



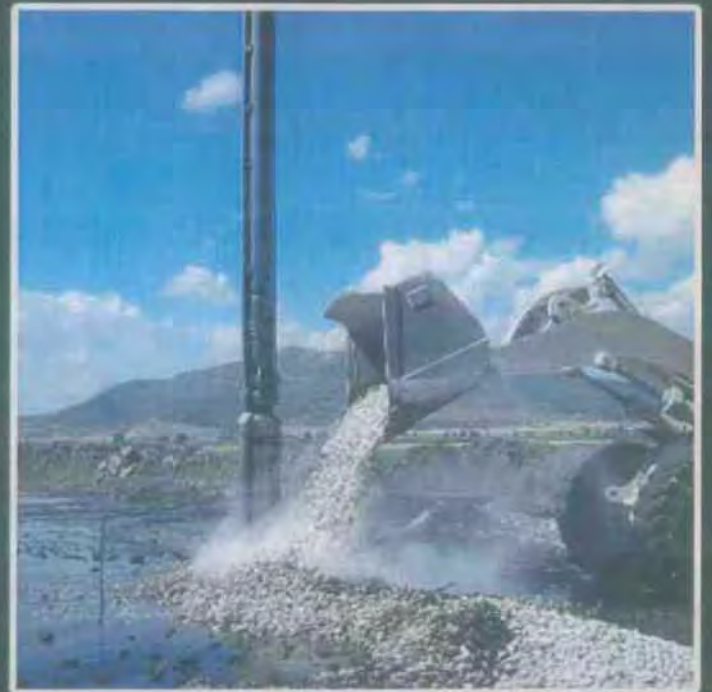
ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αριθμητική προσομοίωση της σεισμικής απόκρισης ομοιόμορφα βελτιωμένων εδαφών

Numerical simulation of seismic response of uniformly improved soil sites

ΦΟΙΤΗΤΗΣ
ΑΝΑΣΤΑΣΙΟΣ ΛΩΛΗΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ
ΑΧΙΛΛΕΑΣ ΠΑΠΑΔΗΜΗΤΡΙΟΥ





**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ & ΚΕΝΤΡΟ ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ
ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»**

Αριθ. Εισ.: 7305/1
Ημερ. Εισ.: 15-07-2009
Δωρεά: Συγγραφέας
Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ - ΠΜ
2009
ΛΩΛ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αριθμητική προσομοίωση της σεισμικής απόκρισης ομοιόμορφα βελτιωμένων εδαφών

Numerical simulation of seismic response of uniformly improved soil sites

ΦΟΙΤΗΤΗΣ
ΑΝΑΣΤΑΣΙΟΣ ΑΩΛΗΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ
ΑΧΙΛΛΕΑΣ ΠΑΠΑΔΗΜΗΤΡΙΟΥ

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ – ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ – ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΟΣ ΤΟΜΕΑΣ

ΒΟΛΟΣ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2009

Βόλος, Ιούλιος 2009

**Αριθμητική προσομοίωση της σεισμικής
απόκρισης ομοιόμορφα βελτιωμένων εδαφών**
Numerical simulation of seismic response of uniformly improved soil sites

ΦΟΙΤΗΤΗΣ
ΑΝΑΣΤΑΣΙΟΣ ΑΩΛΗΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ
ΑΧΙΛΛΕΑΣ ΠΑΠΑΔΗΜΗΤΡΙΟΥ

Μακέτα εξωφύλλου: Νικόλαος Δαλάκης
Φωτογραφίες εξώφυλλου & οπισθόφυλλου: images.google.com
Εκτύπωση - βιβλιοδεσία: "γραφίς", Κώστας Μάρκος, Κ. Μελενίκου 5, Θεσσαλονίκη

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η συστηματική μελέτη της επίδρασης της βελτίωσης στη σεισμική απόκριση ενός εύμητου εδάφους χωρίς απομείωση αντοχής (π.χ. μαλακή άργιλος) στο οποίο γίνεται προσθήκη πιο δύστημων γεωϋλικών (π.χ. χαλικοπάσσαλοι). Η βιβλιογραφική έρευνα υπέδειξε λίγες σχετικές δημοσιεύσεις, ενώ δεν βρέθηκε κάποιο καλά τεκμηριωμένο ιστορικό περιστατικό με σεισμικές καταγραφές σε κοντινές θέσεις με και χωρίς βελτίωση. Συγκεκριμένα, ως επί το πλείστον, η σχετική βιβλιογραφία αφορά τη συμπεριφορά μη συνεκτικών στρώσεων, είτε με δοκιμές φυγοκεντριστή ή με αριθμητικές αναλύσεις που υποδεικνύουν δυνητικά σημαντική διαφοροποίηση της σεισμικής απόκρισης, ειδικά σε χαμηλές περιόδους.

Πιο συγκεκριμένα, για τους σκοπούς της παρούσας εργασίας έγιναν 2Δ αναλύσεις σεισμικής απόκρισης ομοιόμορφα βελτιωμένου εδάφους για πενήντα οκτώ (58) συνδυασμούς εδάφους-βελτίωσης-διέγερσης, και στη συνέχεια, διερευνήθηκε η δυνατότητα ενός σύνθετου βελτιωμένου εδάφους να προσομοιωθεί ως ένα «ισοδύναμα-ομοιογενές» βελτιωμένο έδαφος με «ισοδύναμες» δυναμικές ιδιότητες. Όλες οι αναλύσεις ήταν γραμμικές ιξωδο-ελαστικές (με σταθερές τιμές μέτρων διάτμησης G και λόγου απόσβεσης ξ για το έδαφος και τον πάσσαλο) και εκτελέστηκαν με τον κώδικα πεπερασμένων διαφορών FLAC, επιβάλλοντας ως διέγερση κατακόρυφα κύματα SV στη μορφή ενός παλμού Ricker.

Τα αποτελέσματα υπέδειξαν ότι το αν η βελτίωση προκαλεί ενίσχυση ή απομείωση της μέγιστης σεισμικής επιτάχυνσης στην επιφάνεια του βελτιωμένου εδάφους (σε σύγκριση με το φυσικό έδαφος), εξαρτάται από την ιδιοπερίοδο του φυσικού εδάφους T_{soil} , την δεσπόζουσα περίοδο T_e της σεισμικής διέγερσης, το λόγο δυσστησιών $K_o = G_{i,o}/G_{s,o}$ (όπου $G_{i,o}$ το μέτρο διάτμησης του χαλικοπασσάλου και $G_{s,o}$ το μέτρο διάτμησης του φυσικού εδάφους) και το πραγματοποιούμενο ποσοστό αντικατάστασης $a_r(\%)$. Πιο συγκεκριμένα, απομείωση προκύπτει, εν γένει, όταν ο λόγος $T_{soil}/T_e < 1$ (χαμηλόσυχνες διεγέρσεις) και ενίσχυση όταν ο λόγος $T_{soil}/T_e > 1$ (υψίσυχνες διεγέρσεις). Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι η ιδιοπερίοδος του βελτιωμένου εδάφους είναι πάντα μικρότερη από αυτή του φυσικού εδάφους (δηλ. $T_{imp} < T_{soil}$), και συνεπώς, για χαμηλόσυχνες διεγέρσεις η βελτίωση «απομακρύνει» το έδαφος από τις συνθήκες συντονισμού, ενώ για τις υψίσυχνες η βελτίωση «φέρνει» το έδαφος εγγύτερα σε αυτές.

Από εκεί και πέρα, βρέθηκε ότι στην επιφάνεια του βελτιωμένου εδάφους η σεισμική κίνηση είναι πρακτικώς ομοιόμορφη, και συνεπώς, η 2Δ σεισμική απόκριση ενός απειρομήκους βελτιωμένου εδάφους μπορεί να προσομοιωθεί από 1Δ ανάλυση σεισμικής απόκρισης ενός “ισοδύναμα-ομοιογενούς” (βελτιωμένου) εδάφους. Η δυσστησιότητα $G_{eq,o}$ του ισοδύναμου ομοιογενούς βελτιωμένου εδάφους προσομοιώνεται με επαρκή ακρίβεια θεωρώντας ισοδυναμία διατμητικών τάσεων τ στο φυσικό έδαφος και τον πάσσαλο βελτίωσης, επιβεβαιώνοντας παλαιότερη ενδεικτική πρόταση των Bouckovalas et al (2006). Αντιθέτως, η θεώρηση ισοδυναμίας διατμητικών παραμορφώσεων γ στο φυσικό έδαφος και τον πάσσαλο βελτίωσης (σύμφωνα με τους Baez & Martin, 1993) που είναι η κρατούσα άποψη στη βιβλιογραφία) οδηγεί σε υπερεκτίμηση της δυσστησιότητας $G_{eq,o}$. Με βάση την ανωτέρω θεώρηση προκύπτει ότι η σχέση υπολογισμού της $G_{eq,o}$ είναι συνάρτηση του μέτρου δυσστησιότητας $G_{s,o}$ του φυσικού εδάφους, του λόγου δυσστησιών $K_o = G_{1,o}/G_{s,o}$ και του ποσοστού αντικατάστασης $a_r(\%)$, ενώ προκύπτει ανεξάρτητη της δεσπόζουσας περιόδου T_e της σεισμικής διέγερσης και του πάχους H_{imp} της βελτίωσης σε σχέση με το πάχος H της στρώσης του φυσικού εδάφους.

Έχοντας εκτιμήσει το ισοδύναμο μέτρο δυσστησιότητας $G_{eq,o}$, η σεισμική απόκριση απειρομήκους βελτιωμένου εδάφους μπορεί να εκτιμηθεί με βάση 1Δ αναλύσεις σεισμικής απόκρισης. Ειδικότερα, και μόνο αν η βελτίωση φθάνει μέχρι το σεισμικό υπόβαθρο ($H_{imp}=H$), τότε η εκτίμηση της ενίσχυσης ή απομείωσης της μέγιστης σεισμικής επιτάχυνσης λόγω βελτίωσης μπορεί να εκτιμηθεί με ικανοποιητική ακρίβεια και με βάση την κυματική θεωρία για ομοιόμορφη οριζόντια στρώση εδάφους επί ελαστικού βραχώδους υποβάθρου.

Επισημαίνεται ότι η αναλυτική σχέση εκτίμησης της δυσστησιότητας $G_{eq,o}$ επιβεβαιώθηκε από ιξωδο-ελαστικές αναλύσεις, και συνεπώς η χρήση της περιορίζεται για μικρής έντασης σεισμικές διεγέρσεις για τις οποίες ισχύουν με ακρίβεια οι ιξωδο-ελαστικές αναλύσεις. Από εκεί και πέρα, η χρήση 1Δ αναλύσεων σεισμικής απόκρισης “ισοδύναμα-ομοιόμορφου” (βελτιωμένου) εδάφους είναι κατάλληλη μόνο για απειρομήκειες γεωμετρίες βελτίωσης, καθώς για περιπτώσεις (οριζοντίως) τοπικής βελτίωσης οι 2Δ αναλύσεις σεισμικής απόκρισης είναι μονόδρομος.

ABSTRACT

The scope of this diploma thesis is the systematic study of the effect of soil improvement on the seismic response of a low stiffness soil without strength degradation (e.g. soft clay), in which much stiffer materials (e.g. gravel-piles) have been installed. The literature survey revealed few related publications, which do not include a well documented case history of seismic recordings in neighbouring locations with and without improvements. In particular, the related literature focuses on the response of non cohesive layers, either via centrifuge testing or via numerical analyses, which show potentially significant differentiation of the seismic response, especially for low periods.

More specifically, for the purposes of this diploma thesis 2D seismic response analyses were performed for fifty eight (58) combinations of soil-improvement-excitation conditions, and in the sequel, the potential for simulating a composite improved ground as an “equivalent-uniform” improved soil with “equivalent” dynamic properties was examined. All the analyses were linear visco-elastic (with fixed shear modulus G and hysteretic damping ξ values for the soft ground and the gravel-pile) and were carried out with the finite difference code FLAC, by applying vertically propagating SV waves in the form of a Ricker pulse as an excitation.

The results showed that whether the improvement causes amplification or de-amplification of the maximum seismic acceleration at the surface of the improved soil (in comparison to the natural soil) depends on the eigen period of the natural soil T_{soil} , the predominant period T_e of the seismic excitation, the improvement-to-soil maximum shear stiffness ratio $K_o = G_{i,o}/G_{s,o}$ (where $G_{i,o}$ the shear modulus of the gravel-pile and $G_{s,o}$ the shear modulus of natural soil) and the improvement area ratio a_r (%). In particular, de-amplification generally occurs when the natural soil to seismic excitation predominant period ratio $T_{soil}/T_e < 1$ (low frequency excitations), while amplification occurs when the natural soil to seismic excitation predominant period ratio is $T_{soil}/T_e > 1$ (small frequency excitations). This because the eigenperiod of the improved soil is always smaller than that of the natural soil (i.e. $T_{imp} < T_{soil}$), and therefore, when for low period excitations the improvement “distances” the site from resonance conditions, while for high frequency excitations the improvement brings the site closer to resonance.

In addition, it has been found that at the surface of the improved ground the seismic motion is practically uniform, and therefore, the 2D seismic response of an infinitely improved soil site can be simulated by a 1D seismic response analysis of an “equivalently-uniform” (improved) soil site. The shear modulus $G_{eq,o}$ of the equivalent uniform (improved) soil is simulated with sufficient accuracy, by considering equal shear strain τ between the natural soil and the gravel pile, thus confirming an earlier Bouckovalas et al (2006) indicative proposal. On the contrary, considering shear deformation γ equality between the natural soil and the gravel pile (according to Baez & Martin, 1993), which is the prevalent opinion in the international literature today) leads to overestimation of the value of the shear modulus $G_{eq,o}$. Based on the above, the relation for calculating $G_{eq,o}$ depends on the shear modulus $G_{s,o}$ of natural soil, the improvement-to-soil maximum shear stiffness ratio $K_o = G_{i,o}/G_{s,o}$, the improvement area ratio a_r (%) and does not depend on the predominant period T_e of the seismic excitation and the depth H_{imp} of the improvement in regards to the thickness H of the natural soil.

Once we have estimated the equivalent shear modulus $G_{eq,o}$, the seismic response of the infinitely improved soil site can be calculated based on 1D seismic response analyses. In particular, if the depth of improvement reaches the seismic bedrock ($H_{imp}=H$), then the estimation of the amplification or the de-amplification of the maximum seismic acceleration due to the improvement may be estimated with sufficient accuracy on the basis of wave propagation theory for a horizontal uniform soil layer lying on elastic bedrock.

It should be noted that, the analytical relation for estimating the shear modulus $G_{eq,o}$ was confirmed by visco-elastic analyses, and therefore, its use is limited for low intensity excitations, for which visco-elastic analyses are valid. Furthermore, the use of 1D seismic response analyses of “equivalent-uniform” (improved) ground is suitable only for infinitely improved soil sites. In contrast, (horizontally) locally improved sites can be analyzed only with 2D seismic ground response analyses.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η διπλωματική εργασία μπορεί να θεωρηθεί ως το masterpiece ενός προπτυχιακού φοιτητή και αποτελεί το απαύγασμα όλων των γνώσεων που αποκτά κάποιος κατά την διάρκεια των φοιτητικών του χρόνων. Για την ολοκλήρωση της διπλωματικής αυτής εργασίας ήταν αναγκαία, εκτός από την προσωπική δουλειά, η συμπαράσταση, η βοήθεια και η καθοδήγηση που έλαβα από πολλούς και για το λόγο αυτό κρίνω σκόπιμο να τους αναφέρω

Πρώτα από όλους θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου, κ. Αχιλλέα Παπαδημητρίου, Λέκτορα του τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, ο οποίος με τις υποδείξεις και την κριτική του έβαλε τη σκέψη μου και τη δουλειά μου στο σωστό δρόμο. Η προσφορά του στην ποιότητα της διπλωματικής καθώς και σε θέματα προγραμματισμού και χειρισμού του κώδικα πεπερασμένων διαφορών FLAC5 είναι ανεκτίμητη.

Στη συνέχεια θα ήθελα να ευχαριστήσω τον φίλο μου Νικόλαο Δαλάκη, συνάδελφο μηχανικό ο οποίος επιμελήθηκε τον σχεδιασμό του εξωφύλλου της διπλωματικής μου καθώς επίσης και την φίλη μου, Χρυσούλα Κολίτσα για την διόρθωση των κειμένων της εργασίας μου.

Τέλος, πάνω από όλα θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου και όλους τους φίλους μου, για την συνεχή ψυχολογική υποστήριξη και συμπαράστασή τους όλα αυτά τα χρόνια καθώς και στην πορεία εκτέλεσης της διπλωματικής, έτσι ώστε να να ξεπερνάω κάθε δυσκολία.

ΛΩΛΗΣ ΑΝΑΣΤΑΣΙΟΣ

Βόλος, Ιούλιος 2009

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ	1
1.2 ΔΙΑΡΘΡΩΣΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	2

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΣΤΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

2.1 ΓΕΝΙΚΑ	4
2.2 ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΒΕΛΤΙΩΜΕΝΩΝ ΕΔΑΦΩΝ	5
2.3 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ 3Δ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΟΜΟΙΟΜΟΡΦΑ ΒΕΛΤΙΩΜΕΝΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ ΜΕ 2Δ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ	11
2.4 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ 2Δ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΒΕΛΤΙΩΣΗΣ ΜΕ 1Δ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ	23

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ

3.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ	32
3.2 ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ	36
3.2.1 Γενικά	36
3.2.2 Επίδραση εύρους καννάβου στην ακρίβεια της ανάλυσης	38
3.2.3 Επίδραση διακριτοποίησης καννάβου στην ακρίβεια της ανάλυσης	40
3.2.4 Διαδικασία αναλύσεων και επεξεργασίας αποτελεσμάτων	42

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΒΕΛΤΙΩΜΕΝΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ

4.1 ΓΕΝΙΚΑ	44
4.2 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΣΧΕΤΙΚΗΣ ΔΥΣΚΑΜΨΙΑΣ ΧΑΛΙΚΟΠΑΣΣΑΛΩΝ	48
4.3 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΠΟΣΟΣΤΟΥ ΑΝΤΙΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΦΥΣΙΚΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ	59
4.4 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΔΕΣΠΟΖΟΥΣΑΣ ΠΕΡΙΟΔΟΥ ΔΙΕΓΕΡΣΗΣ	67
4.5 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΒΑΘΟΥΣ ΒΕΛΤΙΩΣΗΣ	76

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΔΥΝΑΜΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΙΣΟΔΥΝΑΜΑ-ΟΜΟΙΟΜΟΡΦΟΥ ΒΕΛΤΙΩΜΕΝΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ

5.1 ΓΕΝΙΚΑ	83
5.2 ΔΥΣΤΜΗΣΙΑ ΙΣΟΔΥΝΑΜΑ-ΟΜΟΙΟΜΟΡΦΟΥ ΒΕΛΤΙΩΜΕΝΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ	86
5.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΤΙΚΩΝ ΠΡΟΒΛΕΨΕΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΒΕΛΤΙΩΣΗΣ ΣΤΗ ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΒΕΛΤΙΩΜΕΝΩΝ ΕΔΑΦΩΝ	94

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ-ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

6.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	103
6.2 ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ	104

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	106
--------------------	-----

Κεφάλαιο 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Αντικείμενο

Σε κάποιες εκ των περιπτώσεων όπου το έδαφος είναι πολύ εύτμητο ή/και χαμηλής διατμητικής αντοχής, η χρήση του ως μέσου θεμελίωσης προϋποθέτει τη βελτίωσή του με γεωϋλικά μικρότερης παραμορφωσιμότητας ή/και μεγαλύτερης διατμητικής αντοχής. Στις περιπτώσεις αυτές, η βελτίωση επιτυγχάνεται είτε μέσω αντικατάστασης ενός ποσοστού του φυσικού εδάφους (π.χ. δονητική αντικατάσταση με χάλικες) ή μέσω σταθεροποίησης ενός ποσοστού του φυσικού εδάφους (π.χ. εδαφική ανάμιξη με τσιμέντο). Στις περιπτώσεις αυτές το βελτιωμένο έδαφος είναι πλέον σύνθετο και αποκτά μηχανικές ιδιότητες που είναι, εν γένει, διαφορετικές από εκείνες του φυσικού εδάφους. Το πόσο διαφορετικές είναι οι μηχανικές ιδιότητες εξαρτάται από το είδος του γεωϋλικού βελτίωσης και το «ποσοστό αντικατάστασης» που υλοποιήθηκε. Σημειώνεται εδώ, ότι ο όρος «ποσοστό αντικατάστασης» χρησιμοποιείται καταχρηστικά στο κείμενο ολόκληρης της διπλωματικής εργασίας, απλά ως μια ένδειξη του ποσοστού του φυσικού εδάφους που αλλάζει ιδιότητες, ανεξάρτητα από τη μεθοδολογία βελτίωσης με την οποία αυτό επιτυγχάνεται, δηλαδή ο όρος δεν αντικατοπτρίζει χρήση μεθοδολογίας βελτίωσης με εδαφική αντικατάσταση.

Για παράδειγμα, μια στρώση μαλακής αργίλου που έχει βελτιωθεί με χαλικοπασσάλους για τη μείωση των καθιζήσεων έχει διαφορετική σεισμική απόκριση από στρώση του φυσικού (μαλακού) εδάφους. Παρόλα αυτά, το γεγονός αυτό σπανίως λαμβάνεται υπόψη στο σχεδιασμό της ανωδομής, καθώς αυτό συνεπάγεται εκτέλεση τουλάχιστον 2Δ (αν όχι 3Δ) αναλύσεων σεισμικής εδαφικής

απόκρισης. Επιπλέον, η επιλογή για τη μη εκτέλεση αναλύσεων πολύ συχνά στηρίζεται στην αυθαίρετη παραδοχή ότι η επίδραση της βελτίωσης στη σεισμική απόκριση της ανωδομής είναι ευεργετική, κάτι το οποίο δεν είναι αναγκαστικά αληθές.

Πιο ακριβής σχεδιασμός θα μπορούσε να επιτευχθεί αν οι αναγκαίες αναλύσεις σεισμικής απόκρισης του εδάφους μπορούσαν να εκτελεστούν με απλούστερες μεθοδολογίες, όπως οι 1Δ ισοδύναμα-γραμμικές αναλύσεις (π.χ. με χρήση του SHAKE91, Idriss & Sun 1992). Για να μπορέσει να γίνει αυτό θα πρέπει πρώτα να εξασφαλισθεί αν η σεισμική απόκριση ενός σύνθετου (έδαφος & υλικό βελτίωσης) βελτιωμένου εδάφους εμφανίζει αρκετή ομοιομορφία, ώστε να μπορεί να αποδοθεί με την απόκριση ενός ισοδύναμα-ομοιογενούς βελτιωμένου εδάφους. Στη συνέχεια θα πρέπει να καταστρωθεί μια μεθοδολογία εκτίμησης των μηχανικών ιδιοτήτων του ισοδύναμα-ομοιογενούς εδάφους που θα επιτρέπουν τη χρήση απλούστερων μεθοδολογιών, όπως οι 1Δ ισοδύναμα-γραμμικές αναλύσεις.

1.2 Διάρθρωση διπλωματικής εργασίας

Στο **κεφάλαιο 2** παρουσιάζεται μια κριτική επισκόπηση της βιβλιογραφίας που εντοπίστηκε. Πιο συγκεκριμένα, στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται αποτελέσματα από δοκιμές σεισμικής απόκρισης βελτιωμένων εδαφών υπό κλίμακα και δίνονται κάποιες αναλυτικές σχέσεις προσομοίωσης της ταλάντωσης του συστήματος εδάφους-πασσάλων προς απλούστευση της αριθμητικής προσομοίωσης.

Στο **κεφάλαιο 3** γίνεται μία περιγραφή του κώδικα πεπερασμένων διαφορών FLAC5, ο οποίος χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση στις 2Δ αναλύσεις του βελτιωμένου με χαλικοπασσάλους εδάφους, αλλά και στις 1Δ αναλύσεις του φυσικού και του ισοδύναμα-ομοιόμορφου βελτιωμένου εδάφους. Επιπλέον, παρουσιάζεται η διερεύνηση διάφορων παραμέτρων της προσομοίωσης που είχε ως σκοπό την ακριβέστερη και ταχύτερη εκτέλεση των υπολογισμών.

Στο **κεφάλαιο 4** διερευνάται η σεισμική απόκριση βελτιωμένων εδαφών μέσω παραμετρικών αναλύσεων, σε σύγκριση με την απόκριση του φυσικού εδάφους. Στα πλαίσια αυτά διερευνάται η επίδραση σημαντικών παραμέτρων του φυσικού προβλήματος στις μέγιστες σεισμικές επιταχύνσεις στην επιφάνεια του βελτιωμένου εδάφους, ώστε να διακριβωθεί και η σχετική σημαντικότητα αυτών.

Στο **κεφάλαιο 5** διακριβώνεται η δυνατότητα εκτέλεσης 1Δ αναλύσεων για ένα ισοδύναμα-ομοιόμορφα βελτιωμένο έδαφος, προς αντικατάσταση των πιο πολύπλοκων 2Δ αναλύσεων σεισμικής απόκρισης βελτιωμένων εδαφών. Στα πλαίσια αυτά ποσοτικοποιούνται τα δυναμικά χαρακτηριστικά του ισοδύναμα-ομοιόμορφου βελτιωμένου εδάφους.

