος}	0,153887
3 ^{ος}	0,170711
4 ^{ος}	0,174376
5 ^{ος}	0,177319
6 ^{ος}	0,179947
7 ^{ος}	0,181448
8 ^{ος}	0,182704
II. Κτίριο με «πράσινο» δώμα θεμελιωμένο σε έδαφος A (t=11,43s)	
1 ^{ος}	0,113433
2 ^{ος}	0,182816
3 ^{ος}	0,215144
4 ^{ος}	0,222983

Κεφάλαιο 6^ο - Αριθμητική διερεύνηση

5 ^{ος}	0,226322
6 ^{ος}	0,22919
7 ^{ος}	0,230873
8 ^{ος}	0,23267
III. Κτίριο χωρίς «πράσινο» δώμα θεμελιωμένο σε έδαφος D (t=11,96s)	
1 ^{ος}	0,113433
2 ^{ος}	0,182816
3 ^{ος}	0,215144
4 ^{ος}	0,222983
5 ^{ος}	0,226322
6 ^{ος}	0,22919
7 ^{ος}	0,230873
8 ^{ος}	0,23267
IV. Κτίριο με «πράσινο» δώμα θεμελιωμένο σε έδαφος D (t=33s)	
1 ^{ος}	0,926595
2 ^{ος}	0,927037
3 ^{ος}	0,926229
4 ^{ος}	0,924519
5 ^{ος}	0,922814
6 ^{ος}	0,922066
7 ^{ος}	0,922036
8 ^{ος}	0,922036

Πίνακας 6.12: Σχετικές μετακινήσεις στην χρονική στιγμή που η κορυφή έχει την μέγιστη μετακίνηση για τη σεισμική διέγερση Tabas_Iran.

Κεφάλαιο 7^ο

Συμπεράσματα

7.1. Γενικά Συμπεράσματα

Η κατασκευή των «πράσινων» δωματίων είναι μια πρακτική η οποία έχει ξεκινήσει από την αρχαιότητα και συνεχίζεται έως σήμερα. Στην εποχή μας για περιβαλλοντικούς κυρίως λόγους είναι επιτακτική η ανάγκη της διάδοσής τους. Στην Ελλάδα η εφαρμογή τους είναι ακόμα σε πολύ αρχικό στάδιο και έτσι κρίνεται σημαντική η δημιουργία κινήτρων για τη διάδοσή τους. Αυτό επιβεβαιώνεται και από το ότι σε κανέναν από τους σχετικούς νόμους που αφορούσαν πολεοδομικά ζητήματα δεν αναφερόταν τα φυτεμένα δώματα.

Απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή στον σχεδιασμό και στην εφαρμογή τους, έτσι ώστε να μην υπάρξουν προβλήματα στις φέρουσες κατασκευές επί των οποίων θα κατασκευασθούν. Σε κάθε κατασκευή «πράσινου» δώματος, υπάρχουν παράμετροι που το καθιστούν ξεχωριστό. Πρέπει, λοιπόν, να δίνεται μεγάλη σημασία σε αυτές τις παραμέτρους, όπως η στατική επάρκεια του κτιρίου, τα υλικά κατασκευής του φυτεμένου δώματος, οι κλιματικές συνθήκες που επικρατούν στην συγκεκριμένη τοποθεσία, η χρήση και η λειτουργία που πρόκειται να έχει ο κήπος, καθώς επίσης το είδος της φύτευσης και τέλος η συντήρησή του.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε αριθμητική διερεύνηση τυπικών πλαισιακών κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα, όσον αφορά την απόκρισή τους σε διάφορες διεγέρσεις που επιβάλλονται στη βάση τους, με και χωρίς την προσθήκη «πράσινου» δώματος. Η ανάλυση έγινε σε δύο πλαισιακές κατασκευές (με τέσσερις και οκτώ ορόφους), με φέροντα οργανισμό από οπλισμένο σκυρόδεμα, οι οποίες ήταν θεμελιωμένες σε δυο διαφορετικούς τύπους εδάφους (βράχο και μαλακό έδαφος), με σκοπό να εξεταστεί η επιρροή των ιδιομορφικών τους χαρακτηριστικών στην απόκρισή τους υπό μια ευρεία γκάμα δυναμικών φορτίσεων, αλλά και υπό διαφορετικές συνθήκες έδρασης. Σε κάθε μια από τις περιπτώσεις, τα αποτελέσματα της διερεύνησης όπως προέκυψαν από τις

ιδιομορφικές και δυναμικές μη-γραμμικές αναλύσεις (με χρήση κατάλληλων χρονοϊστοριών επιταχύνσεων), μέσω κατάλληλου λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων, παρουσιάστηκαν, αναλύθηκαν και συνοψίζονται στη συνέχεια σε γενικές παρατηρήσεις από τις οποίες εξάγονται ορισμένα προκαταρκτικά συμπεράσματα.

7.2. Συμπεράσματα από την Αριθμητική Διερεύνηση

Η υπολογιστική διερεύνηση πραγματοποιήθηκε με την ιδιομορφική ανάλυση των φορέων και με δυναμική μη-γραμμική ανάλυση με χρήση κατάλληλων χρονοϊστοριών επιταχύνσεων, μέσω του λογισμικού SAP200, όπως αναλυτικά παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 6. Αρχικά, η ιδιομορφική ανάλυση διενεργήθηκε σε όλες τις περιπτώσεις των κτιρίων και διαπιστώθηκε η αλλαγή στα ιδιομορφικά χαρακτηριστικά τους. Οι παράγοντες που επηρέασαν τα ιδιομορφικά χαρακτηριστικά είναι η διαφορά στο ύψος της κατασκευής (τετραόροφη και οκταόροφη), η αλλαγή των συνθηκών έδρασης (μαλακό και στιβαρό) καθώς και η προσθήκη της σημαντικής μάζας του «πράσινου» δώματος στην οροφή. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα της ιδιομορφικής ανάλυσης, από τους Πίνακες 6.1 έως 6.8, φαίνεται ότι οι κατασκευές επηρεάστηκαν λιγότερο από την προσθήκη του «πράσινου» δώματος, ενώ όταν άλλαξαν οι συνθήκες έδρασης υπήρξε μεγαλύτερη διαφορά στις ιδιοπεριόδους και ακόμη μεγαλύτερή όταν άλλαξε το ύψος της κατασκευής.

Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε η μελέτη των εξεταζόμενων κτιρίων μέσω δυναμικής μη-γραμμικής ανάλυσης με χρήση κατάλληλων χρονοϊστοριών. Για να θεωρηθεί αξιόπιστη αυτή η μέθοδος ανάλυσης θα πρέπει να χρησιμοποιούνται αρκετά επιταχυνσιογραφήματα. Στην περίπτωση της παρούσας εργασίας χρησιμοποιήθηκαν επτά επιταχυνσιογραφήματα σεισμών για κάθε περίπτωση. Από τις αναλύσεις για τις δύο τυπολογίες κτιρίων (τετραόρο και οκταόροφο) που μελετήθηκαν, προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

Η επιρροή των εδαφικών συνθηκών έδρασης στη σεισμική απόκριση των κτηρίων οπλισμένου σκυροδέματος είναι ιδιαίτερα σημαντική. Οι κατασκευές που είναι θεμελιωμένες σε τύπο εδάφους A (βράχος) έχουν καλύτερη συμπεριφορά συγκριτικά με τις εδραζόμενες σε τύπο εδάφους D (μαλακό). Οι εδαφικοί σχηματισμοί παίζουν το ρόλο ενός φυσικού φίλτρου, τροποποιώντας τα χαρακτηριστικά του κυματικού πεδίου που εισέρχεται σε αυτό. Συνήθως, η διέγερση από το βραχώδες υπόβαθρο ενισχύεται στην επιφάνεια του εδάφους και κατ'