Στο **κεφάλαιο 6** συνοψίζονται τα τελικά συμπεράσματα της παρούσας εργασίας, οι περιορισμοί αυτής και προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

Κεφάλαιο 2

ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΣΤΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

2.1 Γενικά

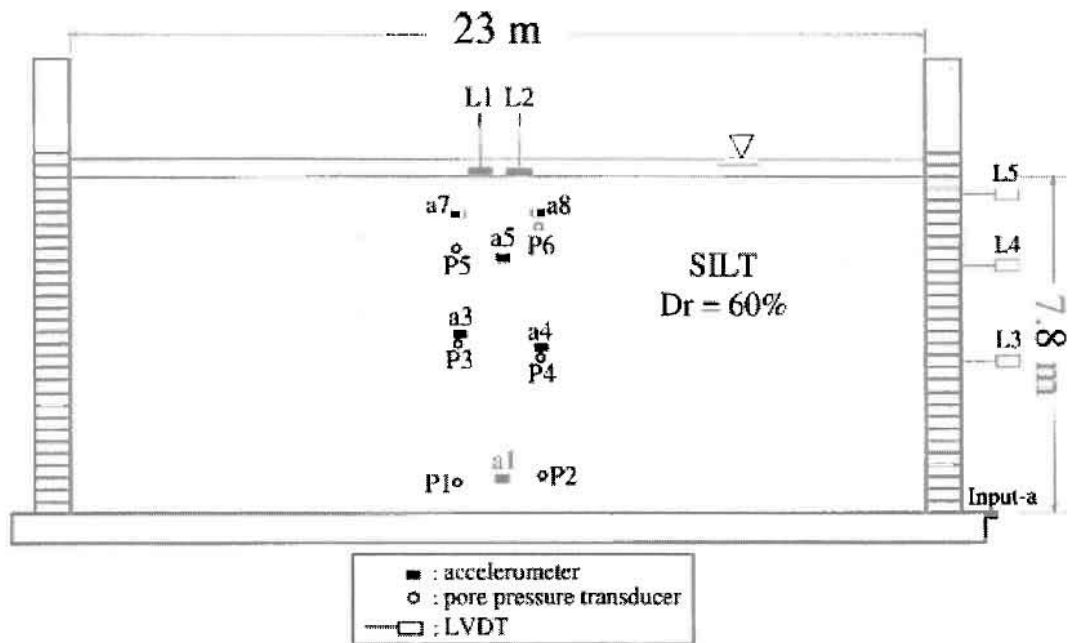
Στη διεθνή βιβλιογραφία δεν είναι πολλές οι αναφορές στην σεισμική απόκριση εδαφών βελτιωμένων με χαλικοπάσσαλους. Ακόμα πιο λίγες είναι οι εργασίες που έχουν δημοσιευτεί σχετικά με τρισδιάστατη ανάλυση της σεισμικής απόκρισης διάταξης χαλικοπασσάλων. Οι περισσότερες μελέτες αφορούν στη σχετική συμπεριφορά των απλών πασσάλων που είναι εν μέρει μόνο εφαρμόσιμες στους χαλικοπάσσαλους. Ένας λόγος απουσίας τέτοιων μελετών από τη βιβλιογραφία είναι η μεγάλη υπολογιστική ισχύς που απαιτείται για τη δυναμική ανάλυση εδαφικών σχηματισμών σε τρεις διαστάσεις. Δισδιάστατες αναλύσεις έχουν δημοσιευθεί και γενικά όλες, όπως και διάφορα ιστορικά περιστατικά, υποδεικνύουν μία καλύτερη συμπεριφορά των βελτιωμένων εδαφών σε σχέση με το φυσικό έδαφος. Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται κάποιες μελέτες σχετικές με το θέμα της σεισμικής απόκρισης βελτιωμένων εδαφών από τη βιβλιογραφία καθώς και μία αναφορά σε απλουστευτικές μεθοδολογίες αντικατάστασης 3Δ αναλύσεων από 2Δ αναλύσεις και αντίστοιχα μεθοδολογίες αντικατάστασης 2Δ αναλύσεων με 1Δ αναλύσεις.

2.2 Σεισμική απόκριση βελτιωμένων εδαφών

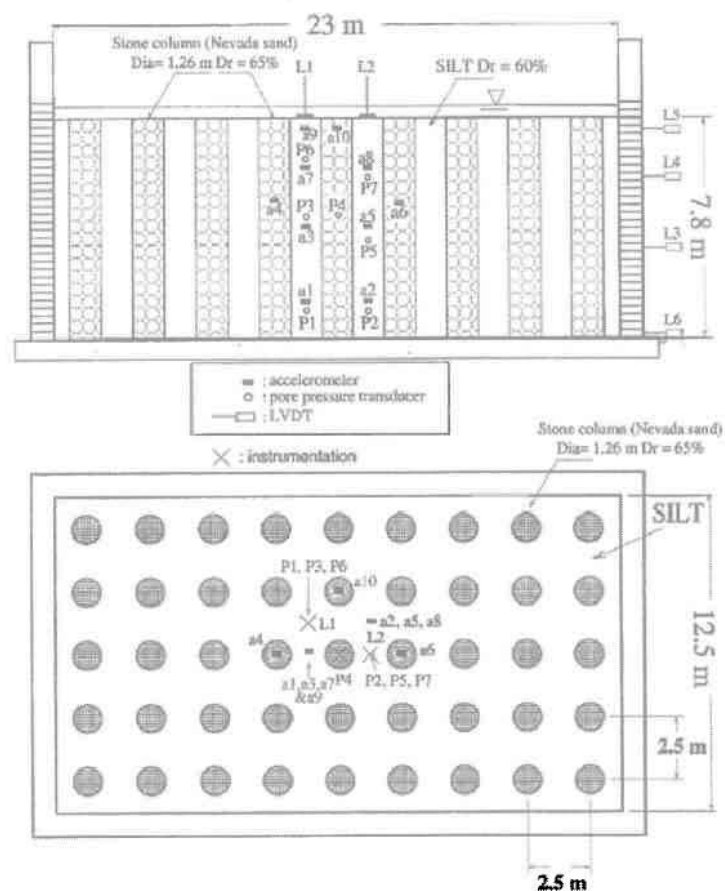
Οι Adalier et al (2003) διερεύνησαν πειραματικά την επίδραση των χαλικοπασσάλων στη σεισμική συμπεριφορά ιλυωδών εδαφών με μία σειρά δοκιμών φυγοκεντριστή σε ένα βελτιωμένο έδαφος. Επειδή μάλιστα τα εδάφη αυτά είναι πρακτικά αδιαπέρατα, εξετάζεται η αντίσταση σε ρευστοποίηση που προσφέρουν οι χαλικοπάσσαλοι λόγω της αύξησης της δυσκαμψίας και όχι λόγω της αύξησης της διαπερατότητας.

Για την έρευνα αυτή κατασκευάστηκαν 4 πειραματικές διατάξεις. Στο πρώτο πείραμα κατασκευάστηκε δοκίμιο από ιλυώδες υλικό ως δοκιμή ελευθέρου πεδίου φυσικού εδάφους (Σχήμα 2.1) ενώ στο δεύτερο τοποθετήθηκε διάταξη χαλικοπασσάλων σε ορθογωνικό κάναβο (Σχήμα 2.2), ως δοκιμή ελευθέρου πεδίου βελτιωμένου εδάφους. Άλλα δύο μοντέλα κατασκευάστηκαν με ένα επιφανειακό θεμέλιο να τα επιβαρύνει, το πρώτο επί φυσικού και το δεύτερο επί βελτιωμένου εδάφους (Σχήματα 2.3, 2.4).

Στη συνέχεια επιβλήθηκε σεισμική διέγερση σε μία διεύθυνση και μετρήθηκαν οι πιέσεις πόρων και οι αποκρίσεις στα σημεία που δείχνονται στα σχήματα. Οι μετρητές μετά τη λήξη του πειράματος βρέθηκε να βρίσκονται όλοι πολύ κοντά στην αρχική τους θέση, δεν είχαμε δηλαδή σημαντικές απομένουσες παραμορφώσεις. Ως αναμενόταν, παρατηρήθηκε γενικώς σημαντική απομείωση των επιταχύνσεων λόγω ρευστοποίησης. Ειδικότερα, στο 2^ο μοντέλο παρατηρήσαμε ότι ρευστοποίηση συνέβη σχεδόν ταυτόχρονα στις θέσεις a9 (ιλύς) και a10 (χαλικοπάσσαλος). Όμως οι καταγραφές δείχνουν μία πιο απότομη απόκριση και γενικά πιο άκαμπτη στην θέση a10. Στις δοκιμές ελευθέρου πεδίου, οι καθιζήσεις έδειξαν κάποια μικρή μείωση. Οι πάσσαλοι επηρέασαν σημαντικά την δυναμική συμπεριφορά του δοκιμίου κάνοντας το πιο άκαμπτο. Βεβαίως, ρευστοποίηση συνέβη και στο βελτιωμένο δοκίμιο πράγμα που για το δεδομένο συντελεστή αντικατάστασης 20% δεν αναμενόταν (Baez, 1995).

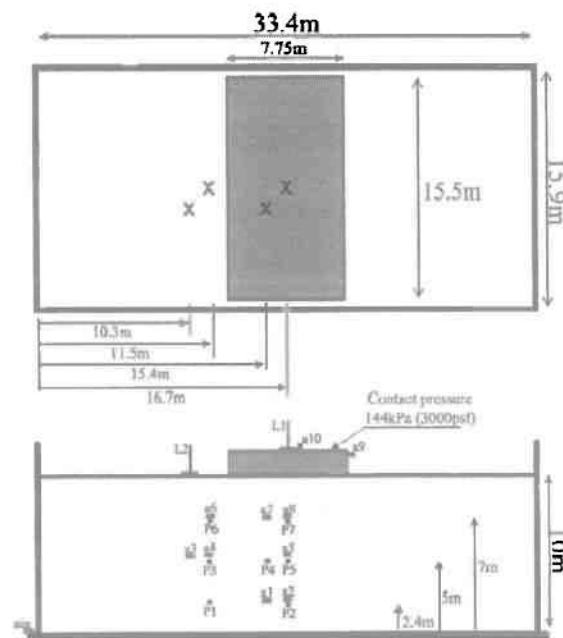


Σχήμα 2.1: 1^ο μοντέλο-τομή: Συνθήκες ελεύθερου πεδίου φυσικού ρευστοποιήσιμου εδάφους (Adalier et al, 2003).

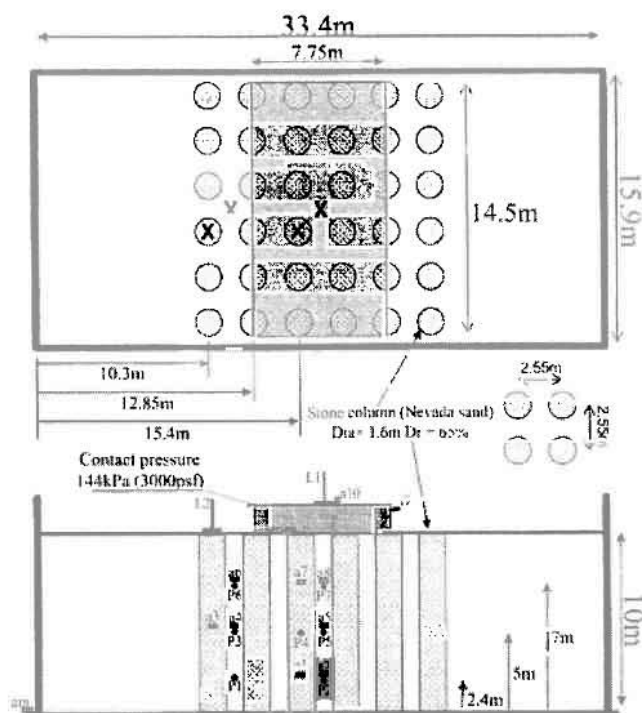


Σχήμα 2.2: 2^ο μοντέλο-τομή και κάτοψη: Συνθήκες ελεύθερου πεδίου βελτιωμένου εδάφους (Adalier et al, 2003).

Απάντηση στην παραπάνω μη αναμενόμενη συμπεριφορά είναι ότι για να λειτουργήσουν οι χαλικοπάσσαλοι χρειάζεται και μία επιπλέον κατακόρυφη τάση της τάξης των 45KPa που μπορεί να την προσφέρει η θεμελίωση μίας κατασκευής. Με την προσθήκη του επιφανειακού θεμελίου και διεξαγωγή των δύο επόμενων πειραμάτων παρατηρούμε τη μείωση των καθιζήσεων (50%). Οι επιταχύνσεις ήταν λίγο μεγαλύτερες στο βελτιωμένο έδαφος που δείχνει ότι οι άκαμπτοι πάσσαλοι μετέφεραν ουσιαστικά τη διέγερση προς το θεμέλιο.



Σχήμα 2.3: 3^ο μοντέλο-κάτοψη, τομή: Οριακή αντοχή πεδילוδοκού επί φυσικού ρευστοποιήσιμου εδάφους (Adalier et al, 2003).



Σχήμα 2.4: 4^ο μοντέλο-κάτοψη, τομή: Οριακή αντοχή πεδιλοδοκού επί βελτιωμένου ρευστοποιήσιμου εδάφους (Adalier et al, 2003).

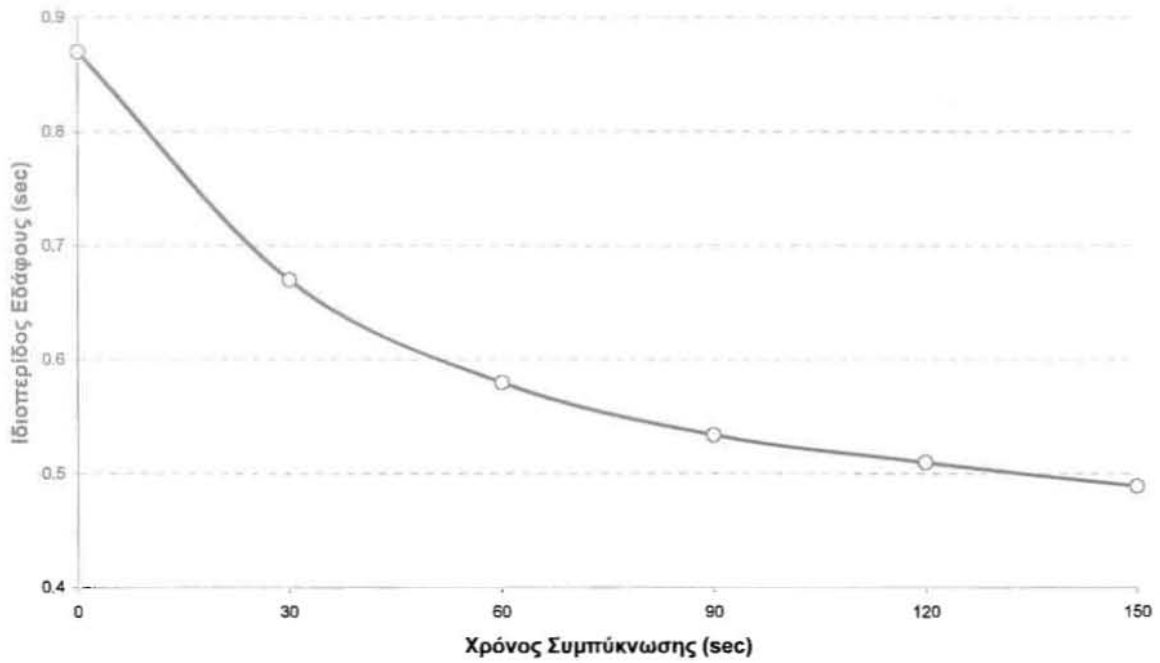
Τα τελικά συμπεράσματα που προέκυψαν από τα πειράματα αυτά είναι:

- Στα μοντέλα 3, 4 φάνηκε ότι στις θέσεις P2, P5, P7 το έδαφος διαστελλόταν και προς τις δύο διευθύνσεις ενώ στις υπόλοιπες το έδαφος διαστελλόταν προς το ελεύθερο πεδίο.
- Τα τεστ έδειξαν ότι όταν έχουμε να κάνουμε με υλικά μικρής διαπερατότητας και που δεν μπορούν να συμπυκνωθούν και να στραγγιστούν κατά τη διάρκεια του σεισμού οι χαλικοπάσσαλοι είναι ικανό μέσο για τη μείωση του κινδύνου ρευστοποίησης.

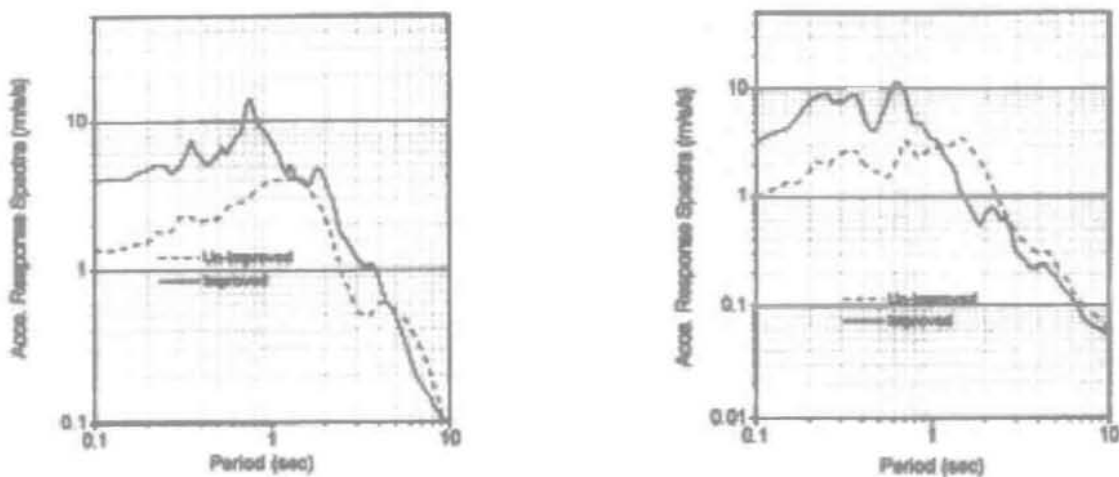
Οι Fuchila et al (1998) υπολογίζουν αριθμητικά το φάσμα απόκρισης για ένα βελτιωμένο έδαφος με συγκεκριμένο συντελεστή αντικατάστασης a_r για μία συγκεκριμένη περίπτωση χαλικοπασσάλου συμπύκνωσης (sand compaction pile - SCP). Οι υπολογισμοί έχουν γίνει για διαφορετικό επίπεδο συμπύκνωσης (παίρνοντας τιμές του $G_{i,0}$ για διαφορετικό χρόνο συμπύκνωσης) και γι' αυτό το λόγο προκύπτουν φάσματα απόκρισης για διαφορετικές δυσκαμψίες χαλικοπασσάλου. Έτσι, γίνεται δυνατός ο υπολογισμός του χρόνου συμπύκνωσης (άμεσα συσχετίσιμου με το G_p) και της ιδιοπεριόδου του βελτιωμένου εδάφους για διαφορετικά μέτρα G_p του πασσάλου (μεταβαλλόμενα σε βάθος).

Στο σχήμα αυτό είναι εμφανές ότι η ιδιοπερίοδος όχι μόνο μειώνεται με την αύξηση του G των χαλικοπασσάλων, αλλά η μείωση αυτή είναι τετραγωνική, κάτι που ενισχύει τη θεώρηση του $V_s=4H/(G/\rho)^{0.5}$ με σύνθετο μέτρο δυσκαμψίας. Η ακριβής καμπύλη φαίνεται στο Σχήμα 2.5. Το άρθρο αυτό, αν και δεν παρέχει θεωρητικούς υπολογισμούς για τις πιο πάνω ιδιοπεριόδους, καταλήγει στο ότι η βελτίωση του εδάφους οδηγεί στη μείωση της ιδιοπεριόδου, αλλά κυρίως στο ότι η βελτίωση αυτή μπορεί αν αυξήσει σημαντικά την επιτάχυνση στην επιφάνεια του εδάφους, αν υπάρξουν φαινόμενα συντονισμού στη νέα αυτή ιδιοπερίοδο. Τα αποτελέσματα των ερευνών για τους σεισμούς του Kobe και του Chiba φαίνονται στο Σχήμα 2.6. Σε αυτά τα σχήματα φαίνεται καθαρά ότι το μη-βελτιωμένο έδαφος έχει διαφορετική ιδιοπερίοδο απ' ότι το βελτιωμένο, ενώ ταυτόχρονα η μέγιστη φασματική επιτάχυνση του βελτιωμένου εδάφους και για τους δύο σεισμούς είναι της τάξεως του 1.2g σε αντίθεση με το μη-βελτιωμένο έδαφος που έχει 0.4g (τα σχήματα έχουν λογαριθμικές κλίμακες). Ακόμα όμως και η μέγιστη επιτάχυνση στην επιφάνεια του εδάφους παρουσιάζει μεγάλες διαφορές, αφού οι αντίστοιχες τιμές είναι 0.3-0.4g και 0.1g. Με αυτό τον τρόπο φαίνεται καθαρά ότι υπάρχει περίπτωση η βελτίωση του εδάφους να οδηγήσει σε μεγαλύτερες φασματικές, αλλά και εδαφικές επιταχύνσεις.

Αξίζει να παρατηρηθεί ότι η συγκεκριμένη έρευνα, αν και εξέτασε μόνο μία περίπτωση εδαφικής αντικατάστασης, είναι πολύ χρήσιμη, αφού εξέτασε πασσάλους με διαφορετικό $G_{i,0}$, ενώ οι επιβαλλόμενοι σεισμοί ήταν οι σεισμοί στο Kobe και στο Chiba με πολύ διαφορετικά χαρακτηριστικά (π.χ. δεσπόζουσες 1.862 και 0,363 sec αντίστοιχα, όπως αναφέρεται στο άρθρο).



Σχήμα 2.5 : Επίδραση χρόνου συμπύκνωσης των χαλικοπασσάλων στην ιδιοπερίοδο του εδάφους με βάση τους (Fuchila et al, 1998).



Σχήμα 2.6 : Φάσμα απόκρισης επιταχύνσεων για τους σεισμούς του Kobe (αριστερά) και του Chiba (δεξιά). (Fuchila et al, 1998).

Διακεκομμένη γραμμή: Έδαφος χωρίς πασσάλους

Συνεχής γραμμή : Βελτιωμένο έδαφος

2.3 Προσομοίωση 3Δ σεισμικής απόκρισης ομοιόμορφα βελτιωμένου εδάφους με 2Δ αναλύσεις

Η χρήση 3Δ αριθμητικών αναλύσεων στη Γεωτεχνική Σεισμική Μηχανική είναι πολύ σπάνια, ειδικά στην Ελλάδα. Για το σχεδιασμό έργων Πολιτικού Μηχανικού, 3Δ αναλύσεις θεωρούνται πολυτέλεια, καθώς είναι πολύ απαιτητικές σε υπολογιστικό χρόνο. Επιπλέον, οι 3Δ εμπορικοί κώδικες που είναι κατάλληλοι για αριθμητικές αναλύσεις προβλημάτων Γεωτεχνικής Σεισμικής Μηχανικής είναι σχετικά λίγοι και συνήθως έχουν σαφώς μικρότερες δυνατότητες από τους αντίστοιχους κώδικες 2Δ αναλύσεων. Για παράδειγμα, οι 2Δ κώδικες προσφέρουν για χρήση σύγχρονα καταστατικά προσομοιώματα που δεν υπάρχουν στους 3Δ κώδικες. Έτσι, τόσο ο σχεδιασμός έργων, όσο και η σχετική έρευνα με αριθμητικές μεθόδους γίνεται παραδοσιακά με τη χρήση (1Δ και) 2Δ αναλύσεων.

Στο παρόν κεφάλαιο διερευνάται ο ορθός τρόπος χρήσης 2Δ αριθμητικών αναλύσεων για την επακριβή προσομοίωση του 3Δ προβλήματος της σεισμικής απόκρισης βελτιωμένων εδαφών. Ένα σημαντικό στοιχείο που προκύπτει από τη διεθνή βιβλιογραφία είναι ότι είναι δυνατή η μετατροπή της τρισδιάστατης γεωμετρίας ενός καννάβου χαλικοπασσάλων σε ένα δισδιάστατο μοντέλο, με βάση τη θεώρηση της ισοδυναμίας όγκων-εμβαδών.

Η ισοδυναμία αυτή όπως προτάθηκε από άρθρο του Πανεπιστημίου της Seoul (2002), παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.7 και αναλυτικά συνεπάγεται:

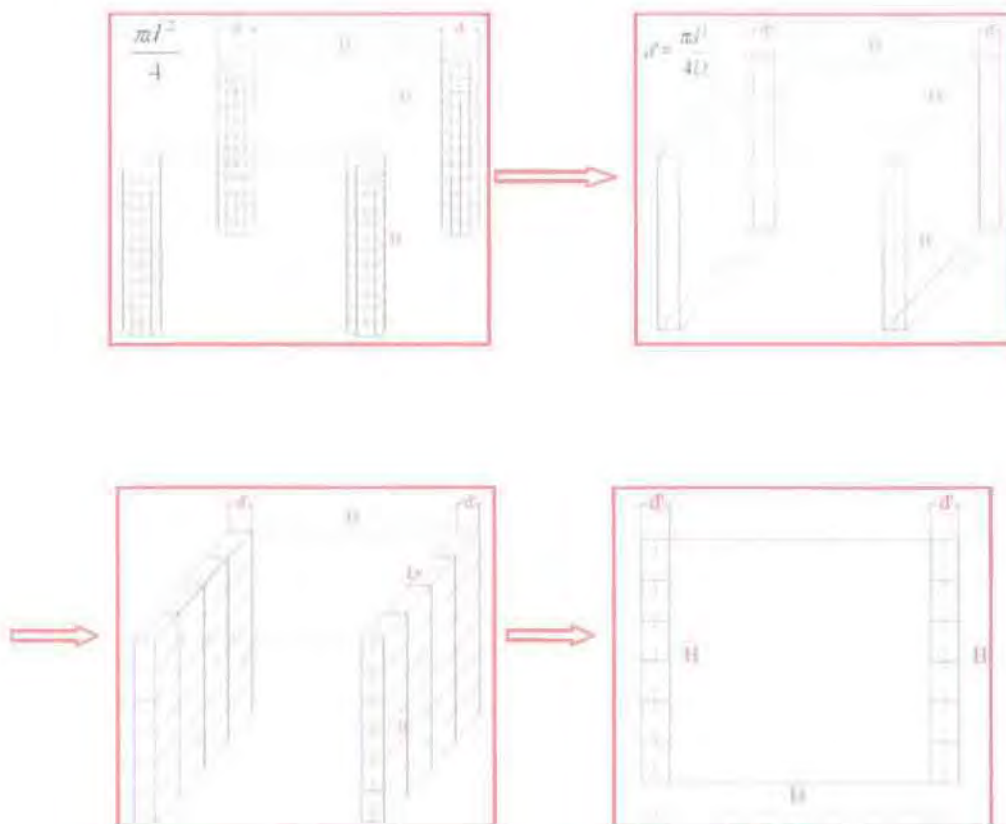
- για ένα τετραγωνικό κάνναβο

$$\frac{\pi \cdot d^2}{4} = \frac{d'}{D} \Rightarrow d' = \frac{\pi \cdot d^2}{4 \cdot D} \quad (2.1)$$

- και για ένα τριγωνικό κάνναβο

$$d' = \frac{1.143 \cdot \pi \cdot d^2}{2 \cdot D} \quad (2.2)$$

Αξίζει βεβαίως να σημειώσουμε ότι οι παραπάνω σχέσεις ισχύουν μέχρι το d'/L του τρισδιάστατου κάρναβου να γίνει ίσο με 78.5% για τον τετραγωνικό κάρναβο και μέχρι το d'/L του δισδιάστατου κάρναβου να γίνει ίσο με 74.6%, δύο ποσοστά υπερβολικά μεγάλα για πρακτικές εφαρμογές.



Σχήμα 2.7: Αναλογία τρισδιάστατου φυσικού προβλήματος με προσομοίωμα επίπεδων τάσεων-παραμορφώσεων. Φαίνεται η πορεία από την 3D γεωμετρία σε ισοδύναμο 3D από άποψη τάσεων, το οποίο μπορεί να γίνει εύκολα ένα 2D προσομοίωμα.

Ορμώμενοι από την εν λόγω θεώρηση οι Bouckovalas et al (2006), συνέκριναν συστηματικά 3Δ και 2Δ αναλύσεις σεισμικής απόκρισης βελτιωμένων εδαφών και πρότειναν μια μεθοδολογία για την αντικατάσταση των 3Δ αναλύσεων με «ισοδύναμες» 2Δ αναλύσεις που αναπαράγουν με επιτυχία τα αποτελέσματα των πρώτων. Αυτό επιτυγχάνεται με το μετασχηματισμό της 3Δ πραγματικής γεωμετρίας βελτίωσης σε μια «ισοδύναμη» 2Δ (απειρομήκη) γεωμετρία (επίπεδης γεωμετρίας), η οποία αν υποβληθεί στην ίδια σεισμική διέγερση οδηγεί στην ίδια απόκριση της επιφάνειας του εδάφους.

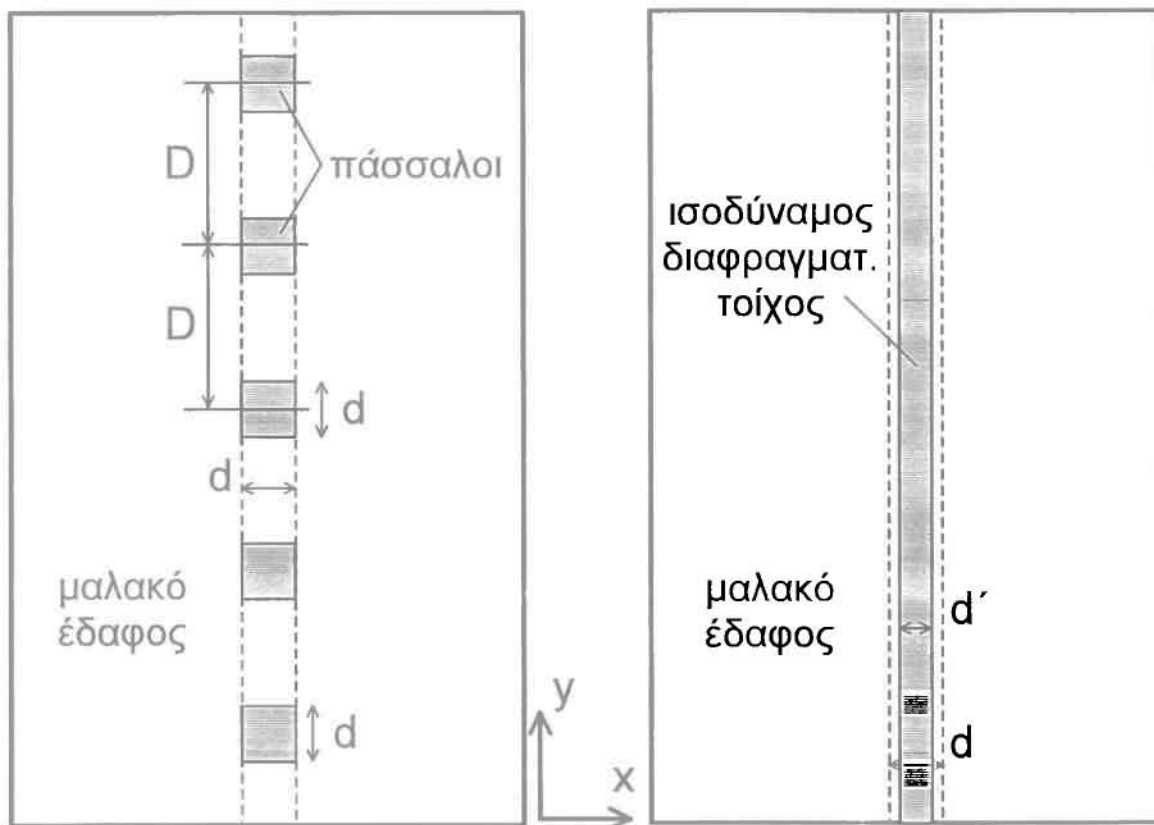
Οι 3Δ και 2Δ αναλύσεις εκτελέστηκαν αντίστοιχα με τα λογισμικά H/Y FLAC3D (Itasca Inc 1997) και FLAC (Itasca Inc 1993), δύο (2) εμπορικούς κώδικες που χρησιμοποιούν τη μέθοδο πεπερασμένων διαφορών για την εκτέλεση ολοκλήρωσης εν χρόνω. Πριν από τη χρήση τους για την ανάλυση βελτιωμένων εδαφών επαληθεύθηκε ότι δίνουν ταυτόσημα αποτελέσματα για την περίπτωση αναφοράς της 1Δ κατακόρυφης διάδοσης κυμάτων μέσω ομοιόμορφης οριζόντιας εδαφικής στρώσης επί άκαμπτου υπόβαθρου, η οποία υπολογίστηκε με αμιγώς 1Δ ανάλυση με χρήση του Shake91 (Idriss and Sun 1992). Σε όλες τις αναλύσεις, η διέγερση ήταν χρονοϊστορία επιτάχυνσης που επιβλήθηκε στη βάση του καννάβου και στη διεύθυνση x. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων για την απόκριση της επιφάνειας του εδάφους (σε όρους χρονοϊστοριών αλλά και ελαστικών φασμάτων απόκρισης) υπέδειξε απόλυτη συμφωνία μεταξύ των τριών αναλύσεων.

Περαιτέρω, πριν από την χρήση του FLAC3D για αναλύσεις 3Δ γεωμετριών βελτίωσης, θεωρήθηκε αναγκαία η διακρίβωση της αξιοπιστίας του λογισμικού για μια περίπτωση αναφοράς που αντιστοιχεί σε 2Δ γεωμετρία βελτίωσης και για το σκοπό αυτό, επελέγη η γεωμετρία ενός κατακόρυφου διαφραγματικού τοίχου.

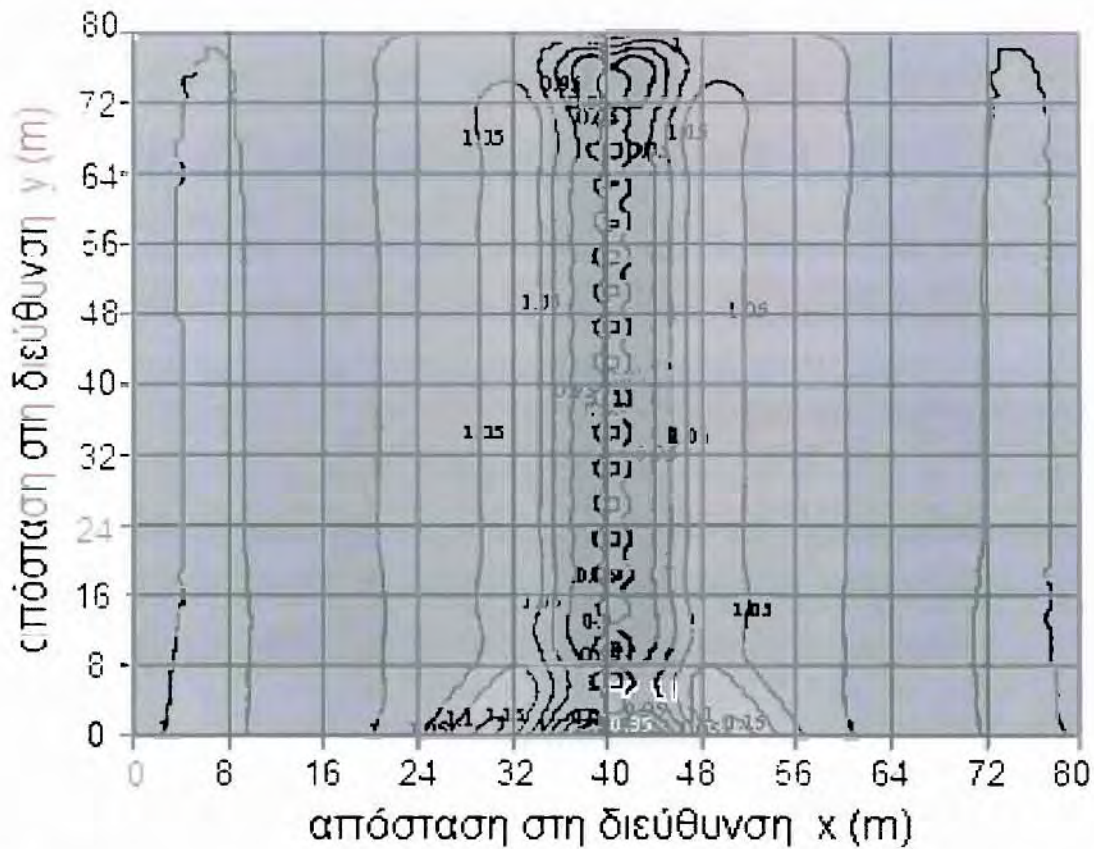
Σε όλες τις 3Δ και 2Δ αναλύσεις, η σεισμική διέγερση ήταν ένας παλμός Chang με δεσπόζουσα περίοδο $T_e=0.1\text{sec}$, η οποία επιβλήθηκε ως χρονοϊστορία επιτάχυνσης στους κόμβους της βάσης των καννάβων και στη διεύθυνση x. Ως κριτήριο σύγκρισης μεταξύ 3Δ και 2Δ αναλύσεων θεωρήθηκε η ενίσχυση της μέγιστης επιτάχυνσης a_{\max} στη διεύθυνση x της επιφάνειας του εδάφους, λόγω της ύπαρξης του διαφραγματικού τοίχου, δηλαδή η ενίσχυση της a_{\max} σε σχέση με την απόκριση του φυσικού εδάφους (ελεύθερο πεδίο). Όπως προκύπτει, για 2Δ γεωμετρίες βελτίωσης, αρκεί μια 3Δ ανάλυση με κάρναβο πάχους ενός στοιχείου στη διεύθυνση y και σύνορα ελευθέρου πεδίου, σύνορα που καθιστούν το λογισμικό FLAC ιδιαίτερα ακριβές.

Δεδομένης της αξιοπιστίας χρήσης των εν λόγω λογισμικών, στη συνέχεια οι Bouckovalas et al (2006) προχώρησαν στη μελέτη μιας σειράς πασσάλων, ως το πρώτο βήμα για την προσομοίωση ενός καννάβου πασσάλων. Έτσι στο Σχήμα 2.8α παρουσιάζεται η κάτοψη μιας σειράς πασσάλων στη διεύθυνση y, που έχουν «διάμετρο» d και βρίσκονται σε απόσταση D (από κέντρο σε κέντρο). Επισημαίνεται ότι, χάριν απλούστευσης, οι πάσσαλοι σε όλες τις 3Δ αναλύσεις έχουν προσομοιωθεί με κυβικά στοιχεία, που αντιστοιχούν στην κάτοψη του Σχ. 2.8.

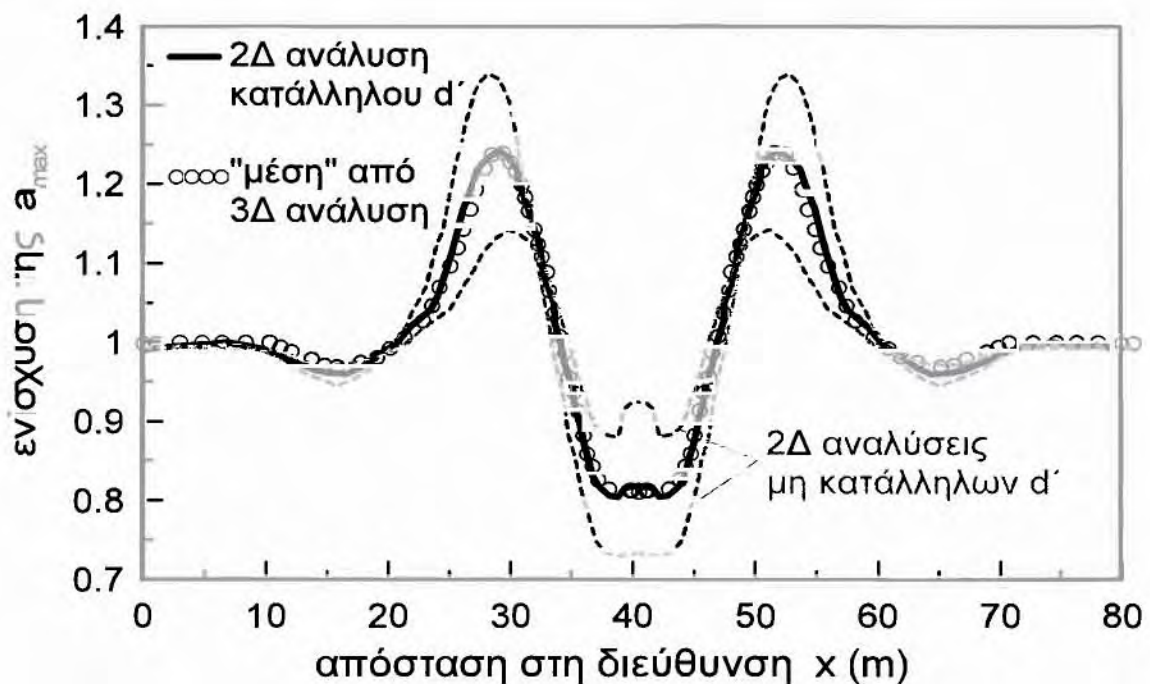
Η επίδραση αυτής της απλούστευσης στην ακρίβεια των 3Δ αναλύσεων θεωρήθηκε πρακτικώς αμελητέα. Προφανώς, όταν $D=d$ η σειρά πασσάλων μετατρέπεται σε διαφραγματικό τοίχο, δηλαδή αποκτά αμιγώς 2Δ γεωμετρία, αλλά γενικότερα η σεισμική απόκριση μιας σειράς πασσάλων βελτίωσης αποτελεί ένα 3Δ πρόβλημα. Αυτό φαίνεται καλύτερα στο Σχήμα 2.9, στο οποίο παρουσιάζονται οι ισοκαμπύλες ενίσχυσης της a_{max} από μια 3Δ ανάλυση σεισμικής απόκρισης μιας σειράς πασσάλων με $d=1m$, $D=4m$ και $K=30$ μέσα σε 10m μαλακού εδάφους. Η ανάλυση εκτελέστηκε με κάρναβο 80x10x80 κυβικών στοιχείων (πάχους 1m) και οι λεπτομέρειες των ισοκαμπυλών του Σχήματος 2.9 δεν έχουν σημασία. Το ουσιώδες είναι ότι οι ισοκαμπύλες υποδεικνύουν ότι η ενίσχυση της a_{max} κατά μήκος του άξονα της σειράς πασσάλων δεν είναι ομοιόμορφη, γεγονός που υπογραμμίζει τον 3Δ χαρακτήρα του προβλήματος. Όμως, σε μικρές αποστάσεις από τον άξονα της σειράς πασσάλων (π.χ. 4 – 5m), παρατηρείται συμμετρία στην απόκριση του εδάφους, δηλαδή η απόκριση δεν αλλάζει για διαφορετικές τιμές της απόστασης y . Αυτή ακριβώς η συμμετρία επιτρέπει τη διενέργεια 2Δ αναλύσεων για έναν «ισοδύναμο» διαφραγματικό τοίχο πάχους d' , όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.8β.



Σχήμα 2.8: Κατόψεις της πραγματικής 3Δ και της ισοδύναμης 2Δ γεωμετρίας μιας σειράς πασσάλων.



Σχήμα 2.9: Ισοκαμπύλες ενίσχυσης της a_{\max} από 3Δ ανάλυση (καννάβου 80x10x80) μιας σειράς πασσάλων ($d=1\text{m}$, $D=4\text{m}$) (Bouckovalas et al, 2006).



Σχήμα 2.10: Μεταβολή ενίσχυσης της a_{\max} από μια 3Δ και παραμετρικές 2Δ αναλύσεις για μια σειρά πασσάλων ($d=1\text{m}$, $D=4\text{m}$). (Bouckovalas et al, 2006).

Η δυνατότητα διενέργειας «ισοδύναμων» 2Δ αναλύσεων διερευνάται στο Σχήμα 2.10. Συγκεκριμένα, στο Σχήμα αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από 2Δ αναλύσεις για διαφραγματικούς τοίχους με διάφορες τιμές d' σε σύγκριση με τη «μέση» 3Δ απόκριση της ανάλυσης που παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.9. Η σύγκριση γίνεται ως προς τη μεταβολή της ενίσχυσης της a_{\max} κατά μήκος μιας τυπικής τομής στη διεύθυνση x (κάθετα στον άξονα της σειράς πασσάλων). Ο όρος «μέση» 3Δ απόκριση στο Σχήμα 2.10 αντικατοπτρίζει το γεγονός ότι η απόκριση μεταξύ διαδοχικών πασσάλων δεν είναι ταυτόσημη (βλέπε ισοκαμπύλες της 3Δ ανάλυσης στο Σχήμα 2.9). Συνεπώς, μόνο η «μέση» 3Δ απόκριση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για συγκρίσεις με αποτελέσματα 2Δ αναλύσεων. Με βάση το Σχήμα 2.10, προκύπτει ότι «ισοδύναμες» 2Δ αναλύσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν με επιτυχία, αρκεί να επιλεγεί κατάλληλη τιμή του πάχους d' .

Η ερώτηση που προκύπτει είναι αν μπορεί κανείς να γνωρίζει εκ των προτέρων την ακριβή τιμή του d' για οποιαδήποτε ζεύγος τιμών d και D . Η απάντηση στο παρόν κεφάλαιο δίνεται κάνοντας χρήση διαγραμμάτων της μορφής του Σχήματος 2.10, δηλαδή συγκρίνοντας τα αποτελέσματα οποιασδήποτε 3Δ ανάλυσης (με δεδομένες τιμές d και D) με αντίστοιχα αποτελέσματα 2Δ αναλύσεων για διάφορες τιμές του d' . Έτσι, κάθε ζεύγος τιμών d και D συσχετίζεται αμφιμονοσήμαντα με μια τιμή του d' . Στη συνέχεια, οι Bouckovalas et al (2006) επαναλαμβάνοντας αντίστοιχα αριθμητικά πειράματα, δημιούργησαν μια βάση δεδομένων με τριάδες (d , D , d'). Η εν λόγω βάση δεδομένων δεν επαρκεί για τη διατύπωση μιας γενικής μεθοδολογίας εκτίμησης του d' , χωρίς την ανάγκη εκτέλεσης 3Δ ανάλυσης. Μια τέτοια μεθοδολογία θα πρέπει να στηριχθεί στην αντιστοίχιση των τάσεων και των παραμορφώσεων που επιβάλλει η σεισμική κίνηση σε ένα βελτιωμένο έδαφος, στην πραγματική 3Δ γεωμετρία του αλλά και στην «ισοδύναμη» 2Δ μορφή αυτής. Στην προσπάθεια αυτή, έγινε χρήση της θεωρίας ελαστικής δοκού. Συγκεκριμένα διερευνήθηκε η σχέση τριών διαφορετικών αναλυτικών προσεγγίσεων με τη βάση δεδομένων τιμών (d , D , d'). Επισημαίνεται ότι σε συμβατότητα με τις αριθμητικές αναλύσεις, η διατομή των πασσάλων στις αναλυτικές προσεγγίσεις θεωρείται τετραγωνική.

Ισοδυναμία Εμβαδών (A)

Η προσέγγιση αυτή υποθέτει ότι υπάρχει ισοδυναμία εμβαδών A των διατομών του βελτιωμένου εδάφους στην 3Δ και την «ισοδύναμη» 2Δ γεωμετρία, δηλ. $A_{3\Delta} = A_{2\Delta}$. Με βάση το Σχήμα 2.8, το εμβαδό των διατομών του βελτιωμένου εδάφους σε πλάτος D κατά μήκος του y δίνονται από:

$$A_{3\Delta} = d^2 \quad ; \quad A_{2\Delta} = d'D \quad (2.3)$$

Με βάση τη σχέση (2.3), το d' δίνεται από:

$$d' = d^2 / D \quad (2.4)$$

Η ισοδυναμία A χρησιμοποιείται ιστορικά για τον υπολογισμό του χρόνου στερεοποίησης (π.χ Barron 1948), και των καθιζήσεων (π.χ Priebe 1976) ενός βελτιωμένου εδάφους. Η σχέση (2.4) υπονοεί ισοδυναμία της αξονικής (κατακόρυφης) δυστημψίας μεταξύ της 3Δ και της «ισοδύναμης» 2Δ γεωμετρίας, τουλάχιστον για τον υπολογισμό καθιζήσεων.

Ισοδυναμία Ροπών Αδρανείας (I)

Η προσέγγιση αυτή υποθέτει ότι υπάρχει ισοδυναμία ροπών αδρανείας I των διατομών του βελτιωμένου εδάφους στην 3Δ και την «ισοδύναμη» 2Δ γεωμετρία, δηλ. $I_{3\Delta} = I_{2\Delta}$. Με βάση το Σχήμα 2.8, οι ροπές αδρανείας των διατομών του βελτιωμένου εδάφους σε πλάτος D κατά μήκος του y δίνονται από:

$$I_{3\Delta} = d^4/12 \quad ; \quad I_{2\Delta} = d'^3D/12 \quad (2.5)$$

Με βάση τη σχέση (2.5), το d' δίνεται από:

$$d' = (d^4 / D)^{1/3} \quad (2.6)$$

Η ισοδυναμία I χρησιμοποιείται στην πράξη για την εκτέλεση 2Δ στατικών αναλύσεων επίπεδης παραμόρφωσης τοίχων αντιστήριξης εκσκαφών που αποτελούνται από σειρά πασσάλων και υπονοεί ισοδυναμία της καμπτικής δυστημσίας μεταξύ της 3Δ και της «ισοδύναμης» 2Δ γεωμετρίας.