επέκταση στη βάση της κατασκευής εξαιτίας της εδαφικής στρώσης. Βέβαια, μπορεί να υπάρξουν και οι περιπτώσεις, όπου ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της σεισμικής διέγερσης και τις τοπικές συνθήκες, μπορεί να υπάρξει εμφάνιση μη γραμμικών φαινομένων και απομείωσης του πλάτους της εδαφικής κίνησης στην επιφάνεια. Στις καταστάσεις που εξετάσθηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία παρατηρήθηκε ότι στις περιπτώσεις με στιβαρό έδαφος θεμελίωσης η κατασκευή εμφάνισε μικρότερη σχετική μετακίνηση στη βάση της συγκριτικά με τις περιπτώσεις όπου το έδαφος θεμελίωσης ήταν πιο μαλακό. Επίσης, όσον αφορά την κορυφή της κατασκευής, η μεγαλύτερη απόλυτη επιτάχυνση που προκύπτει κατά τη διάρκεια της σεισμικής διέγερσης (Διαγράμματα 6.9 έως 6.12 και 6.32 έως 6.35 για το τετραόροφο και το οκταόροφο κτίριο, αντίστοιχα) εμφανίζεται όταν το έδαφος θεμελίωσης είναι δύσκαμπτο.

Όσον αφορά στην προσθήκη του «πράσινου» δώματος στις περιπτώσεις που εξετάσθηκαν, συγκρίνοντας τις καταστάσεις με ή χωρίς το πράσινο δώμα, όταν έχουν της ίδιες συνθήκες έδρασης, φαίνεται ότι υπό συνθήκες μπορεί να επηρεάσει σημαντικά τη συμπεριφορά (μετακινήσεις ή/και επιταχύνσεις) των κτιριακών κατασκευών, κάτι το οποίο εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό κι από τα χαρακτηριστικά της επιβαλλόμενης σεισμικής κίνησης στη βάση τους. Αντίστοιχο συμπέρασμα προκύπτει κι από τη σύγκριση των διαγραμμάτων των σχετικών μετακινήσεων ανά όροφο, αλλά κι από τις απόλυτες μετακινήσεις ανά όροφο και στην κορυφή της κατασκευής, όπου τα χαρακτηριστικά της σεισμικής διέγερσης επηρεάζουν σημαντικά το ρόλο που θα έχει το «πράσινο» δώμα στην απόκριση του κτιρίου. Γενικά, στα μεγέθη των σχετικών μετακινήσεων προκύπτουν σημαντικές διαφοροποιήσεις για την ίδια σεισμική καταγραφή, τόσο στις τιμές των μέγιστων όσο και στη θέση που λαμβάνουν χώρα ανάλογα με την ύπαρξη ή όχι του «πράσινου» δώματος.

7.3 Προτάσεις για Μελλοντική Ερευνα

Από τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν προκύπτει ότι η δημιουργία ενός «πράσινου» δώματος σε μια κατασκευή επηρεάζει τη δυναμική συμπεριφορά του κτιρίου, αλλά αυτό εξαρτάται από πολλές παραμέτρους και δεν ήταν εφικτό να εξεταστούν όλοι και σε βάθος στο πλαίσιο μίας διπλωματικής εργασίας. Με αφετηρία

την παρούσα διπλωματική εργασία και για τη διεξαγωγή πιο ασφαλών συμπερασμάτων όσον αφορά στον ορισμό των επιπέδων καταπονήσεων και βλαβών των κατασκευών εξαιτίας των «πράσινων» δωματίων», απαιτείται περαιτέρω έρευνα, με πειραματικά αποτελέσματα και δεδομένα από επιτόπιες μετρήσεις. . Ενδιαφέρον θα είχε μία συνεχής ενόργανη παρακολούθηση κτιρίου με πράσινο δώμα. Σε επίπεδο προσομοίωσης προτείνεται η πιο πλήρης προσομοίωση της δυναμικής αλληλεπίδρασης της κατασκευής με και χωρίς φυτεμένο δώμα, για διάφορους τύπους εδαφών. Εξέταση διαφορετικών τύπων κτιρίων (μη κανονικών σε ύψος και κάτοψη, με μεταλλικό φέροντα οργανισμό, κ.λπ) θα είχε κι αυτή ενδιαφέρον για να καλυφθεί σε μεγαλύτερη έκταση το εξεταζόμενο πρόβλημα.