Ισοδυναμία Ροπών Αντίστασης (W)

Η προσέγγιση αυτή υποθέτει ότι υπάρχει ισοδυναμία ροπών αντίστασης W των διατομών του βελτιωμένου εδάφους στην 3Δ και την «ισοδύναμη» 2Δ γεωμετρία, δηλ. $W_{3Δ} = W_{2Δ}$. Με βάση το Σχήμα 2.8, οι ροπές αντίστασης των διατομών του βελτιωμένου εδάφους σε πλάτος D κατά μήκος του y δίνονται από:

$$W_{3Δ} = d^3/6 \quad ; \quad W_{2Δ} = d'^2 D/6 \quad (2.7)$$

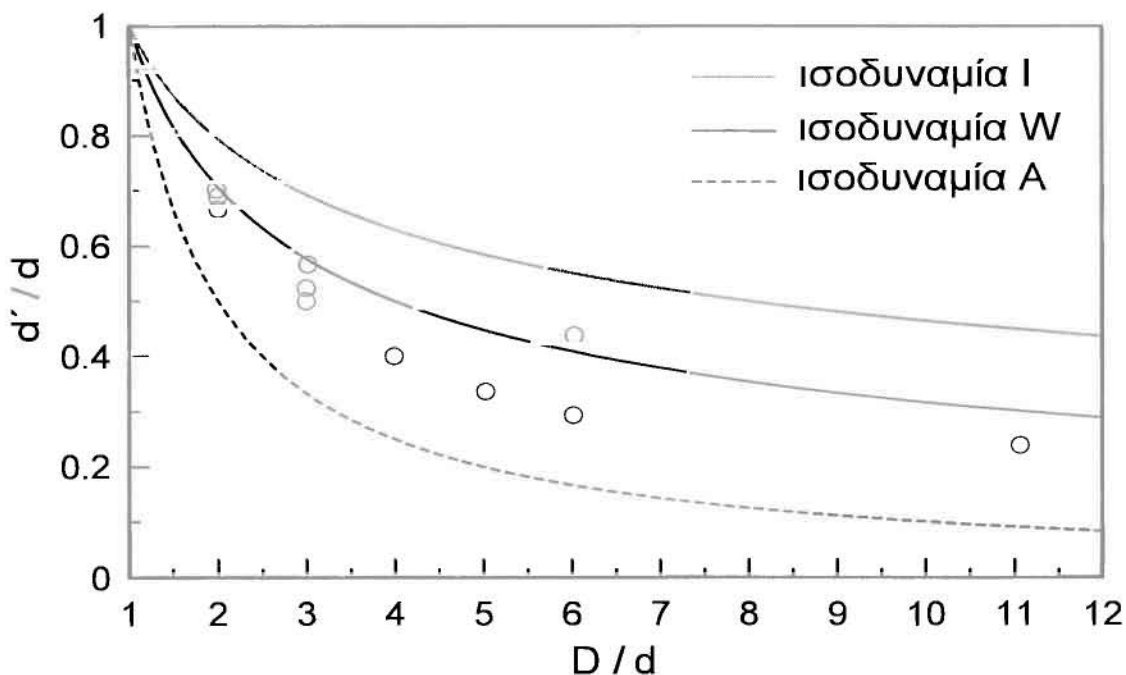
Με βάση τη σχέση (2.7), το d' δίνεται από:

$$d' = (d^3 / D)^{1/2} \quad (2.8)$$

Όπως προκύπτει από τις σχέσεις (2.4), (2.6) και (2.8), η ισοδυναμία W δίνει τιμές d' οι οποίες βρίσκονται μεταξύ των τιμών που προκύπτουν από τις ισοδυναμίες I και A . Συνεπώς, η ισοδυναμία W θεωρείται εμπειρικά ως μια ισοδυναμία της «συνολικής» δυστημσίας μεταξύ της 3Δ και της «ισοδύναμης» 2Δ γεωμετρίας και δεν αντιστοιχεί σε ισοδυναμία ούτε της αξονικής ούτε της καμπτικής δυστημσίας.

Έμμεση Εκτίμηση του d'

Στο Σχήμα 2.11 συγκρίνονται τα αποτελέσματα των αριθμητικών πειραμάτων (σύμβολα) με τις αντίστοιχες προβλέψεις από τις τρεις (3) αναλυτικές προσεγγίσεις (γραμμές). Όπως προκύπτει, η ισοδυναμία W προσδίδει τη βέλτιστη προσαρμογή στις αριθμητικές προβλέψεις του d' , ενώ οι ισοδυναμίες I και A αποτελούν το πάνω και το κάτω όριο, αντίστοιχα. Αυτό μπορεί να αποδοθεί στο γεγονός ότι κατά τη διάρκεια της σεισμικής διέγερσης, ένα επίπεδο (βελτιωμένο) έδαφος παραμορφώνεται ως διατμητική δοκός, της οποίας η ταλάντωση είναι πιο περιορισμένη από εκείνη μιας καμπτικής δοκού (ισοδυναμία I) και δε σχετίζεται με αξονική ταλάντωση που υπονοείται από την ισοδυναμία A . Αξίζει να σημειωθεί ότι η χρήση της σχέσης (2.8) για την εκτίμηση του d' θεωρείται κατάλληλη, ανεξαρτήτως της γεωμετρίας βελτίωσης (τιμές των D και d), της μεθόδου βελτίωσης (τιμή του λόγου K) και της δεσπόζουσας περιόδου της σεισμικής κίνησης (T_e). Αυτό επειδή οι αριθμητικές προβλέψεις που εμπεριέχονται στο Σχήμα 2.11 αντιστοιχούν σε 3Δ αναλύσεις με τα ακόλουθα χαρακτηριστικά: $d = 1$ και 2m , $D/d = 2, 3, 4, 5, 6$ και 11 , $K = 15$ και 30 , $T_e = 0.1$ και 0.2sec .

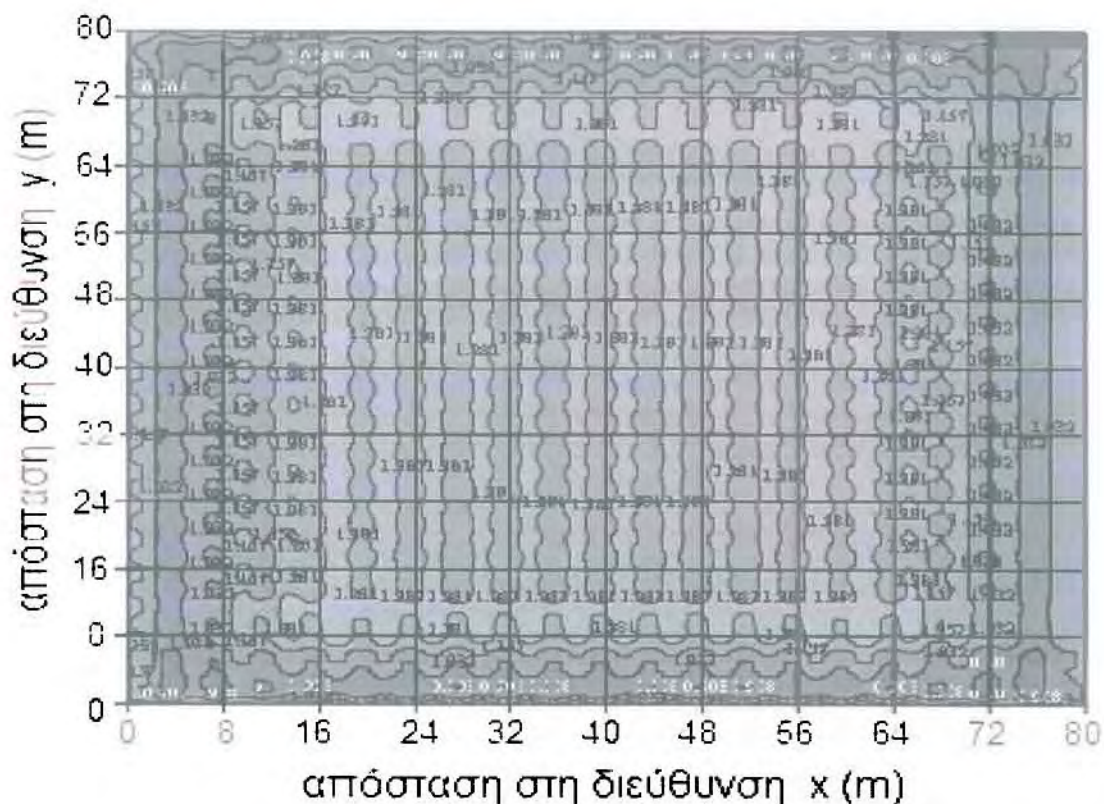


Σχήμα 2.11: Σύγκριση αναλυτικών προβλέψεων πάχους d' «ισοδύναμων» διαφραγματικών τοίχων με τις τιμές των αριθμητικών πειραμάτων για σειρά πασσάλων (d, D) (Bouckovalas et al, 2006).

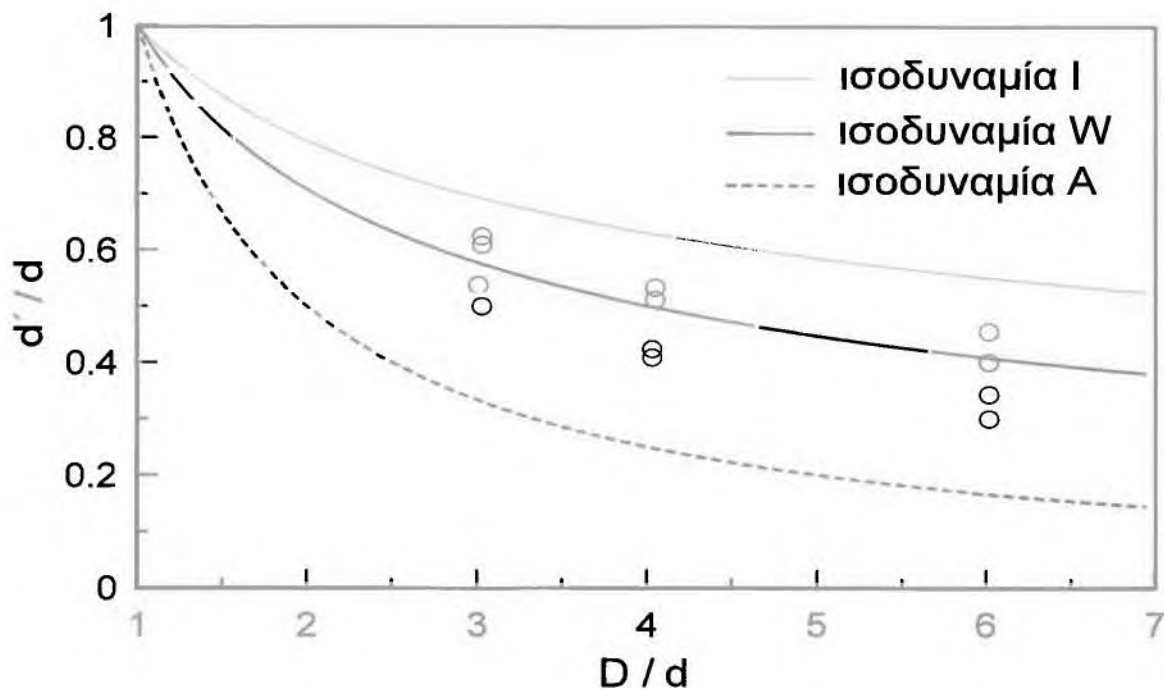
Στη συνέχεια, οι Bouckovalas et al (2006) προχώρησαν στην περίπτωση της 2Δ ανάλυσης καννάβου πασσάλων βελτίωσης, έτσι στο Σχήμα 2.12 παρουσιάζει τις ισοκαμπύλες ενίσχυσης της a_{max} από μια 3Δ ανάλυση σεισμικής απόκρισης καννάβου 19x19 πασσάλων βελτίωσης με $d = 1m$, $D = 4m$ και $K = 30$ εντός 10m μαλακού εδάφους επί άκαμπτου υπόβαθρου.

Οι αριθμητικές λεπτομέρειες του Σχήματος 2.12 δεν διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο. Η βασική παρατήρηση έγκειται στο ότι η ενίσχυση της a_{max} στην επιφάνεια του εδάφους δεν είναι ομοιόμορφη, γεγονός που υπογραμμίζει τον 3Δ χαρακτήρα της σεισμικής απόκρισης καννάβου πασσάλων. Παρόλα αυτά, μακριά από τα πλευρικά όρια του καννάβου (π.χ για τιμές των x και y που κυμαίνονται από 20 έως 60m), παρατηρείται συμμετρία στην απόκριση του εδάφους, δηλαδή η εν λόγω απόκριση δεν αλλάζει για διαφορετικές τιμές της απόστασης y . Αυτή ακριβώς η συμμετρία επιτρέπει τη διενέργεια «ισοδύναμων» 2Δ αναλύσεων, χρησιμοποιώντας τη μεθοδολογία που προέκυψε παραπάνω για μια σειρά πασσάλων. Με άλλα λόγια, ένας κάνναβος πασσάλων (διαμέτρου d σε απόσταση D από κέντρο σε κέντρο), μπορεί να θεωρηθεί ως μια σειρά «ισοδύναμων» διαφραγματικών τοίχων πάχους d' σε μια απόσταση D μεταξύ τους, μια γεωμετρία βελτίωσης που προσομοιώνεται επακριβώς με 2Δ ανάλυση.

Τούτου δοθέντος, στη συνέχεια οι Bouckovalas et al (2006) ακολουθώντας τη μεθοδολογία για τη 2Δ ανάλυση μονής σειράς πασσάλων βελτίωσης, εκτίμησαν την τιμή του d' για 2Δ αναλύσεις καννάβου πασσάλων μέσω σύγκρισης της ενίσχυσης της a_{max} στην επιφάνεια του εδάφους από 3Δ αναλύσεις αναφοράς με αντίστοιχες εκτιμήσεις από παραμετρικές 2Δ αναλύσεις. Έτσι, στο Σχήμα 2.13 συγκρίνονται τα αποτελέσματα από τα αριθμητικά πειράματα με τις τρεις (3) αναλυτικές εκτιμήσεις της τιμής του d' των σχέσεων (2.4), (2.6) και (2.8).



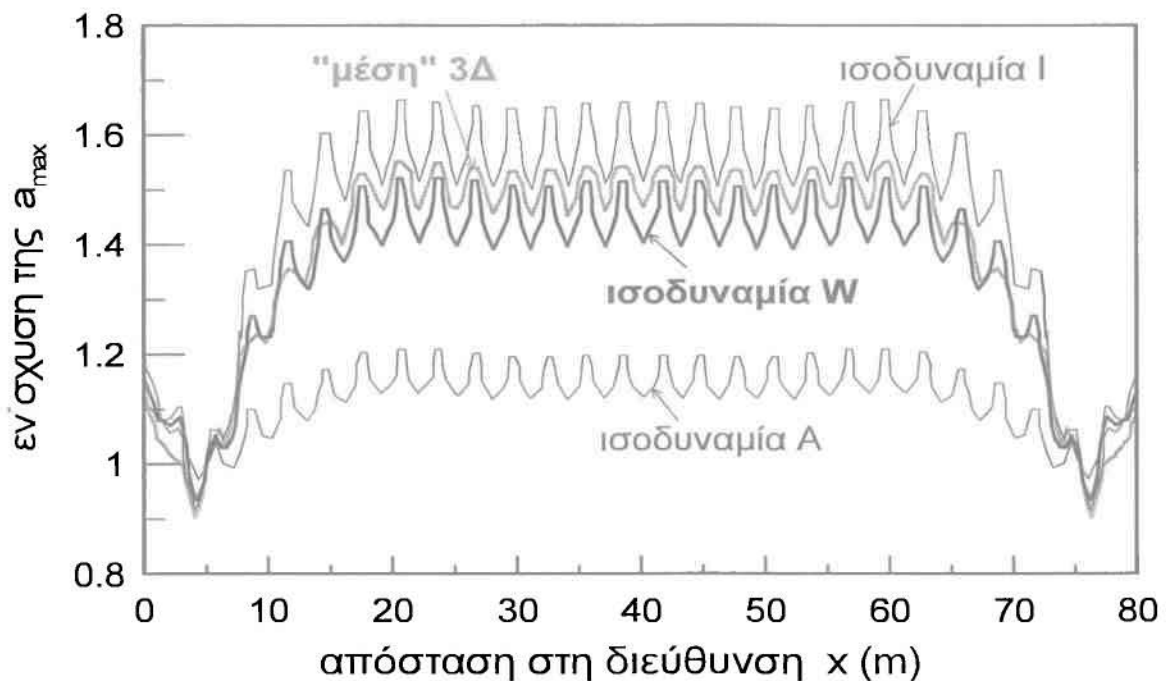
Σχήμα 2.12: Ισοκαμπύλες ενίσχυσης της a_{max} από 3Δ ανάλυση (καννάβου 80x10x80) ενός καννάβου 19x19 πασσάλων ($d=1m, D=4m$) (Bouckouvalas et al, 2006).



Σχήμα 2.13: Σύγκριση αναλυτικών προβλέψεων πάχους d' «ισοδύναμων» διαφραγματικών τοίχων με τις τιμές των αριθμητικών πειραμάτων για κάρναβου πασσάλων (d, D). (Bouckouvalas et al, 2006).

Η σύγκριση αυτή υποδεικνύει ότι η χρήση της σχέσης (2.8), δηλαδή της ισοδυναμίας W , αποδίδει ξανά τη βέλτιστη προσαρμογή στην 3Δ απόκριση. Επισημαίνεται ότι η χρήση της σχέσης (2.8) για την εκτίμηση του d' προς χρήση σε 2Δ αναλύσεις καννάβου πασσάλων ισχύει, ανεξαρτήτως της γεωμετρίας (τιμές d και D) και της μεθόδου βελτίωσης (τιμή K). Αυτό προκύπτει από το γεγονός ότι τα αριθμητικά πειράματα του Σχήματος 2.13 αντιστοιχούν σε 3Δ αναλύσεις με τα ακόλουθα χαρακτηριστικά: $d = 1$ και $2m$, $D/d = 3, 4$ και 6 , $K = 15$ και 30 .

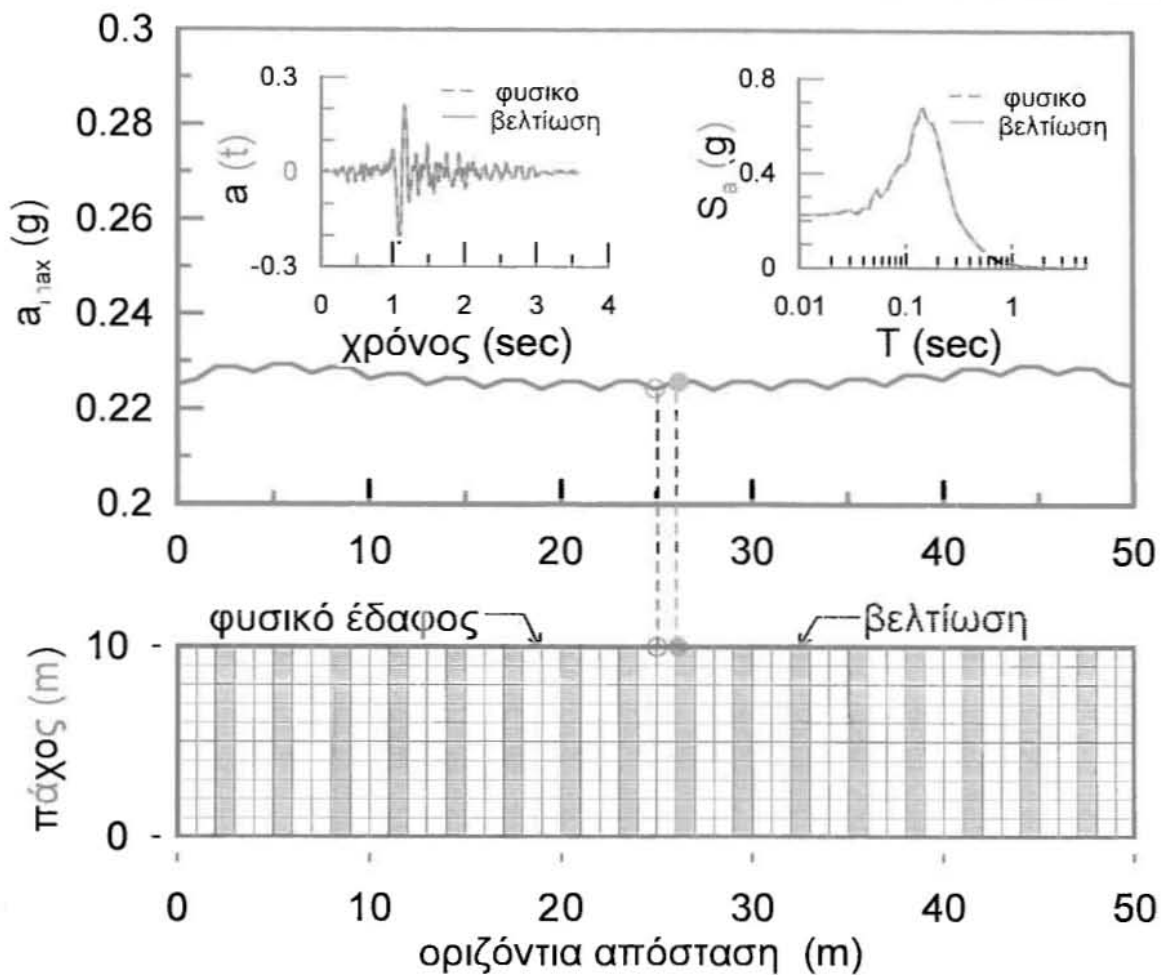
Τα Σχήματα 2.11 και 2.13 υποδεικνύουν σημαντική διαφορά στις τιμές του d' από τις σχέσεις (2.4), (2.6) και (2.8). Ωστόσο, για το σχεδιασμό έργων το πλέον σημαντικό είναι η διερεύνηση της επίδρασης μιας λανθασμένης τιμής του d' στην προβλεπόμενη σεισμική απόκριση. Για παράδειγμα, στο Σχήμα 2.14 συγκρίνεται η «μέση» απόκριση καννάβου 27×27 πασσάλων με $d=1m$, $D/d=3$ και $K=30$ από 3Δ ανάλυση (διακεκομμένη γραμμή), με τρεις αντίστοιχες 2Δ αναλύσεις των οποίων οι τιμές του d' βαθμονομήθηκαν με βάση τις τρεις (3) αναλυτικές προσεγγίσεις (συνεχείς γραμμές). Όπως προκύπτει, η ισοδυναμία W δίνει τη βέλτιστη προσαρμογή στην 3Δ ανάλυση, ενώ οι άλλες δύο αναλύσεις μπορεί να οδηγούν σε λάθος που υπερβαίνει το 25%.



Σχήμα 2.14: Τυπικό λάθος στην εκτίμηση της ενίσχυσης της a_{max} από 2Δ αναλύσεις (καννάβου 27×27 πασσάλων), βαθμονομημένων επί τη βάση των τριών (3) αναλυτικών προσεγγίσεων (Bouckovalas et al, 2006).

2.4 Προσομοίωση σεισμικής απόκρισης 2Δ γεωμετρίας βελτίωσης με 1Δ αναλύσεις

Το πρώτο ερώτημα που πρέπει να απαντηθεί είναι αν η σεισμική απόκριση μιας 2Δ γεωμετρίας βελτίωσης είναι επαρκώς "ομοιόμορφη" για να μπορεί να προσομοιωθεί ισοδύναμα με 1Δ αναλύσεις. Οι μετρήσεις από τη βιβλιογραφία (βλέπε παρ. 2.2) υποδεικνύουν ότι κάτι τέτοιο είναι δυνατό. Στην ίδια απάντηση οδηγήθηκαν και οι Papadimitriou et al (2006) οι οποίοι διερεύνησαν κατ' αρχήν το συγκεκριμένο θέμα. Έτσι, στο Σχήμα 2.15 παρουσιάζεται μια 2Δ γεωμετρία βελτίωσης με φυσικό έδαφος πάχους $H = 10\text{m}$ να έχει μέγιστο μέτρο διάτμησης $G_{s,0} = 80\text{MPa}$ και να βελτιώνεται με γεωϋλικό (π.χ. χαλικοπασσάλους) που έχει μέγιστο μέτρο διάτμησης $G_{s,0} = 800\text{MPa}$. Όπως γίνεται αντιληπτό, πρόκειται για μια γεωμετρία βελτίωσης όπου επάλληλες σειρές βελτίωσης (π.χ. χαλικοπασσάλων) έχει προσομοιωθεί για τις ανάγκες μιας 2Δ ανάλυσης επίπεδης παραμόρφωσης με επάλληλες σειρές διαφραγματικών τοίχων βελτίωσης (π.χ. χαλικοπασσαλο-διάφραγματα). Στη σύνθετα βελτιωμένη αυτή εδαφική στρώση επιβάλλεται σεισμική διέγερση στη βάση του καννάβου, η οποία επιβάλλει κατακόρυφα διαδιδόμενα κύματα SV. Η σεισμική διέγερση είχε ένταση 0.15g στο αναδυόμενο σεισμικό υπόβαθρο.



Σχήμα 2.15: Κάνναβος πεπερασμένων στοιχείων για αποτελέσματα για τη μεταβολή της μέγιστης επιτάχυνσης a_{max} και των αντιστοίχων ελαστικών φασμάτων απόκρισης S_a στην επιφάνεια του βελτιωμένου (σύνθετου) εδάφους επί τη βάση 2Δ ανάλυσης.

Όπως προκύπτει από το Σχήμα 2.15, η μέγιστη οριζόντια επιτάχυνση a_{max} στα διάφορα σημεία της εδαφικής επιφάνειας έχουν πολύ μικρή διαφοροποίηση (0.22 – 0.23g). Πρακτικώς ταυτόσημα αποτελέσματα παίρνουμε και σε όρους χρονοϊστοριών επιτάχυνσης αλλά και ελαστικών φασμάτων απόκρισης σε 2 γειτονικούς κόμβους στο κέντρο της βελτιωμένης περιοχής, ο ένας επί του φυσικού εδάφους και ο άλλος επί της βελτίωσης. Συνεπώς, η σεισμική απόκριση στην επιφάνεια μπορεί να θεωρηθεί ως πρακτικώς ομοιόμορφη, και ως τέτοια μπορεί να εκτιμηθεί ως αποτέλεσμα μιας 1Δ ανάλυσης σεισμικής απόκρισης ενός ισοδύναμα-ομοιογενούς βελτιωμένου εδάφους ίδιου πάχους H , καταργώντας την ανάγκη για 2Δ αναλύσεις. Το ερώτημα που απομένει είναι να βρεθούν οι δυναμικές παράμετροι του ως άνω ισοδύναμα-ομοιογενούς βελτιωμένου εδάφους.

Πρακτικώς η γεωμετρία εκτενούς βελτίωσης οιασδήποτε 2Δ ανάλυσης μπορεί να ποσοτικοποιηθεί με χρήση δύο (2) παραμέτρων:

(α) του λόγου μεγίστων δυστησιών βελτίωσης προς του εδάφους

$$K_o = G_{i,o}/G_{s,o} (>> 1),$$

(β) του ποσοστού αντικατάστασης σε όρους εμβαδού

$$a_r = d' / s (< 1),$$

όπου d' είναι το πάχος του πάσσαλο-διαφράγματος της ανάλυσης και s η απόσταση των επάλληλων διαφραγμάτων (από-κέντρο-σε-κέντρο). Σε πρώτη προσέγγιση, η μέγιστη τιμή του μέτρου διάτμησης $G_{eq,o}$ ενός ισοδύναμα-ομοιογενούς βελτιωμένου εδάφους εκτιμάται θεωρώντας ότι τα κατακόρυφα προσπίπτοντα κύματα SV επιβάλλουν την ίδια διατμητική παραμόρφωση γ τόσο στο γεωϊλικό της βελτίωσης (π.χ. χάλικες) όσο και στο γειτονικό φυσικό έδαφος, σύμφωνα με την πρόταση των Baez & Martin (1993).

Σε μια τέτοια περίπτωση, αυτή η κοινή τιμή της διατμητικής παραμόρφωσης γ επιβάλλεται και στο ισοδύναμα-ομοιογενές βελτιωμένο έδαφος. Η εκτίμηση της $G_{eq,o}$ γίνεται μέσω του υπολογισμού της συνολικής διατμητικής δύναμης $F_{eq,o}$ που επιβάλλουν τα κύματα SV σε ένα μοναδιαίο τμήμα της βελτίωσης που αποτελείται από έναν «πάσσαλο» γεωϊλικού βελτίωσης και το συνορεύον φυσικό έδαφος (βλέπε Σχήμα 2.16a):

$$F_{eq,o} = F_{s,o} + F_{i,o} \Rightarrow \tau_{eq,o} = \tau_{s,o}(1 - a_r) + \tau_{i,o}a_r \quad (2.9)$$

Δεδομένης της ανωτέρω ισότητας των διατμητικών παραμορφώσεων γ στον «πάσσαλο» βελτίωσης, το φυσικό έδαφος αλλά και το ισοδύναμα-ομοιογενές βελτιωμένο έδαφος, η σχέση (2.9) μετεγγράφεται ως:

$$G_{eq,o} = G_{\gamma} = G_{s,o}[(1 - a_r) + K_o a_r] \quad (2.10)$$

Ως μια δεύτερη προσέγγιση του προβλήματος, το μέγιστο μέτρο διάτμησης $G_{eq,o}$ του ισοδύναμα-ομοιογενούς βελτιωμένου εδάφους εκτιμάται εμμέσως θεωρώντας δύο (2) γεωϊλικά εν σειρά υπό την ίδια ορθή τάση σ (Papadimitriou et al, 2006).

Αυτή η 1-Δ φόρτιση οδηγεί σε μετατοπίσεις d_1 και d_2 στα δύο γεωϋλικά, δύο τιμές που συνδέονται με τα μέτρα Ελαστικότητας E_1 και E_2 των δύο γεωϋλικών, αλλά και τις αντίστοιχες αρχικές διαστάσεις L_1 και L_2 , αντίστοιχα. Στην περίπτωση αυτή, το ισοδύναμα-ομοιογενές υλικό έχει συνολική διάσταση $L=L_1+L_2$ και μια συνολική μετατόπιση $d=d_1+d_2$, οι οποίες επίσης συσχετίζονται μέσω του μέτρου Ελαστικότητας E_{eq} του ισοδύναμα-ομοιογενούς υλικού. Πιο συγκεκριμένα, με βάση της θεωρία ελαστικότητας, οι τιμές των E_1 , E_2 και E_{eq} συσχετίζονται ως ακολούθως:

$$E_1 = \sigma \frac{L_1}{d_1} \quad ; \quad E_2 = \sigma \frac{L_2}{d_2} \quad ; \quad E_{eq} = \sigma \frac{L_1 + L_2}{d_1 + d_2} \quad (2.11)$$

Εισάγοντας τις τιμές των E_1 και E_2 στη σχέση εκτίμησης του E_{eq} στην εξίσωση (2.11), προκύπτει η παρακάτω σχέση εκτίμησης του E_{eq} :

$$E_{eq} = E_2 \frac{(E_1/E_2)}{a_r + (1 - a_r)(E_1/E_2)} \quad (2.12)$$

όπου $a_r = L_1/(L_1+L_2)$. Θεωρώντας ότι το 1-Δ φυσικό ανάλογο έχει εφαρμογή και στο πρόβλημα της σεισμικής διάτμησης του «πασσάλου» (υλικό 1) και του φυσικού εδάφους (υλικό 2), η κοινή τιμή της ορθής τάσης σ αντικαθίσταται από μια κοινή τιμή διατμητικής τάσης τ , ενώ οι τιμές των μέτρων ελαστικότητας E_1 , E_2 και E_{eq} αντικαθίστανται από τις τιμές των μεγίστων μέτρων διάτμησης $G_{1,o}$, $G_{s,o}$ και $G_{eq,o}$. Συνεπώς, η τιμή του $G_{eq,o}$ δίνεται από:

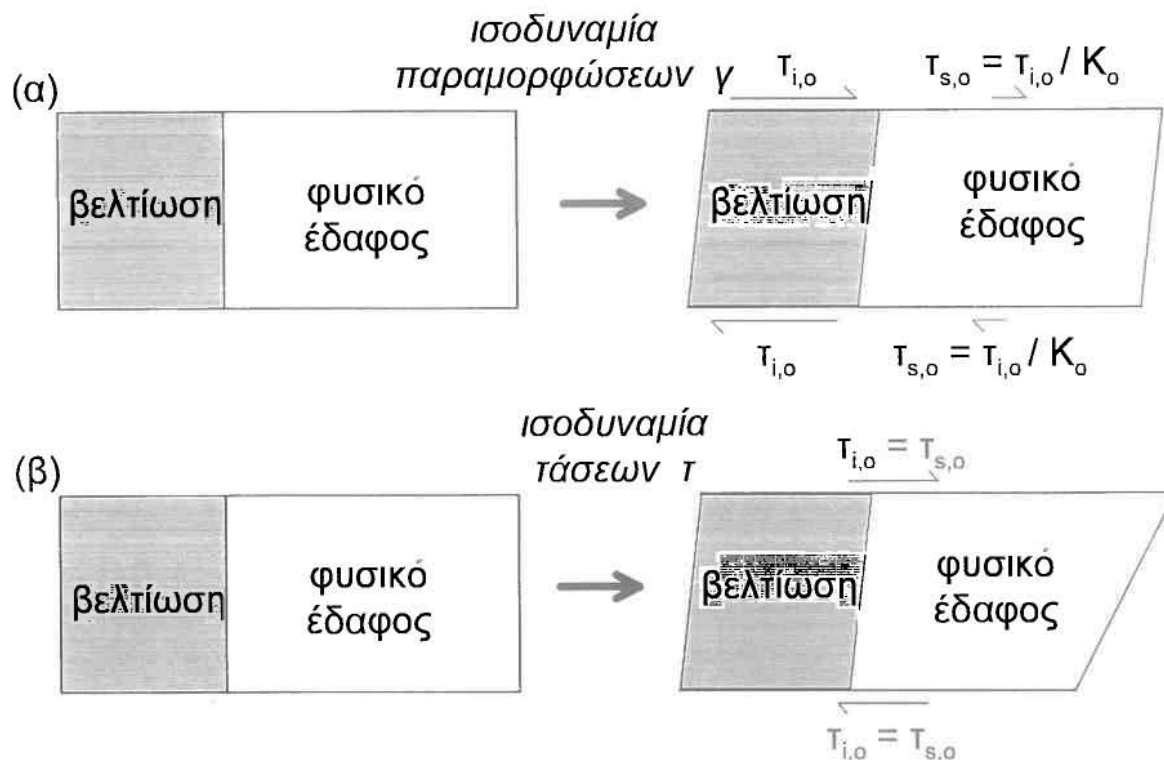
$$G_{eq,o} = G_{\tau au} = G_{s,o} [K_o / (a_r + (1 - a_r)K_o)] = G_{s,o} M_o \quad (2.13)$$

όπου $M_o > 1$ είναι ένας αδιάστατος πολλαπλασιαστής του μεγίστου μέτρου διάτμησης του φυσικού εδάφους $G_{s,o}$. Με τη θεώρηση αυτή, η κοινή τιμή της διατμητικής τάσης τ οδηγεί σε διαφορετικές τιμές της διατμητικής παραμόρφωσης γ για τον «πασσαλο» και το φυσικό έδαφος. Πιο συγκεκριμένα, η διατμητική παραμόρφωση του «πασσάλου» αποδεικνύεται K_o φορές μικρότερη από την αντίστοιχη διατμητική παραμόρφωση του φυσικού εδάφους σύμφωνα με τη σχέση $\gamma_{1,o} = \gamma_{s,o}/K_o$, η οποία αποτυπώνεται και στο Σχήμα 2.16b.

Οι σχέσεις (2.10) και (2.13) αποτυπώνουν δύο (2) αναλυτικές προσεγγίσεις για την τιμή του μεγίστου μέτρου διάτμησης $G_{eq,o}$ του ισοδύναμα-ομοιογενούς βελτιωμένου εδάφους. Για τη διακρίβωση ποιας από τις δύο προσεγγίσεις είναι πιο κατάλληλη για χρήση σε 1-Δ αναλύσεις σεισμικής απόκρισης του βελτιωμένου εδάφους γίνεται ένα αριθμητικό πείραμα, τα αποτελέσματα του οποίου συνοψίζονται στο Σχήμα 2.17. Πιο συγκεκριμένα, για το προφίλ βελτίωσης πάχους $H = 10m$ τους Σχήματος 2.15, εκτελέστηκαν επιπλέον τρεις (3) γραμμικές 1-Δ αναλύσεις σεισμικής απόκρισης για ομοιόμορφο έδαφος με μέγιστο μέτρο διάτμησης G_o ίσο με:

- 320 MPa, που αντιστοιχεί στην τιμή του $G_{eq,o}=G_{\gamma}$ για ισοδύναμα-ομοιογενές βελτιωμένο έδαφος με χαρακτηριστικά $G_{s,o} = 80MPa$, $K_o = 10$ και $a_r = 33\%$, σύμφωνα με τη σχέση 2.10 (ισοδυναμία γ)
- 114.3MPa, που αντιστοιχεί στην τιμή του $G_{eq,o}=G_{\tau}$ για ισοδύναμα-ομοιογενές βελτιωμένο έδαφος με χαρακτηριστικά $G_{s,o} = 80MPa$, $K_o = 10$ και $a_r = 33\%$, σύμφωνα με τη σχέση 2.13 (ισοδυναμία τ), και
- 80MPa, που αντιστοιχεί στην τιμή του $G_{s,o}$

Τα αποτελέσματα των τριών (3) αυτών αναλύσεων συγκρίνονται στο Σχήμα 2.17 με τα αποτελέσματα της 2-Δ ανάλυσης σεισμικής απόκρισης για το (σύνθετο) βελτιωμένο έδαφος με χαρακτηριστικά $G_{s,o} = 80MPa$, $K_o = 10$ και $a_r = 33\%$ (τα ίδια του Σχήματος 2.15). Πιο συγκεκριμένα, στο Σχήμα 2.17α η σύγκριση γίνεται σε όρους ενίσχυσης της μέγιστης επιτάχυνσης a_{max} κατά μήκος της επιφάνειας του εδάφους, ενώ στο Σχήμα 2.17β η σύγκριση γίνεται ως προς την ενίσχυση του ελαστικού φάσματος απόκρισης (για απόσβεση 5%) στην επιφάνεια του εδάφους. Όπως προκύπτει, η 1-Δ ανάλυση για ένα ισοδύναμα-ομοιογενές γεωϊλικό του οποίου το μέγιστο μέτρο διάτμησης εκτιμάται από τη σχέση (2.13) πρακτικώς αναπαράγει τα αποτελέσματα της 2-Δ ανάλυσης, ενώ η χρήση της σχέσης (2.10) οδηγεί σε λανθασμένες εκτιμήσεις. Προφανώς, μικρο-διαφοροποίηση στην τιμή της $G_{eq,o}$ γύρω από την τιμή 114.3MPa θα μπορούσε να δώσει ακόμη ακριβέστερα αποτελέσματα.

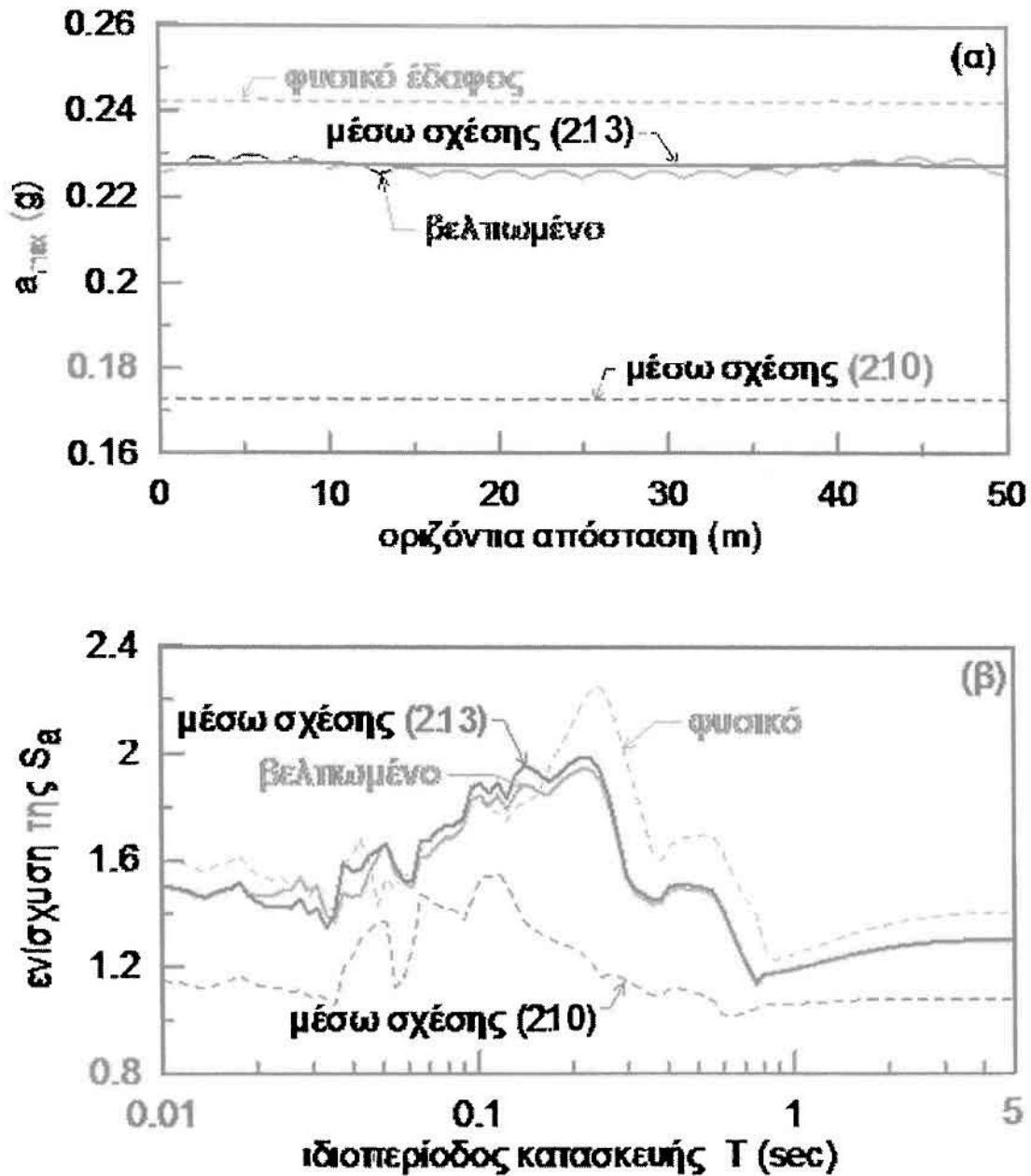


Σχήμα 2.16: Σχηματική απεικόνιση της παραμορφωμένου μοναδιαίου τμήματος βελτίωσης επί τη βάση των παραδοχών ισοδυναμίας σε όρους διατμητικής παραμόρφωσης γ και τάσης τ .

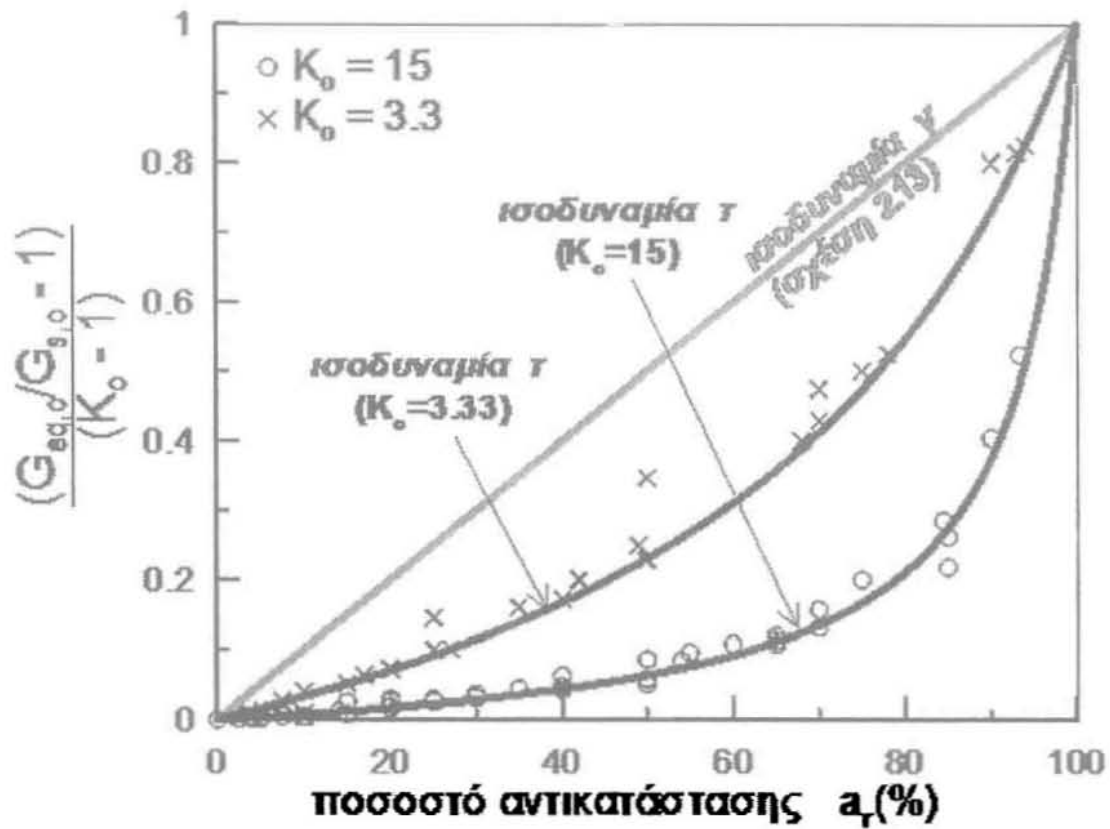
Επιπλέον, στο Σχήμα 2.17 οι Papadimitriou et al (2006) παρουσιάζουν ένα παράδειγμα της μεθοδολογίας έμμεσης εκτίμησης της τιμής του $G_{eq,o}$ για ένα συγκεκριμένα σετ τιμών $G_{s,o}$, K_o και a_r . Με άλλα λόγια, για κάθε περίπτωση βελτίωσης (δηλαδή για κάθε σετ τιμών $G_{s,o}$, K_o και a_r), η ορθή τιμή του $G_{eq,o}$ μπορεί να εκτιμηθεί επαναλαμβάνοντας την 1-Δ ανάλυση σεισμικής απόκρισης με μόνη αλλαγή την τιμή του $G_{eq,o}$, έως ότου αυτή αναπαράγει τα αποτελέσματα της αντίστοιχης 2-Δ ανάλυσης σεισμικής απόκρισης στην επιφάνεια του εδάφους. Επαναλαμβάνοντας την ως άνω διαδικασία δοκιμής-λάθους (trial-and-error) για διάφορες τιμές του λόγου K_o ($= 3.33, 15$) και του ποσοστού αντικατάστασης $a_r = 2.5 - 94\%$ προκύπτει το συγκεντρωτικό διάγραμμα του Σχήματος 2.18 (για 67 περιπτώσεις βελτίωσης). Χάριν σύγκρισης με αυτές τις αριθμητικές εκτιμήσεις της τιμής του $G_{eq,o}$ στο ίδιο σχήμα εμπεριέχονται και οι συνεχείς γραμμές που προκύπτουν από τις

σχέσεις (2.10) και (2.13). Η σύγκριση αυτή υποδεικνύει ότι η ακρίβεια της σχέσης (2.13) δεν εξαρτάται από τις τιμές των K_0 και a_r . Περαιτέρω προκύπτει ότι το μέγιστο μέτρο διάτμησης $G_{eq,0}$ για το ισοδύναμα-ομοιογενές βελτιωμένο έδαφος επηρεάζεται πολύ λιγότερο από το ποσοστό αντικατάστασης a_r σε όρους εμβαδού, απ' ό,τι προβλέπεται από τη σχέση (2.10) των Baez and Martin (1993). Με άλλα λόγια, η δυστημσία του εδάφους αυξάνει πολύ λιγότερο λόγω της βελτίωσης απ' ό,τι προκύπτει με βάση τη σχέση (2.10).

Υπογραμμίζεται ότι η χρήση της σχέσης (2.13) για την εκτίμηση της $G_{eq,0}$ δεν περιορίζεται από το ανωτέρω εύρος διακύμανσης των K_0 και a_r , καθώς έχει βασισθεί σε ένα απλουστευτικό θεωρητικό προσομοίωμα της φόρτισης του σύνθετου βελτιωμένου εδάφους και έχει επιβεβαιωθεί από αποτελέσματα αριθμητικών αναλύσεων. Παρόλα αυτά, η επιβεβαίωση της ανωτέρω θεώρησης από επιτόπου μετρήσεις ή εργαστηριακές δοκιμές (φυγοκεντρική) θεωρείται απαραίτητη. Επιπλέον, δεν έχει διερευνηθεί η επίδραση της δεσπόζουσας περιόδου T_e και το αν η συγκεκριμένη θεωρία μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για ομοιόμορφη βελτίωση η οποία όμως δε φτάνει έως το βραχώδες υπόβαθρο, τα οποία διερευνήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας.



Σχήμα 2.17: Σύγκριση αποτελεσμάτων από 1-Δ αναλύσεις για ισοδύναμα-ομοιογενές βελτιωμένο έδαφος με αποτελέσματα από 2-Δ ανάλυση για σύνθετο βελτιωμένο έδαφος, σε όρους: α) μεταβολής της μέγιστης επιτάχυνσης a_{max} στην επιφάνεια του εδάφους, β) ενίσχυσης του ελαστικού φάσματος απόκρισης S_a για μια τυπική θέση στην επιφάνεια του εδάφους (Papadimitriou et al, 2006).



Σχήμα 2.18: Σύγκριση μεταξύ αριθμητικών εκτιμήσεων του $G_{e,q,0}$ και των δύο (2) αναλυτικών προσεγγίσεων αυτού για μεγάλο εύρος μεταβολής του ποσοστού αντικατάστασης σε όρους εμβαδού a_r και του λόγου μεγίστων μέτρων διάτμησης βελτίωσης προς του εδάφους K_0 (Paradimitriou et al, 2006).

Κεφάλαιο 3

ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ

3.1 Περιγραφή μεθοδολογίας

Πέραν της συγκριτικής αξιολόγησης των πορισμάτων σχετικών δημοσιεύσεων για τη μελέτη της επίδρασης της βελτίωσης στη σεισμική απόκριση ομοιόμορφα βελτιωμένων εδαφών, για την περάτωση αυτής της εργασίας, πραγματοποιήθηκε μία σειρά αριθμητικών αναλύσεων. Το υπολογιστικό πρόγραμμα που χρησιμοποιείται είναι το FLAC (Itasca Inc, 1998) το οποίο εφαρμόζεται για την επίλυση δισδιάστατων προβλημάτων με χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων διαφορών. Είναι ένα λογισμικό που εξειδικεύεται στην προσομοίωση της συμπεριφοράς εδάφους και βράχου, δηλαδή προβλημάτων που άπτονται της γεωτεχνικής (σεισμικής και μη) μηχανικής.