Πάντως, γενικά, τα «πράσινα» δώματα μπορούν να εξασφαλίσουν πολλά ενεργειακά, περιβαλλοντικά και κοινωνικά οφέλη, ενώ το κόστος κατασκευής τους δεν είναι απαγορευτικό καθώς επίσης και τα υπόλοιπα μειονεκτήματα που ενδεχομένως να παρουσιάσουν δύναται να έχουν προβλεφθεί με σκοπό να αποφευχθούν ή να αντιμετωπισθούν επαρκώς. Στο πλαίσιο αυτό, εξάλλου, μελετήθηκε στην παρούσα εργασία και η όποια δυνητική επιβάρυνση του φέροντος οργανισμού εξαιτίας του σεισμικού κινδύνου.

Εν κατακλείδι, στην Ελλάδα τα «πράσινα» δώματα αποτελούν μια νέα τάση που κερδίζει καθημερινά ολόένα και περισσότερο έδαφος στην εποχή μας, όπου η οικολογική ευαισθησία και η αειφόρος ανάπτυξη υποστηρίζεται ποικιλοτρόπως σε εθνικό και παγκόσμιο επίπεδο. Η κατασκευή τους απαιτεί προσεκτικό σχεδιασμό, για να αποφευχθούν προβλήματα στατικότητας και στεγάνωσης. Ευχής έργον θα ήταν τα «πράσινα» δώματα να αναπτυχθούν ευρέως στην χώρα μας στο άμεσο μέλλον για να μπορέσουμε να επωφεληθούμε από τις ποικίλες θετικές τους επιδράσεις.

Βιβλιογραφία

Ελληνική βιβλιογραφία

- Αμανατίδου, Χ. (2008). Διαφραγματική λειτουργία πατωμάτων σε κτίρια από φέρουσα λιθοδομή. Μεταπτυχιακή Διατριβή, Γενικό Τμήμα Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
- Γκλαβίνας, Ι. (2007). Έλεγχός επάρκειας υφιστάμενου κτιρίου και προσθήκη ορόφου, Μεταπτυχιακή εργασία, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη.
- Καλαμαρά, Π. (2012). Επιρροή της αλληλεπίδρασης εδάφους-κατασκευής στην σεισμική συμπεριφορά κτιρίων από οπλισμένο σκυρόδεμα, Τμήμα Δομικών Έργων, Τ.Ε.Ι Πειραιά, Αθήνα.
- Καλοειδάς, Α. (2017). Δυναμική Ανάλυση χρονοϊστορίας σε κτίριο με και χωρίς σεισμική μόνωση. Μεταπτυχιακή Εργασία, Τμήμα Αρχιτεκτόνων Μηχανικών, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
- Κιρτάς, Ε., Παναγόπουλος Γ. (2015). Προσομοίωση Κατασκευών σε προγράμματα Ηλεκτρονικού Υπολογιστή, Τμήμα Δομικών Μηχανικών, Τ.Ε.Ι. Κεντρικής Μακεδονίας, Σέρρες.
- Κολίοπουλος Κ. Π., Μανώλης Δ. Γ., Παναγιωτόπουλος Γ. Χ., (2013). Δυναμική των Κατασκευών. Ελληνικά Ακαδημαϊκά Ηλεκτρονικά Συγγράμματα και Βοηθήματα.
- Λυρατζάκης, Α. (2016). Αποτίμηση και ενίσχυση κτιρίου από φέρουσα τοιχοποιία με μη-γραμμική προσαυξητική δυναμική ανάλυση λαμβάνοντας υπόψη τον βαθμό κορεσμού του υπεδάφους. Μεταπτυχιακή Διατριβή, Τμήμα Αρχιτεκτόνων Μηχανικών, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
- Μιχαηλίδου, Ο.Ρ. (2010). Φυτεμένα δώματα στο Α.Π.Θ: Εφαρμογή, αποδοχή και προοπτικές, Μεταπτυχιακή Διατριβή, Τμήμα Αρχιτεκτόνων Μηχανικών-Τμήμα Γεωλογίας, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη.
- Νιταδωράκης, Ε. (2011). Ανελαστική ανάλυση κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα και μελέτη της αλληλεπίδρασης θεμελίωσης ανωδομής. Μεταπτυχιακή Διατριβή, Γενικό Τμήμα Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.

- Προβιδάκης Κ. (2004). Σημειώσεις τεχνική σεισμολογίας. Γενικό Τμήμα, Πολυτεχνείο Κρήτης.
- Ταγκούλη, Σ.Μ. (2013). Αποτίμηση φέρουσας ικανότητας πενταώροφου κτηρίου από οπλισμένο σκυρόδεμα. Μεταπτυχιακή Εργασία, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Ε.Μ.Π., Αθήνα.
- Τσάμπρας, Γ. (2011). SAP2000 Ανάλυση & σχεδιασμός κατασκευών με πεπερασμένα στοιχεία.
- Τσιαπιανίτης, Δ.Α. (2013). Μελέτη του ρόλου του υπεδάφους στην δυναμική απόκριση πυλώνων ανεμογεννητριών. Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
- ΥΠΕΚΑ, (2011). Προδιαγραφές φυτεμένου δώματος. Υπουργείο Περιβάλλοντος Ενέργειας & Κλιματικής Αλλαγής, Αθήνα.
- Ψυχάρης, Γ. (2008). Βοηθητικές σημειώσεις αντισεισμικής τεχνολογίας. Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Τομέας Δομοστατικής Μηχανικής, Ε.Μ.Π. Αθήνα.
- Ψυχάρης, Γ. (2016). Σημειώσεις Αντισεισμικής Τεχνολογίας Τεύχος 1. Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Τομέας Δομοστατικής Μηχανικής, Ε.Μ.Π. Αθήνα.

Διεθνής Βιβλιογραφία

- Batta V. & Pekau O.A. (1994). Application of boundary element analysis for multiple seismic cracking in concrete gravity dams», Department of Civil Engineering, Concordia University, Montreal, Canada.
- Boulfiza M., (2015). CE 463.3 Advanced Structural Analysis Lab: Introduction to SAP2000, Department of Civil & Geological Engineering University of Saskatchewan.
- Clifton G.C., (2009). Seismic Response of Green Roofs, Conference Paper.
- Comber M.V., Leed P.E., Poland, C., Sinclair M., (2012). Environmental Impact Seismic Assessment: Application of Performance-Based Earthquake Engineering Methodologies to Optimize Environmental Performance. ASCE Structures Congress.

- Eurocode 8 (EC8). (2004). Design provisions for earthquake resistance of structures- Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings, ENV 1998-1. European Committee for Standardization, Brussels.
- Goel R.K., (1999). SAP2000 Tutorial Department of Civil and Environmental Engineering California Polytechnic State University.
- Kowalkowski K., (2005). Tutorial to SAP2000 Student Edition for CE470, Design of Metal Structures.
- Lan N., (2007). SAP2000 Feature & A to Z problems. Bridge and Tunnel Division Da Nang University
- Mylonakis G., Nikolaou S., Gazetas G. (2006). Footing under seismic loading: analysis and design issues with emphasis on bridge foundation, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 26.
- Omenzetter P., Clifton G.C., (2009). Seismic Response of Green Roofs. University of Auckland, New Zealand.
- SAP2000, (2011). Introductory Tutorial for Linear and Nonlinear and Dynamic Analysis and Design of Three – Dimensional Structures.
- Veletsos A.S. (1977). Dynamics of structure-foundation systems, Prentice Hall, Englewood Cliffs.
- Veletsos A.S., Meek J.W. (1974). Dynamics behavior of building-foundation systems, Earthquake Engineering and Structural Dynamics
- Weilner S.K., Scholz-Barth K. (2009). Green Roof Systems.
- Welsh–Huggings S.J., Liel A.B. (2017). A life –cycle framework for integrating green building and hazard- resistant design: Examining the seismic impact of buildings with green roofs, Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering, University of Colorado, Boulder, USA

Ηλεκτρονική Βιβλιογραφία

<https://ngawest2.berkeley.edu/>