Υπενθυμίζεται ότι η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών βασίζεται στην αριθμητική επίλυση της πλήρους διαφορικής εξίσωσης κίνησης και η διαδικασία επίλυσης εξελίσσεται με υπολογιστικά βήματα. Το υλικό προσομοιώνεται με ζώνες (ή στοιχεία) που μορφώνουν έναν κάνναβο, ο οποίος έχει καθοριστεί από το χρήστη για να ταιριάζει με τη γεωμετρία του προβλήματος. Ειδικά στο FLAC, ο κάνναβος έχει την ικανότητα να κινείται και να παραμορφώνεται «ακολουθώντας» το εδαφικό υλικό, κατά τα πρότυπα της μεθοδολογίας Lagrange («του κινούμενου παρατηρητή»), αν χρειάζεται από τη φύση του προβλήματος (όχι στην παρούσα εργασία). Μέσω της εξίσωσης κίνησης υπολογίζονται σε κάθε βήμα αρχικά οι ταχύτητες των κόμβων του δικτύου (ή αλλιώς, η προσαύξηση των μετατοπίσεων ανά βήμα) από τις τάσεις και δυνάμεις του προηγούμενου βήματος.

Από αυτές προκύπτουν οι ρυθμοί των παραμορφώσεων σε κάθε κόμβο και από αυτούς οι νέες τάσεις στις ζώνες του δικτύου βάσει της καταστατικής σχέσης τάσεων-παραμορφώσεων που καθορίζεται από το χρήστη. Από τις τάσεις στις ζώνες (στις οποίες περιλαμβάνονται και οι τάσεις του προηγούμενου βήματος) προκύπτουν οι ισοδύναμες δυνάμεις στους κόμβους του δικτύου, που οφείλονται στην εντατική κατάσταση του μέσου. Η επαλληλία αυτών με τη δύναμη λόγω αποσβέσεως αλλά και τις εξωτερικές δυνάμεις δίνει τη μη ισορροπούσα δύναμη ΣF σε κάθε κόμβο. Η δύναμη αυτή θα πρέπει σύμφωνα με τη διαφορική εξίσωση κίνησης να είναι ίση με την αδρανειακή δύναμη. Έτσι διαιρώντας με την ισοδύναμη μάζα m κάθε κόμβου και πολλαπλασιάζοντας το πηλίκο επί κάποιο μικρό χρονικό βήμα Δt , προκύπτει η προσαύξηση την ταχύτητας κάθε κόμβου σύμφωνα με τη σχέση:

$$U_{(t+\Delta t/2)} = u_{(t-\Delta t/2)} + (\Sigma F/m) * \Delta t$$

Έχοντας υπολογίσει τη νέα ταχύτητα του κόμβου η παραπάνω διαδικασία επαναλαμβάνεται για το επόμενο υπολογιστικό βήμα. Στην περίπτωση που το πρόβλημα επιλύεται δυναμικά (όπως στην παρούσα εργασία), η μάζα και η σταθερά αποσβέσεως είναι αυτές που αντιστοιχούν στις πραγματικές παραμέτρους, ενώ τα χρονικά βήματα υπολογισμού Δt αντιστοιχούν σε πραγματικά χρονικά διαστήματα. Αν η επίλυση επιλεγεί να γίνει στατικά, τότε μάζα, σταθερά αποσβέσεως και το βήμα υπολογισμού καθορίζονται από το ίδιο το πρόγραμμα έτσι ώστε να επιτυγχάνεται ταχύτερη σύγκλιση. Ειδικότερα στο FLAC, για καλύτερα αποτελέσματα η επίλυση διαχωρίζει την κάθε τετραπλευρική ζώνη του καννάβου σε τέσσερις τριγωνικές υποζώνες. Έτσι, σε δυναμικά προβλήματα το χρονικό βήμα υπολογισμού υπολογίζεται από το πρόγραμμα έτσι ώστε να είναι μικρότερο από το κρίσιμο για το οποίο ισχύει:

$$\Delta t_{crit} = \min[A / V_p d_{max}]$$

Όπου: A το εμβαδόν της τριγωνικής υποζώνης κάθε ζώνης του δικτύου

d_{max} η μεγαλύτερη διαγώνιος της και

V_p η ταχύτητα διάδοσης των διαμήκων κυμάτων όπως αυτή υπολογίζεται από τις δεδομένες ελαστικές σταθερές του προβλήματος.

Το \min αναφέρεται στον ελάχιστο λόγο $A/(V_p d_{\max})$ που απαντάται σε όλο το δίκτυο πεπερασμένων διαφορών. Ο περιορισμός αυτός για το χρονικό βήμα υπολογισμού οφείλεται, κατ' ουσία, στην απαίτηση όπως η "πληροφορία" για τη σχέση τάσεων-παραμορφώσεων και δράσεων να μη διαδίδεται μέσα στον κάρναβο με ταχύτητα μεγαλύτερη από την ταχύτητα διάδοσης των διαμήκων κυμάτων, παραβιάζοντας τον πραγματικό μηχανισμό που συναντάται στη φύση. Επισημαίνεται, ότι η επιλογή του λογισμικού FLAC για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας, έναντι άλλων προγραμμάτων (π.χ. πεπερασμένων στοιχείων) στηρίχθηκε στα κάτωθι (γενικής εφαρμογής) πλεονεκτήματα:

- Το FLAC αντιμετωπίζει την ανελαστικότητα στη σχέση τάσεων – παραμορφώσεων με διάφορα ελαστο-πλαστικά καταστατικά μοντέλα (π.χ. το μοντέλο Mohr-Coulomb, Drucker-Prager) και μάλιστα σχεδόν με τις ίδιες απαιτήσεις σε υπολογιστική ισχύ που προβλέπονται για το απλό ελαστικό μοντέλο. Αντίθετα, προγράμματα πεπερασμένων στοιχείων απαιτούν σημαντικά περισσότερο χρόνο.
- Δε γίνεται μόρφωση και αποθήκευση μητρώων ακαμψίας οπότε μπορεί να χρησιμοποιηθεί μεγάλος αριθμός στοιχείων κατά την προσομοίωση με μέτριες απαιτήσεις σε μνήμη, ενώ προβλήματα με μεγάλες μετατοπίσεις και παραμορφώσεις αντιμετωπίζονται επίσης χωρίς πρόσθετη υπολογιστική προσπάθεια.
- Διαθέτει μια ενσωματωμένη γλώσσα, τη Fish που μοιάζει με τη FORTRAN, αλλά που είναι προσαρμοσμένη στις δυνατότητες, απαιτήσεις και ανάγκες του FLAC. Η Fish δίνει την δυνατότητα στον χρήστη να εφοδιάζει τα αρχεία εισόδου του με υπορουτίνες και κώδικες που μπορούν να μετατρέπουν ή να συμπληρώνουν καταστατικά προσομοιώματα ή να εισάγουν στην υπολογιστική διαδικασία νέες μεταβλητές και παραμέτρους.

Παρά τα πλεονεκτήματα του FLAC που αναφέρονται παραπάνω, υπάρχουν και ορισμένες αδυναμίες που ενδέχεται να αυξήσουν τις απαιτήσεις σε υπολογιστική ισχύ. Συγκεκριμένα:

- Η χρήση συντελεστή αποσβέσεως ανάλογου της ακαμψίας, πολύπλοκα ελαστοπλαστικά καταστατικά προσομοιώματα και άλλες υπορουτίνες γραμμένες σε Fish, που παρεμβάλλονται σε κάθε υπολογιστικό κύκλο που εκτελεί το πρόγραμμα, είναι παράγοντες που αυξάνουν το συνολικό χρόνο επίλυσης.

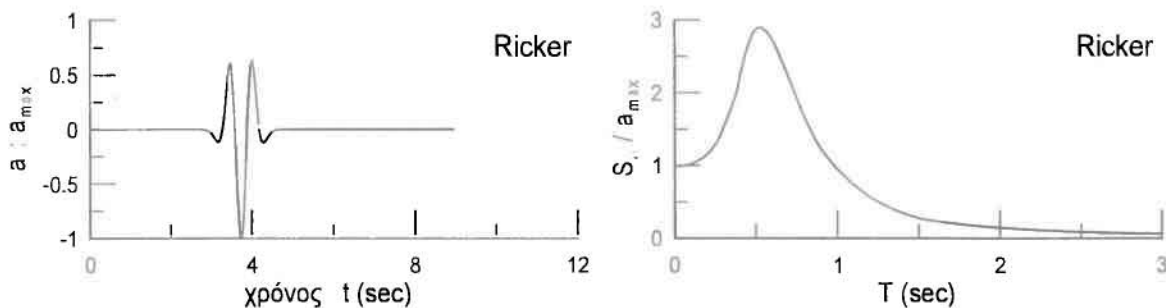
- Κυρίως όμως χρειάζεται σημαντική υπολογιστική προσπάθεια διότι τα υπολογιστικά βήματα που απαιτούνται πρέπει να είναι μικρά και κατά συνέπεια πολλά σε αριθμό, αφού προκειμένου να μειωθεί η επίδραση της αδράνειας στο ελάχιστο, οι επιβαλλόμενες ταχύτητες στο σύνορο πρέπει να είναι μικρές. Αυτό ισχύει και για τη στατική επίλυση καθώς, λόγω του χαρακτήρα του κώδικα, η επίδραση της αδράνειας υπεισέρχεται και σ' αυτή την ανάλυση.

Σε κάθε περίπτωση, οι συνοριακές συνθήκες του προβλήματος επιλέγονται με γνώμονα την κατά το δυνατό καλύτερη προσομοίωση του προβλήματος που απαντάται στη φύση και την υπολογιστική ταχύτητα που απαιτείται για την εξαγωγή αποτελεσμάτων. Έτσι, με βάση τα παραπάνω δεν υπάρχει ανάγκη για πολύ μεγάλους καννάβους προσομοίωσης για να επιτυγχάνεται ο στόχος μη επηρεασμού της περιοχής ενδιαφέροντος από τις συνοριακές συνθήκες. Εναλλακτικά, χρησιμοποιείται ένας λογικής τάξης μεγέθους κάρναβος στο κάτω όριο του οποίου επιβάλλονται κατάλληλες συνθήκες απορρόφησης της ενέργειας («διαφανή όρια» ή αποσβεστήρες) που ισοδυναμούν με την απόσβεση ακτινοβολίας που θα ελάμβανε χώρα εάν επρόκειτο για ημιχώρο. Ακόμη επισημαίνεται ότι η κίνηση επιβάλλεται στο κάτω όριο του καννάβου ως χρονοϊστορία διατμητικής τάσης και όχι μετατόπισης, ταχύτητας ή επιτάχυνσης οπότε θα δημιουργούνταν τεχνητές ανακλάσεις στο εν λόγω όριο. Τέλος, στα πλευρικά όρια του καννάβου εφαρμόζονται συνθήκες ελεύθερου πεδίου οι οποίες εξασφαλίζονται με ειδικές διατάξεις που πρακτικώς "επιβάλλουν" συνθήκη ελεύθερου πεδίου στο όριο (σύνορα «ελευθέρου πεδίου»).

3.2 Βαθμονόμηση μεθοδολογίας

3.2.1 Γενικά

Στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό FLAC5 (Itasca Inc 1998), με τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα που παρουσιάζονται στην παράγραφο 3.1. Επιπλέον των συνοριακών συνθηκών που παρουσιάζονται γενικώς στην ίδια παράγραφο, για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας, ως διέγερση χρησιμοποιήθηκε ο απλός παλμός Ricker σε χαμηλές σχετικά συχνότητες (απο 1 έως 10Hz). Όπως προαναφέρθηκε, ο παλμός εισήχθη ως χρονοϊστορία οριζόντιας διατμητικής τάσης στο κάτω μέρος των καννάβων (σε συνδυασμό με «απορροφητήρες» έχοντας τα μηχανικά χαρακτηριστικά του βραχώδους υποβάθρου), ούτως ώστε να προσομοιωθούν κατακόρυφα προσπίπτοντα κύματα SV από τον υποκείμενο (βραχώδη) ημίχωρο. Η συνολική διάρκεια της επιβαλλόμενης διέγερσης ήταν 6sec, αλλά η διάρκεια της ισχυρής κίνησης της διέγερσης είναι γενικώς πολύ μικρότερη. Το γεγονός αυτό υποδεικνύεται στο Σχήμα 3.1 που παρουσιάζει τη χρονοϊστορία επιτάχυνσης και το ελαστικό φάσμα απόκρισης ενός τυπικού παλμού Ricker, με δεσπόζουσα περίοδο $T_e=0.5\text{sec}$.



Σχήμα 3.1: Τυπικός παλμός Ricker, με δεσπόζουσα περίοδο $T_e=0.5\text{sec}$.

Επιπλέον, οι αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία ήταν ιξωδοελαστικές, χάριν απλότητας. Σε τέτοιου είδους αναλύσεις, η πραγματικώς υστερητική απόσβεση των γεωϋλικών προσομοιώνεται μέσω της απόσβεσης Rayleigh, η οποία είναι εξαρτώμενη από την συχνότητα. Πιο συγκεκριμένα, το μητρώο απόσβεσης C της εξίσωσης κίνησης του υλικού σημείου συσχετίζεται με τα μητρώα μάζας M και δυσκαμψίας K σύμφωνα με τη σχέση:

$$C = \alpha M + \beta K \quad (3.1)$$

όπου:

$$\alpha = \xi_{\min} \omega_{\min}$$

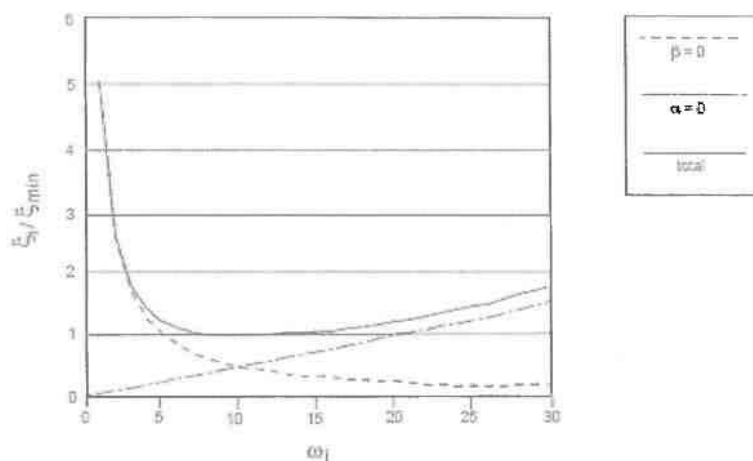
$$\beta = \xi_{\min} / \omega_{\min}$$

Η εν λόγω συσχέτιση της τελικής τιμής της απόσβεσης ξ με την κυκλική συχνότητα ω αποτυπώνεται στο Σχήμα 3.2. Όπως προκύπτει, παρουσιάζει ελάχιστη τιμή $\xi = \xi_{\min}$ για συχνότητα $\omega = \omega_{\min}$ ($=10\text{rad/s}$, στο Σχήμα 3.2) και τιμές $\xi > \xi_{\min}$ για τιμές ω τόσο μικρότερες όσο και μεγαλύτερες του ω_{\min} . Έτσι, το ζητούμενο είναι η βαθμονόμηση των ξ_{\min} και ω_{\min} ώστε να ανταποκρίνονται στις ανάγκες της κάθε ανάλυσης.

Δεδομένου ότι η εξάρτηση της απόσβεσης ξ από τη συχνότητα ω δεν είναι μια ρεαλιστική θεώρηση για την υστερητική απόσβεση των γεωϋλικών, σχετικώς ρεαλιστικές προσομοιώσεις επιτυγχάνονται με βαθμονόμηση της απόσβεσης Rayleigh ώστε να δίνει τις επιθυμητές τιμές ξ στις συχνότητες που κυρίως ενδιαφέρουν. Στο υπό μελέτη πρόβλημα, οι συχνότητες που κυρίως ενδιαφέρουν είναι εκείνες μεταξύ της δεσπόζουσας περιόδου της διέγερσης ω_e και της ιδιοπεριόδου ταλάντωσης της εδαφικής στρώσης ω_s , καθώς η δεσπόζουσα περίοδος της τελικής ταλάντωσης των υλικών σημείων του εδάφους θα έχει τιμή μεταξύ των δύο αυτών ακραίων τιμών. Χάριν απλότητας, στην παρούσα εργασία η εκτίμηση του ω_{\min} γίνεται θεωρώντας τη δεσπόζουσα περίοδο στην οποία αντιστοιχεί ίση με τη μέση τιμή μεταξύ των δύο προαναφερθέντων περιόδων ενδιαφέροντος, δηλαδή σύμφωνα με τη σχέση:

$$\omega_{\min} = \frac{2}{\left(\frac{1}{\omega_e} + \frac{1}{\omega_s} \right)} \quad (3.2)$$

Για την προσομοίωση της σεισμικής απόκρισης σχετικά μικρής έντασης επιλέχθηκε μια σχετικά μικρή τιμή $\xi_{\min} = 5\%$, η οποία οδηγεί γενικώς σε σχετικά μεγάλες ενισχύσεις που δε φθίνουν γρήγορα με την απόσταση. Από εκεί και πέρα όμως, οι παραμετρικές αναλύσεις που εκτελέστηκαν διερεύνησαν και την επίδραση της τιμής του ξ στις εκτιμώμενες γεωμορφικές επιδράσεις στη μέγιστη σεισμική επιτάχυνση του εδάφους.

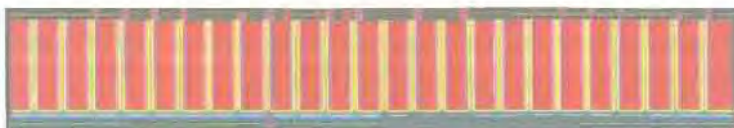


Σχήμα 3.2: Απόσβεση Rayleigh σε συνάρτηση με τη συχνότητα (ενδεικτικό γράφημα)

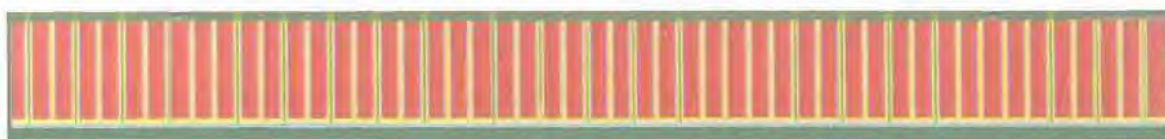
3.2.2 Επίδραση εύρους καννάβου στην ακρίβεια της ανάλυσης

Είναι γνωστό ότι η ακρίβεια μιάς ανάλυσης εξαρτάται από το εύρος του καννάβου σε σχέση με το εύρος της περιοχής ενδιαφέροντος. Έτσι συγκρίνονται εδώ οι σεισμικές αποκρίσεις δύο γεωμετριών βελτίωσης, η πρώτη αποτελείται από ένα κάρναβο 100x10 τετραπλευρικών στοιχείων που αντιστοιχούν σε ποσοστό αντικατάστασης $a_r = 25\%$, λόγο δυσκαμψιών εδάφους-πασσάλου $K_o = G_{i,o}/G_{s,o} = 10$ και δεσπόζουσα περίοδο διέγερσης $T_e = 0,33$ sec, ενώ η δεύτερη αποτελείται από ένα διευρυμένο κάρναβο ως προς το πλάτος 200x10 τετραπλευρικών στοιχείων με τα ίδια χαρακτηριστικά όσον αφορά το ποσοστό αντικατάστασης $a_r(\%)$, το λόγο δυσκαμψιών K_o και τη δεσπόζουσα περίοδο T_e , ενώ έχουν και τις ίδιες συνοριακές συνθήκες, την ίδια απόσβεση Rayleigh και την ίδια μορφή διέγερσης στη βάση (βλέπε παρ. 3.2.1).

Πιο συγκεκριμένα στα παρακάτω Σχήματα 3.3 και 3.4 παρουσιάζονται οι κάνναβοι βελτίωσης των δύο υπό εξέταση περιπτώσεων όπως εμφανίζονται από το πρόγραμμα πεπερασμένων διαφορών FLAC.

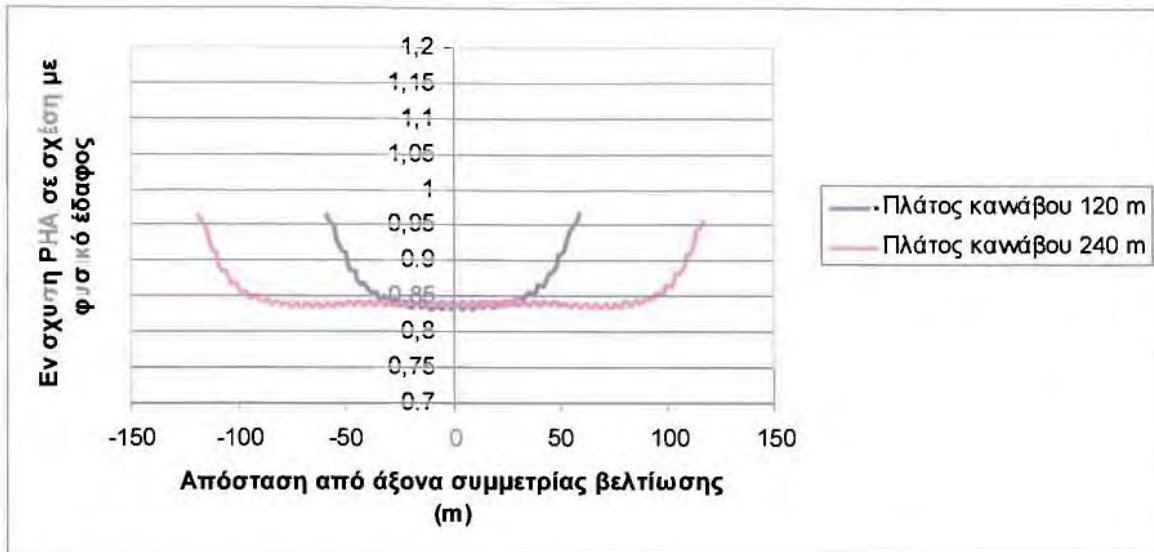


Σχήμα 3.3: Κάνναβος πεπερασμένων διαφορών για βάθος βελτίωσης $H=10$ m και πλάτους 120m, 2Δ ανάλυσης, με ισοκαμπύλες τιμών της δυσστησίας G των στοιχείων



Σχήμα 3.4: Κάνναβος πεπερασμένων διαφορών για βάθος βελτίωσης $H=10$ m και πλάτους 240m, 2Δ ανάλυσης, με ισοκαμπύλες τιμών της δυσστησίας G των στοιχείων

Στο παρακάτω διάγραμμα του Σχήματος 3.5 παρουσιάζονται τα συγκριτικά αποτελέσματα της 2Δ ανάλυσης για τις δύο περιπτώσεις σε όρους ενίσχυσης με δεδομένα δυναμικά χαρακτηριστικά για το έδαφος $G_{s,0} = 80\text{MPa}$ και μέτρο διάτμησης του πασσάλου ίσο με $G_{i,0} = 800\text{MPa}$ αφού $K_0 = G_{i,0}/G_{s,0} = 10$, όπου παρατηρούμε ότι οι δύο περιπτώσεις δίνουν ταυτόσημα αποτελέσματα και πιο συγκεκριμένα σε μια περιοχή +40 με -40 μέτρα από το κέντρο του καννάβου με αμελητέες διαφοροποιήσεις. Δεδομένου ότι το ενδιαφέρον μας εστιάζεται στην σεισμική απόκριση της ομοιόμορφης βελτίωσης, τα επιθυμητά αποτελέσματα προκύπτουν ίδια και από τις δύο αναλύσεις αν επικεντρωθούμε στην περιοχή +40 με -40 μέτρα από το κέντρο του καννάβου (δηλαδή μακριά από τα όρια) και συνεπώς δεν υπάρχει λόγος εκτέλεσης αναλύσεων με διευρυμένο κάνναβο. Αποτέλεσμα αυτού ήταν όλες οι αναλύσεις της παρούσης εργασίας να γίνουν με καννάβους πλάτους 120m χάριν μικρότερου υπολογιστικού φόρτου.



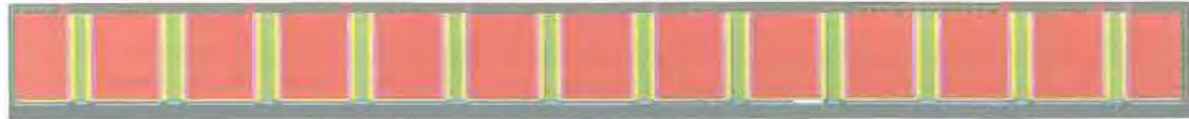
Σχήμα 3.5: Διάγραμμα για βάθος βελτίωσης $H=10\text{m}$ με πλάτος καννάβου 120m και 240m αντίστοιχα, 2Δ ανάλυση σε όρους ενισχύσεων

3.2.3 Επίδραση διακριτοποίησης καννάβου στην ακρίβεια της ανάλυσης

Έχει ήδη διαπιστωθεί ότι το ποσοστό αντικατάστασης $a_r(\%)$ και ο λόγος δυσκαμψιών K_o παίζουν κρίσιμο ρόλο στην σεισμική απόκριση του βελτιωμένου εδάφους. Στην παράγραφο αυτή διερευνάται πόσο σημαντική είναι η θεωρούμενη διακριτοποίηση του καννάβου και ειδικά του πλήθους των στοιχείων των πασσάλων στην ακρίβεια της ανάλυσης. Έτσι συγκρίνονται τα αποτελέσματα από δύο αναλύσεις από τις οποίες η πρώτη αποτελείται από 1 στοιχείο/πάσσαλο και η δεύτερη από 2 στοιχεία/πάσσαλο για ίδιο ποσοστό αντικατάστασης $a_r(\%)$. Και οι δύο κάνναβοι βελτίωσης αποτελούνται από 100×10 τετραπλευρικά στοιχεία, με ποσοστό αντικατάστασης $a_r = 25\%$, $G_{s,0} = 80\text{MPa}$ για το έδαφος, μέτρο διάτμησης του πασσάλου ίσο με $G_{i,0} = 800\text{MPa}$, αφού $K_o = G_{i,0}/G_{s,0} = 10$, και δεσπόζουσα περίοδο διέγερσης $T_e = 0,33\text{ sec}$ ενώ έχουν και τις ίδιες συνοριακές συνθήκες, την ίδια απόσβεση Rayleigh και την ίδια μορφή διέγερσης στη βάση (βλέπε παρ. 3.2.1). Στα επόμενα Σχήματα 3.6 και 3.7 παρουσιάζονται οι κάνναβοι βελτίωσης των δύο υπό εξέταση περιπτώσεων, όπως εμφανίζονται από το πρόγραμμα πεπερασμένων διαφορών FLAC.

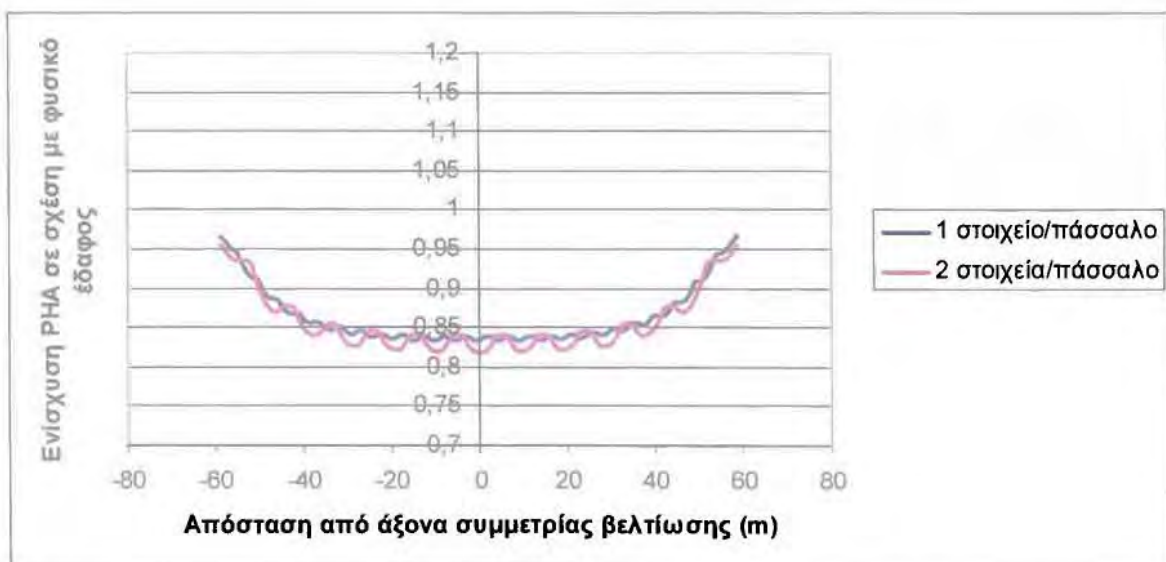


Σχήμα 3.6: Κάνναβος πεπερασμένων διαφορών για βάθος βελτίωσης $H=10\text{m}$ και πλάτους 120m με 1 στοιχείο/πάσσαλο 2Δ ανάλυσης, με ισοκαμπύλες τιμών της δυστημσίας G των στοιχείων



Σχήμα 3.7: Κάνναβος πεπερασμένων διαφορών για βάθος βελτίωσης $H=10\text{m}$ και πλάτους 120 m με 2 στοιχεία/πάσσαλο 2Δ ανάλυσης, με ισοκαμπύλες τιμών της δυστημσίας G των στοιχείων

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα συγκριτικά αποτελέσματα της 2Δ ανάλυσης για τις δύο περιπτώσεις σε όρους ενίσχυσης με δεδομένα δυναμικά χαρακτηριστικά για το έδαφος $G_{s,o}=80\text{MPa}$ και μέτρο διάτμησης του πασσάλου ίσο με $G_{i,o}=800\text{MPa}$, όπου παρατηρούμε ότι οι δύο περιπτώσεις δίνουν ταυτόσημα αποτελέσματα πρακτικώς σε όλο το πλάτος του καννάβου. Δεδομένου ότι η ανάλυση με 1 στοιχείο/πάσσαλο παρουσιάζει μικρότερη σχετικά διακύμανση, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.8 και το πλάτος του πασσάλου σε αυτή είναι 1m , δηλαδή πιο ρεαλιστική τιμή σε σχέση με την ανάλυση για 2 στοιχεία/πάσσαλο που ήταν 2m , σε όλες τις αναλύσεις της παρούσης εργασίας οι πάσσαλοι προσομοιώνονται με 1 στοιχείο/πάσσαλο χωρίς αυτό να είναι εις βάρος της ακρίβειας της ανάλυσης.



Σχήμα 3.8: Διάγραμμα για βάθος βελτίωσης $H=10\text{m}$, πλάτους 120m με 1 στοιχείο/πάσσαλο και 2 στοιχεία/πάσσαλο αντίστοιχα, 2Δ ανάλυσης σε όρους ενισχύσεων

3.2.4 Διαδικασία αναλύσεων και επεξεργασίας αποτελεσμάτων

Στη συγκεκριμένη ενότητα παρουσιάζεται η πορεία εργασίας μίας περίπτωσης από τις 58 συνολικά περιπτώσεις (φυσικού και βελτιωμένου εδάφους) που διερευνήθηκαν στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής. Η διαδικασία αυτή περιλαμβάνει: α) την (πρακτικώς 1Δ) ανάλυση για το φυσικό έδαφος, β) τη 2Δ ανάλυση για το σύνθετο βελτιωμένο έδαφος και γ) την (πρακτικώς 1Δ) ανάλυση για το ισοδύναμο ομοιόμορφο ομοιογενές έδαφος, η οποία επαναλαμβάνεται έως ότου δώσει τιμή ενίσχυσης (της μέγιστης σεισμικής επιτάχυνσης) στην επιφάνεια του εδάφους ίση με τη "μέση" ενίσχυση του βελτιωμένου εδάφους (μακριά από τα όρια του καννάβου, και πρακτικώς σε απόσταση $\pm 40\text{m}$ από το κέντρο του καννάβου). Υπενθυμίζεται ότι όλες αναλύσεις της παρούσας εργασίας έχουν γίνει με το πρόγραμμα πεπερασμένων διαφορών FLAC5. Όσον αφορά τις συνθήκες ελευθέρου πεδίου, καθώς και τις συνθήκες με τις οποίες επιβάλλεται η σεισμική διέγερση (με ένα παλμό Ricker), ο αναγνώστης παραπέμπεται στο προηγούμενο κεφάλαιο που αφορά τη γενική περιγραφή της μεθοδολογίας.

Πιο συγκεκριμένα, αρχικώς γίνεται η ανάλυση για το φυσικό έδαφος (χωρίς βελτίωση) πάχους $H=10\text{m}$, μέτρου διάτμησης $G_{s,o}=80\text{MPa}$ (που αντιστοιχεί σε ταχύτητα διατμητικών κυμάτων $V_{s,soil}=200\text{m/s}$), το οποίο υπέρκειται βραχώδους υποβάθρου μέτρου διάτμησης $G_{s,o}=2000\text{MPa}$ (που αντιστοιχεί σε ταχύτητα διατμητικών κυμάτων $V_{s,rock}=1000\text{m/s}$) και στο οποίο επιβάλλεται η εν λόγω χρονοϊστορία με δεσπόζουσα ιδιοπερίοδο $T_e=0,33\text{ sec}$ (στο παράδειγμά μας). Ο κάρναβος ανάλυσης για το φυσικό έδαφος φαίνεται στο Σχήμα 3.9



Σχήμα 3.9: Κάρναβος πεπερασμένων διαφορών φυσικού εδάφους για βάθος βελτίωσης $H=10\text{m}$ και πλάτους 120 m (πρακτικώς 1Δ ανάλυση), με ισοκαμπύλες τιμών της δυσστησίας G των στοιχείων

Στη συνέχεια, πραγματοποιείται η 2Δ ανάλυση σεισμικής απόκρισης για το βελτιωμένο έδαφος. Στο Σχήμα 3.10 παρουσιάζεται μια 2Δ γεωμετρία βελτίωσης με φυσικό έδαφος πάχους $H=10\text{m}$ με μέγιστο μέτρο διάτμησης $G_{s,o}=80\text{MPa}$, το οποίο βελτιώνεται με γεωϊλικό (π.χ. χαλικοπασσάλους) που έχει μέγιστο μέτρο διάτμησης $G_{i,o}=800\text{MPa}$, δηλαδή $K_o=10$, ποσοστό αντικατάστασης $a_r=50\%$ και υποβάλλεται

στην ίδια χρονοϊστορία διέγερσης με δεσπόζουσα περίοδο διέγερσης $T_e=0,33$ sec, χάριν σύγκρισης με την προηγούμενη ανάλυση και τη συνακόλουθη εκτίμηση της διαφοροποίησης της σεισμικής απόκρισης του βελτιωμένου εδάφους λόγω της βελτίωσης και μόνον.



Σχήμα 3.10: Κάνναβος πεπερασμένων διαφορών για βάθος βελτίωσης $H=10$ m και πλάτους 120 m με 1 στοιχείο/πάσσαλο 2Δ ανάλυσης, με ισοκαμπύλες τιμών της δυσστησίας G των στοιχείων

Δεδομένου ότι η ανάλυση ενός βελτιωμένου εδάφους οδηγεί σε πρακτικώς ομοιόμορφη απόκριση στην επιφάνειά του (βλέπε Κεφάλαιο 4), στη συνέχεια στο Κεφάλαιο 5 διερευνήθηκαν οι δυναμικές παράμετροι ενός ισοδύναμα-ομοιογενούς βελτιωμένου εδάφους, οι οποίες θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για πρακτικώς 1Δ ανάλυση και να δώσουν ακριβώς την ίδια απόκριση στην επιφάνεια του εδάφους. Για το σκοπό αυτό, για κάθε ζεύγος αναλύσεων φυσικού (πρακτικώς 1Δ) και βελτιωμένου εδάφους (2Δ) έγινε και μια σειρά (πρακτικώς 1Δ) αναλύσεων με διαφορετικές, κάθε φορά, τιμές της δυσστησίας $G_{s,0}$ του εδάφους, με στόχο την εύρεση του G_{eq} δηλαδή της τιμής της $G_{s,0}$ που οδηγεί σε πρακτικώς ίδια απόκριση στην επιφάνεια με εκείνη του βελτιωμένου εδάφους. Στο Σχήμα 3.11 δίνεται ο κάνναβος της ανάλυσης για μία ενδεικτική τιμή του ισοδύναμου ομοιόμορφου ομοιογενούς εδάφους, ο οποίος είναι όμοιος με εκείνον του Σχ. 3.9 για την ανάλυση του φυσικού εδάφους, αλλά με διαφορετική τιμή του $G_{s,0}$.



Σχήμα 3.11: Κάνναβος πεπερασμένων διαφορών ισοδύναμου-ομοιόμορφου εδάφους για βάθος βελτίωσης $H=10$ m και πλάτους 120m, (πρακτικώς 1Δ ανάλυση), με ισοκαμπύλες τιμών της δυσστησίας G των στοιχείων (για μία ενδεικτική τιμή $G_{s,0}$)

Κεφάλαιο 4

ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΒΕΛΤΙΩΜΕΝΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ

4.1 Γενικά

Σε αυτή την παράγραφο περιγράφεται αναλυτικά η διαδικασία και τα αποτελέσματα μιας τυπικής ανάλυσης σεισμικής απόκρισης βελτιωμένου εδάφους. Ως απόκριση αναφοράς θεωρείται η ανάλυση για το φυσικό έδαφος (χωρίς βελτίωση) πάχους $H=10\text{m}$ και μέτρου διάτμησης $G_{s,0}=80\text{Mpa}$ στο οποίο επιβάλλεται η τυπική σεισμική διέγερση με δεσπόζουσα ιδοπερίοδο $T_e=0.17\text{ sec}$ (βλέπε Κεφ.3). Ο κάρναβος παρατίθενται στο Σχήμα 4.1 και σημειώνεται ότι σε βάθος $H=10\text{m}$ υπάρχει μια σειρά στοιχείων με τα χαρακτηριστικά του σεισμικού υποβάθρου.



Σχήμα 4.1: Κάρναβος πεπερασμένων διαφορών φυσικού εδάφους με πάχος $H=10\text{m}$ και πλάτους 120m , 1Δ ανάλυσης (στοιχεία 120×11)

Ως πρώτος στόχος των αναλύσεων που ακολουθούν είναι να διακριβωθεί αν η απόκριση στην επιφάνεια του βελτιωμένου (σύνθετου) εδάφους επιδεικνύει αμελητέα διαφοροποίηση από σημείο σε σημείο. Αν αυτό συμβαίνει, τότε δίνεται η δυνατότητα όπως η «μέση» απόκριση της επιφάνειας του βελτιωμένου (σύνθετου) εδάφους να αποδίδεται ως η απόκριση ενός ισοδύναμα-ομοιόμορφου εδάφους που θα εκτιμάται από 1Δ αναλύσεις. Για να δοθεί απάντηση στο ανωτέρω ερώτημα, στο Σχήμα 4.2

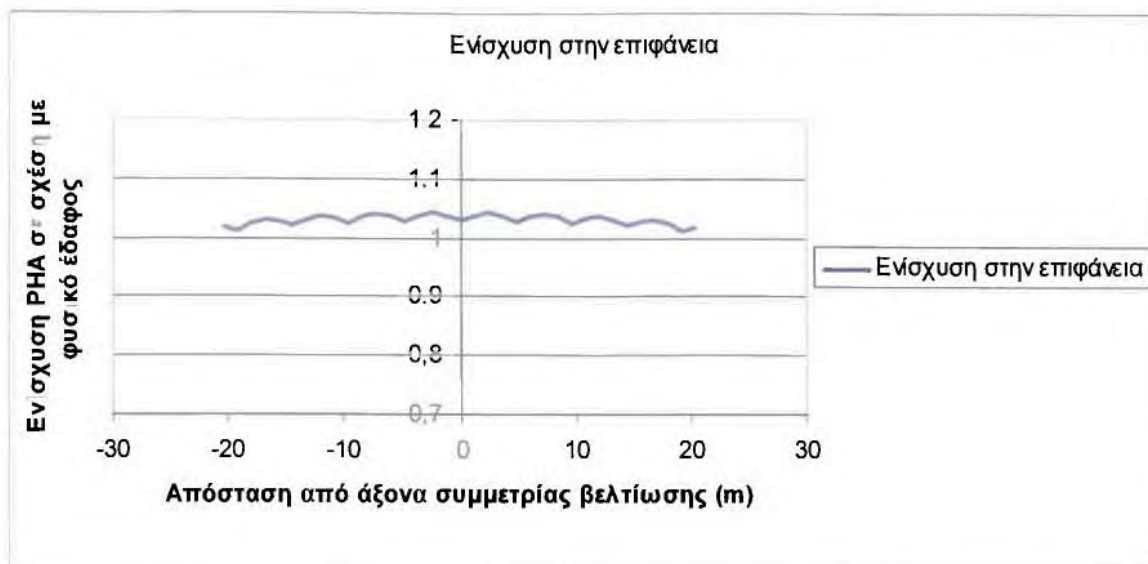
επιλέχθηκε και παρουσιάζεται μια 2Δ γεωμετρία βελτίωσης με φυσικό έδαφος πάχους $H=10\text{m}$ να έχει μέγιστο μέτρο διάτμησης $G_{s,o}=80\text{Mpa}$ (όπως του Σχήματος 4.1) το οποίο βελτιώνεται με γεωϋλικό (π.χ. χαλικοπασσάλους) που έχει μέγιστο μέτρο διάτμησης $G_{i,o} = 240\text{Mpa}$, (δηλαδή $K_o=3$), ποσοστό αντικατάστασης $a_r = 50\%$ και δεσπόζουσα περίοδο διέγερσης $T_e = 0.17 \text{ sec}$ (ίδια με του Σχήματος 4.1, χάριν σύγκρισης).

Όπως γίνεται αντιληπτό, πρόκειται για μια γεωμετρία βελτίωσης όπου επάλληλες σειρές βελτίωσης (π.χ. χαλικοπασσάλων) έχουν προσομοιωθεί για τις ανάγκες μιας 2Δ ανάλυσης επίπεδης παραμόρφωσης με επάλληλες σειρές διαφραγματικών τοίχων βελτίωσης (π.χ. χαλικο-πασσαλο-διάφραγματα). Στη σύνθετα βελτιωμένη αυτή εδαφική στρώση επιβάλλεται σεισμική διέγερση στη βάση του καννάβου, η οποία επιβάλλει κατακόρυφα διαδιδόμενα κύματα SV, όπως και στο φυσικό έδαφος.



Σχήμα 4.2: Κάνναβος πεπερασμένων διαφορών για βάθος βελτίωσης $H_{imp}=H=10 \text{ m}$ και πλάτους 120m με 1 στοιχείο/πάσσαλο 2Δ ανάλυσης (στοιχεία 120x11)

Στο Σχήμα 4.3 παρουσιάζεται η ενίσχυση της μέγιστης σεισμικής επιτάχυνσης σε σχέση με το φυσικό έδαφος και όπως προκύπτει από το εν λόγω Σχήμα, στα διάφορα σημεία της εδαφικής επιφάνειας οι επιταχύνσεις έχουν πολύ μικρή διαφοροποίηση σε όρους ενισχύσης της μέγιστης σεισμικής επιτάχυνσης με έμφαση στο κέντρο της βελτιωμένης περιοχής και σε έκταση -20 με $+ 20$ μέτρα από αυτό. Συνεπώς, η σεισμική απόκριση στην επιφάνεια μπορεί να θεωρηθεί ως πρακτικώς ομοιόμορφη, και ως τέτοια μπορεί να εκτιμηθεί ως αποτέλεσμα μιας 1Δ ανάλυσης σεισμικής απόκρισης ενός ισοδύναμα-ομοιόμορφου βελτιωμένου εδάφους ίδιου πάχους $H_{imp}=H=10\text{m}$, με κατάλληλα δυναμικά χαρακτηριστικά και καταργώντας την ανάγκη για 2Δ αναλύσεις.



Σχήμα 4.3: Ενίσχυση μέγιστης σεισμικής επιτάχυνσης σε σχέση με το φυσικό έδαφος για ποσοστό αντικατάστασης $a_r = 50\%$, λόγω δυστησιών $K_o = 3$ και δεσπόζουσας περιόδου $T_c = 0.17$ sec

Το ερώτημα που απομένει είναι να βρεθούν οι δυναμικές παράμετροι του ισοδύναμομοιόμορφου βελτιωμένου εδάφους και η απάντηση στο ερώτημα αυτό δίνεται στο επόμενο κεφάλαιο. Στον Πίνακα 4.1 που ακολουθεί παρουσιάζεται το πλήθος των 2Δ αναλύσεων σεισμικής απόκρισης βελτιωμένων εδαφών που εκτελέστηκαν κατά την διάρκεια εκπόνησης αυτής της εργασίας και στις παραγράφους που ακολουθούν παρουσιάζονται λεπτομερώς οι επιδράσεις των παραμέτρων του προβλήματος που διερευνήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας εργασίας.

α/α	$a_r(\%)$	K_o	T_e (sec)	H_{imp} (m)	H_{soil} (m)
1	12,5%	3	0,68	10	10
2	12,5%	3	0,33	10	10
3	12,5%	3	0,17	10	10
4	12,5%	3	0,06	10	10
5	12,5%	10	0,68	10	10
6	12,5%	10	0,33	10	10
7	12,5%	10	0,17	10	10
8	12,5%	10	0,06	10	10
9	12,5%	20	0,68	10	10
10	12,5%	20	0,33	10	10
11	12,5%	20	0,17	10	10
12	12,5%	20	0,06	10	10
13	12,5%	30	0,33	10	10
14	25%	3	0,68	10	10
15	25%	3	0,33	10	10
16	25%	3	0,17	10	10
17	25%	3	0,06	10	10
18	25%	10	0,68	10	10
19	25%	10	0,33	10	10
20	25%	10	0,17	10	10
21	25%	10	0,06	10	10
22	25%	20	0,68	10	10
23	25%	20	0,33	10	10
24	25%	20	0,17	10	10
25	25%	20	0,06	10	10
26	25%	30	0,33	10	10
27	50%	3	0,68	10	10
28	50%	3	0,33	10	10
29	50%	3	0,17	10	10
30	50%	10	0,68	10	10
31	50%	10	0,33	10	10
32	50%	10	0,17	10	10
33	50%	20	0,68	10	10
34	50%	20	0,33	10	10
35	50%	20	0,17	10	10
36	50%	30	0,33	10	10
37	75%	3	0,68	10	10
38	75%	3	0,33	10	10
39	75%	3	0,17	10	10
40	75%	10	0,68	10	10
41	75%	10	0,33	10	10
42	75%	10	0,17	10	10
43	75%	20	0,68	10	10
44	75%	20	0,33	10	10
45	75%	20	0,17	10	10
46	75%	30	0,33	10	10
47	25%	3	0,68	10	20
48	25%	3	0,33	10	20
49	25%	3	0,17	10	20
50	25%	3	0,06	10	20
51	25%	10	0,68	10	20
52	25%	10	0,33	10	20
53	25%	10	0,17	10	20
54	25%	10	0,06	10	20
55	25%	20	0,68	10	20
56	25%	20	0,33	10	20
57	25%	20	0,17	10	20
58	25%	20	0,06	10	20

Πίνακας 4.1: Συγκεντρωτικός πίνακας περιπτώσεων και δεδομένων

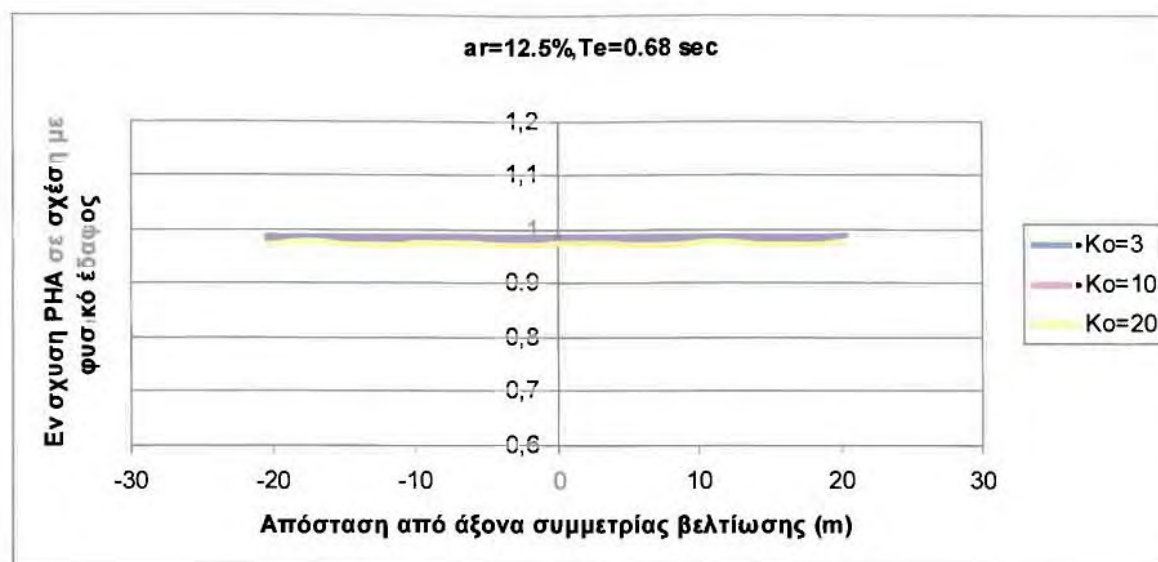
4.2 Επίδραση σχετικής δυσκαμψίας χαλικοπασσάλων

Όπως παρουσιάζεται στην παράγραφο 4.1, έγιναν συνολικά 58 αναλύσεις σεισμικής απόκρισης βελτιωμένου εδάφους, για διαφορετικά ποσοστό αντικατάστασης $a_r(\%)$ του φυσικού εδάφους με χαλικοπασσάλους, διαφορετικό λόγο δυστημσιών $K_o = G_{i,0}/G_{s,0}$, όπου $G_{i,0}$ το μέτρο διάτμησης της βελτίωσης και $G_{s,0}$ το μέτρο διάτμησης του εδάφους, διαφορετική δεσπόζουσα περίοδο T_e (sec) και διαφορετικό βάθος βελτίωσης (βλέπε Πίνακα 4.1). Στις παραγράφους που ακολουθούν παρουσιάζονται συγκριτικά διαγράμματα επίδρασης των εν λόγω παραμέτρων στην ενίσχυση της μέγιστης σεισμικής επιτάχυνσης λόγω βελτίωσης, δηλαδή σε σχέση με την απόκριση του φυσικού εδάφους.

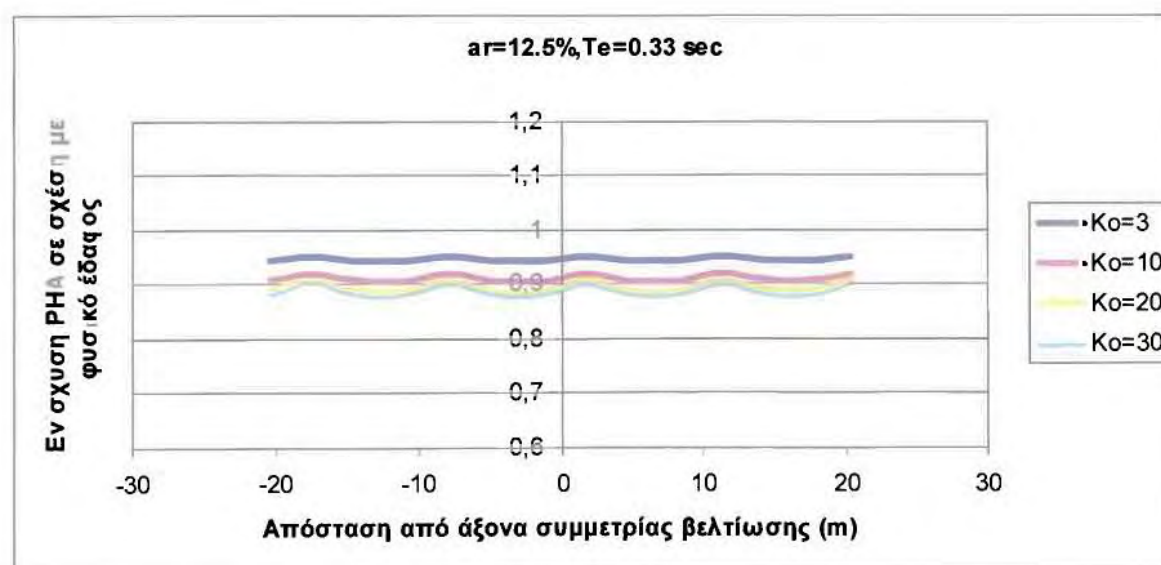
Στη συγκεκριμένη παράγραφο παρουσιάζονται τα διαγράμματα επίδρασης του λόγου δυστημσιών $K_o = 3, 10, 20$ και 30 στην ενίσχυση λόγω βελτίωσης της μέγιστης σεισμικής επιτάχυνσης στην επιφάνεια του εδάφους. Πιο συγκεκριμένα, στα Σχήματα 4.4 έως 4.17 δίνονται τα διαγράμματα για βελτίωση εδαφικής στρώσης μέχρι το υπόβαθρο ($H_{imp}=H=10m$), και στα Σχήματα 4.18 έως 4.21 για βελτίωση εδαφικής στρώσης $H_{imp}=10m$ σε έδαφος βάθους $H=20m$. Από εκεί και πέρα, η παρουσίαση των Σχημάτων γίνεται με βάση το ποσοστό αντικατάστασης $a_r(\%)$, δηλαδή στα Σχήματα 4.4 έως 4.7 για $a_r=12.5\%$, στα Σχήματα 4.8 έως 4.11 για $a_r=25\%$, στα Σχήματα 4.12 έως 4.15 για $a_r=50\%$ και στα Σχήματα 4.16 έως 4.17 για $a_r=75\%$, ενώ τα Σχήματα 4.18 έως 4.21, που αφορούν βελτίωση με $H_{imp}=10m$ σε στρώση με $H=20m$, για ποσοστό αντικατάστασης $a_r=25\%$. Συνοπτικά, από τις συγκρίσεις των σχημάτων αυτών προκύπτουν τα παρακάτω αποτελέσματα:

- Για διεγέρσεις με χαμηλόσυχνες δεσπόζουσες περιόδους $T_e=0.68$ και $0.33sec$ ανεξαρτήτως του ποσοστού αντικατάστασης $a_r(\%)$, όπου $a_r=12.5\%, 25\%, 50\%, 75\%$, η βελτίωση απομειώνει τη σεισμική κίνηση στην επιφάνεια του βελτιωμένου εδάφους σε σχέση με εκείνη στο φυσικό έδαφος. Πιο συγκεκριμένα, όσο αυξάνει ο λόγος δυστημσιίας K_o του βελτιωμένου εδάφους τόσο εντονότερη γίνεται η απομείωση της σεισμικής κίνησης (Σχήματα 4.4, 4.5, 4.8, 4.9, 4.12, 4.13, 4.15, 4.16, 4.18 και 4.19).

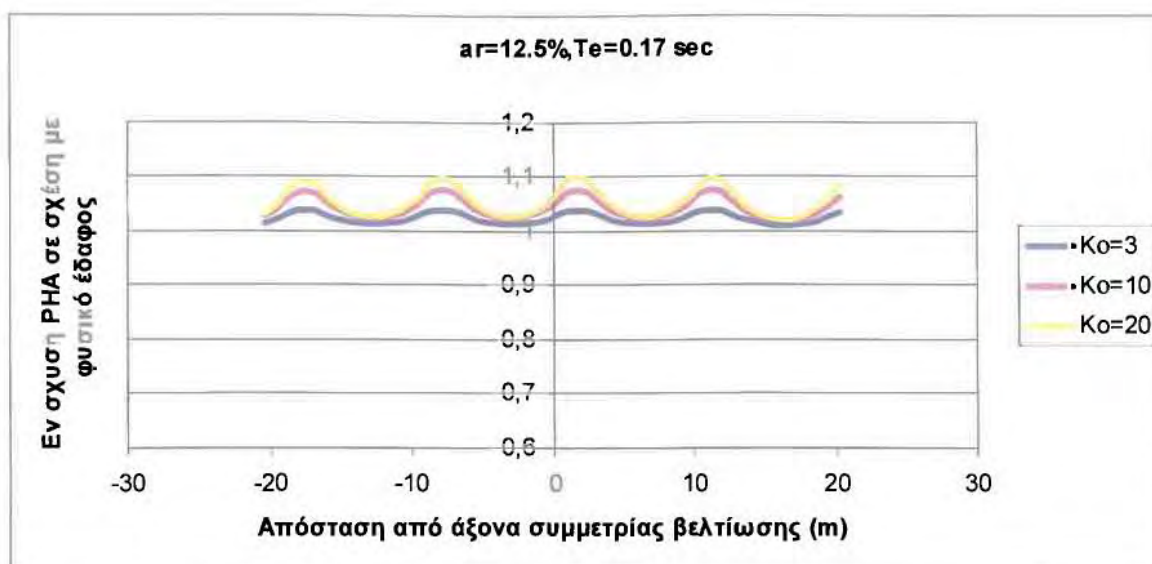
- Στην έντονα υψίσυχη διέγερση για δεσπόζουσα περίοδο $T_e=0.06$ sec και για ποσοστά αντικατάστασης $a_r=12.5\%$ και 25% το βελτιωμένο έδαφος δίνει ενίσχυση της σεισμικής κίνησης σε σχέση με εκείνη στο φυσικό, η οποία γίνεται λιγότερο έντονη, όσο μικραίνει ο λόγος δυσστησιών K_o (Σχήματα 4.7, 4.11, και 4.21).
- Για την περίπτωση της υψίσυχης διέγερσης με δεσπόζουσα περίοδο $T_e=0.17$ sec, η οποία είναι πολύ κοντινή στην ιδιοπερίοδο του φυσικού εδάφους $T_{soil}=0.2$ sec, η ενίσχυση ή η απομείωση της σεισμικής κίνησης δεν είναι τόσο ξεκάθαρη όπως στις άλλες περιπτώσεις. Έτσι, για βελτίωση με ποσοστό αντικατάστασης $a_r=12.5\%$ και 25% παρατηρείται ενίσχυση της κίνησης, η οποία γίνεται λιγότερο έντονη, όσο μειώνεται ο λόγος δυσστησίας K_o (Σχήματα 4.6 και 4.10). Αντιθέτως, με την αύξηση του ποσοστού αντικατάστασης $a_r=50\%$ και 75% για την ίδια δεσπόζουσα περίοδο $T_e=0.17$ sec βλέπουμε διαφορετική συμπεριφορά στην επίδραση της σχετικής δυσστησίας όπου πλέον δεν παρατηρείται ενίσχυση, αλλά απομείωση που γίνεται πιο έντονη όσο αυξάνει το K_o (Σχήματα 4.14, 4.17, και 4.20).
- Άξιο προσοχής είναι το γεγονός ότι δύο περιπτώσεις με ίδιο K_o , ίδιο a_r και ίδιο T_e , η μία για βάθος βελτίωσης $H_{imp}=H=10$ m μέχρι το υπόβαθρο και η άλλη για βάθος βελτίωσης $H_{imp}=10$ m σε εδαφική στρώση με βάθος $H=20$ m μέχρι το υπόβαθρο (Σχήματα 4.10 και 4.20) διαφοροποιούνται στο ότι η πρώτη δίνει ενίσχυση της εδαφικής κίνησης, ενώ η δεύτερη αντιθέτως δίνει απομείωση. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι στις περιπτώσεις του Σχήματος 4.10, η εδαφική στρώση έχει $T_{soil}=0.2$ sec που απομειώνεται αρκετά λόγω της βελτίωσης πλησιάζοντας σε συνθήκες συντονισμού, ενώ στις περιπτώσεις του Σχήματος 4.20 η εδαφική στρώση έχει $T_{soil}=0.4$ sec η οποία δεν απομειώνεται ιδιαίτερα, καθώς η βελτίωση δεν φθάνει μέχρι το υπόβαθρο.



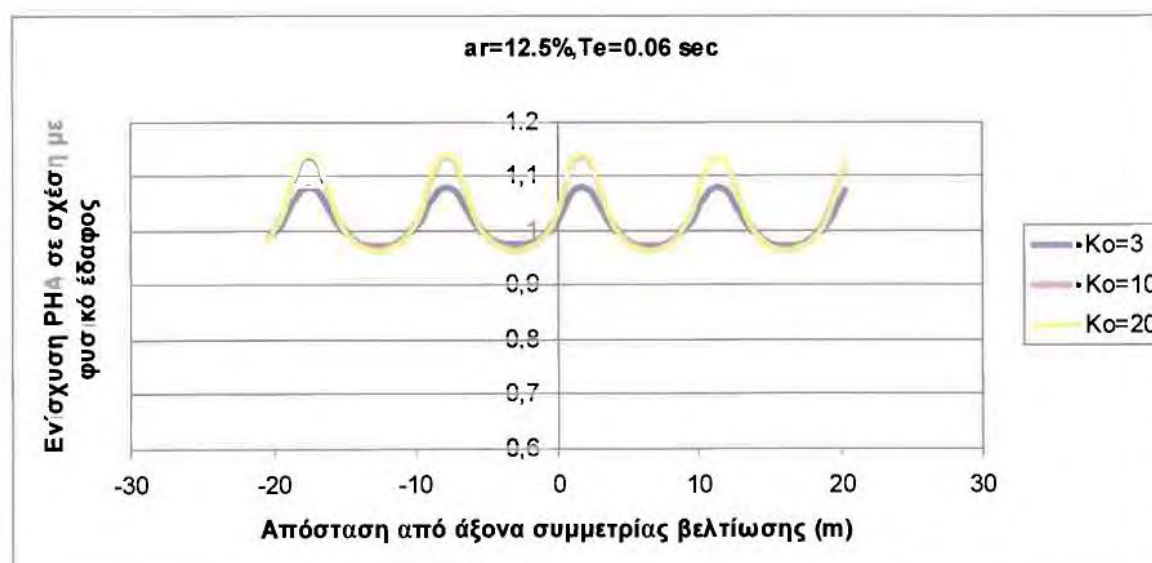
Σχήμα 4.4: Επίδραση λόγου δυσμησιών K_0 στην ενίσχυση λόγω βελτίωσης της μέγιστης σεισμικής επιτάχυνσης στην επιφάνεια του εδάφους, για βελτίωση εδαφικής στρώσης μέχρι το υπόβαθρο ($H_{imp}=H=10m$) με ποσοστό αντικατάστασης $a_r=12.5\%$ υπό σεισμική διέγερση δεσπόζουσας περιόδου $T_e=0.68sec$.



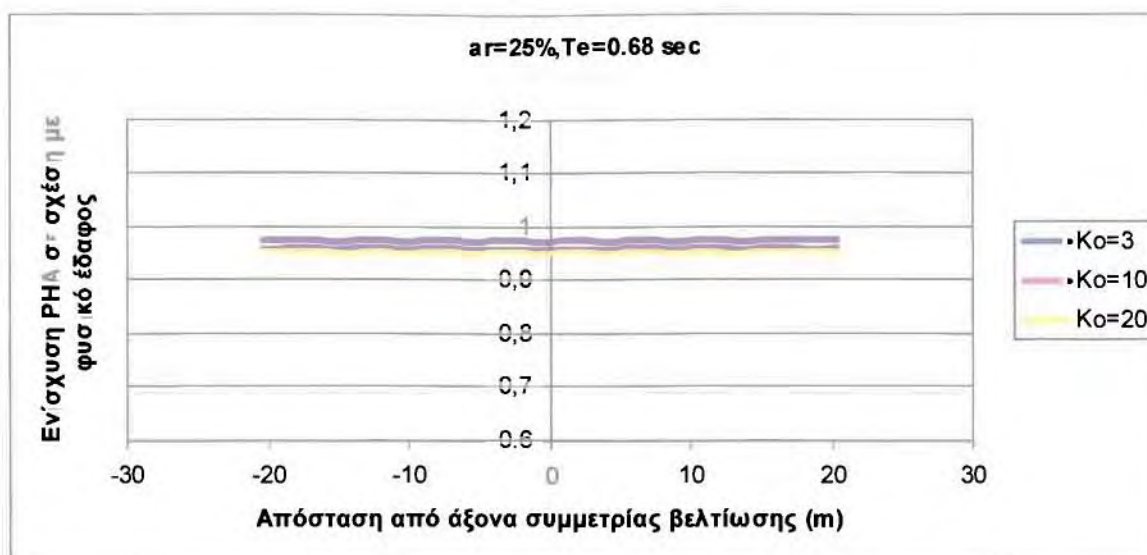
Σχήμα 4.5: Επίδραση λόγου δυσμησιών K_0 στην ενίσχυση λόγω βελτίωσης της μέγιστης σεισμικής επιτάχυνσης στην επιφάνεια του εδάφους, για βελτίωση εδαφικής στρώσης μέχρι το υπόβαθρο ($H_{imp}=H=10m$) με ποσοστό αντικατάστασης $a_r=12.5\%$ υπό σεισμική διέγερση δεσπόζουσας περιόδου $T_e=0.33sec$.



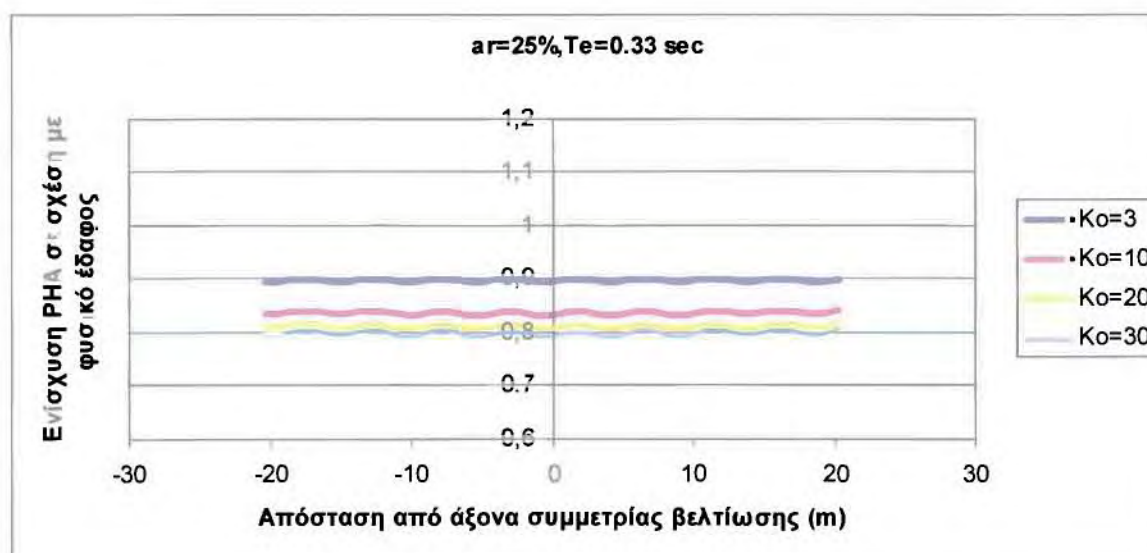
Σχήμα 4.6: Επίδραση λόγου δυστησιών K_0 στην ενίσχυση λόγω βελτίωσης της μέγιστης σεισμικής επιτάχυνσης στην επιφάνεια του εδάφους, για βελτίωση εδαφικής στρώσης μέχρι το υπόβαθρο ($H_{imp}=H=10m$) με ποσοστό αντικατάστασης $a_r=12.5\%$ υπό σεισμική διέγερση δεσπόζουσας περιόδου $T_e=0.17sec$.



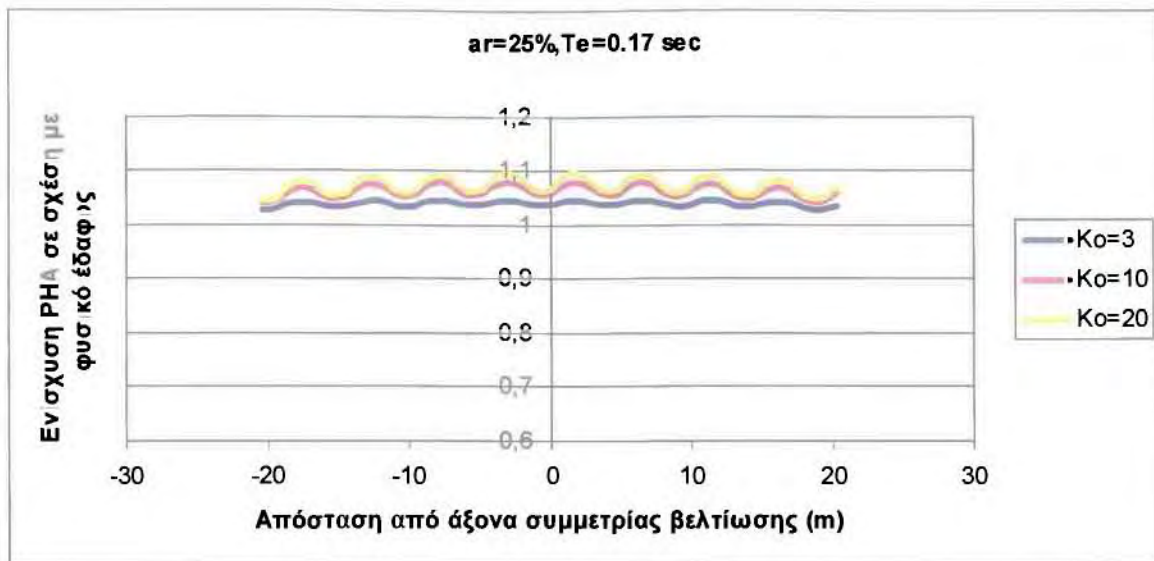
Σχήμα 4.7: Επίδραση λόγου δυστησιών K_0 στην ενίσχυση λόγω βελτίωσης της μέγιστης σεισμικής επιτάχυνσης στην επιφάνεια του εδάφους, για βελτίωση εδαφικής στρώσης μέχρι το υπόβαθρο ($H_{imp}=H=10m$) με ποσοστό αντικατάστασης $a_r=12.5\%$ υπό σεισμική διέγερση δεσπόζουσας περιόδου $T_e=0.06sec$.



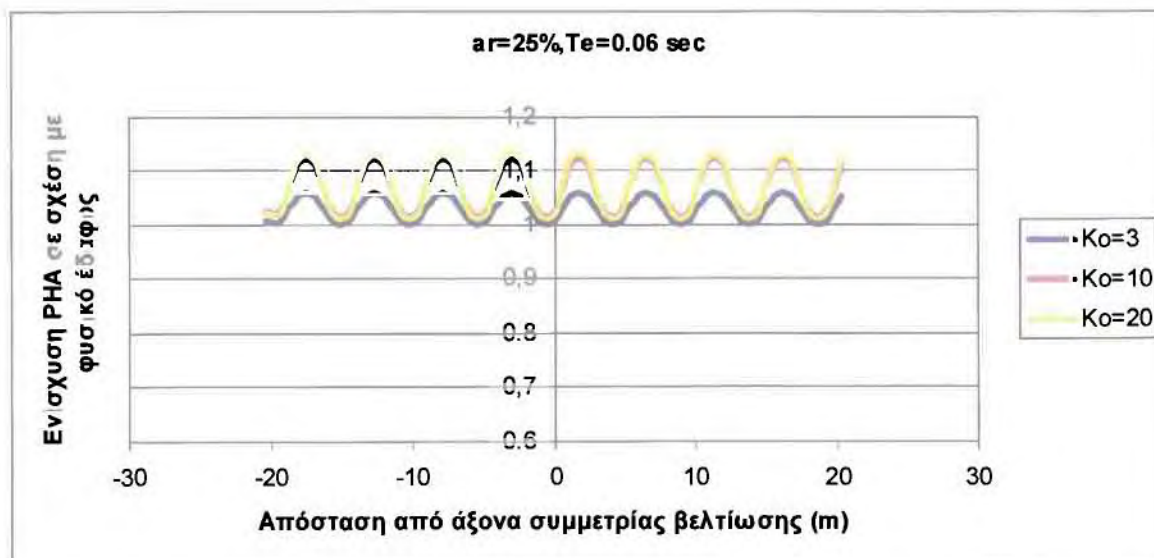
Σχήμα 4.8: Επίδραση λόγου δυστημοσιών K_o στην ενίσχυση λόγω βελτίωσης της μέγιστης σεισμικής επιτάχυνσης στην επιφάνεια του εδάφους, για βελτίωση εδαφικής στρώσης μέχρι το υπόβαθρο ($H_{imp}=H=10m$) με ποσοστό αντικατάστασης $a_r=25\%$ υπό σεισμική διέγερση δεσπόζουσας περιόδου $T_e=0.68sec$.



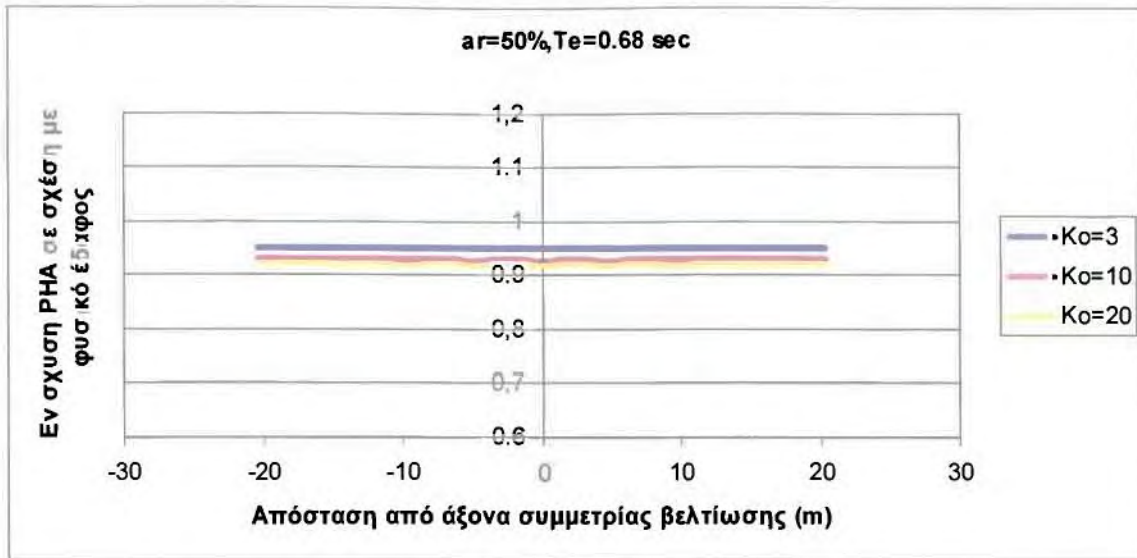
Σχήμα 4.9: Επίδραση λόγου δυστημοσιών K_o στην ενίσχυση λόγω βελτίωσης της μέγιστης σεισμικής επιτάχυνσης στην επιφάνεια του εδάφους, για βελτίωση εδαφικής στρώσης μέχρι το υπόβαθρο ($H_{imp}=H=10m$) με ποσοστό αντικατάστασης $a_r=25\%$ υπό σεισμική διέγερση δεσπόζουσας περιόδου $T_e=0.33sec$.



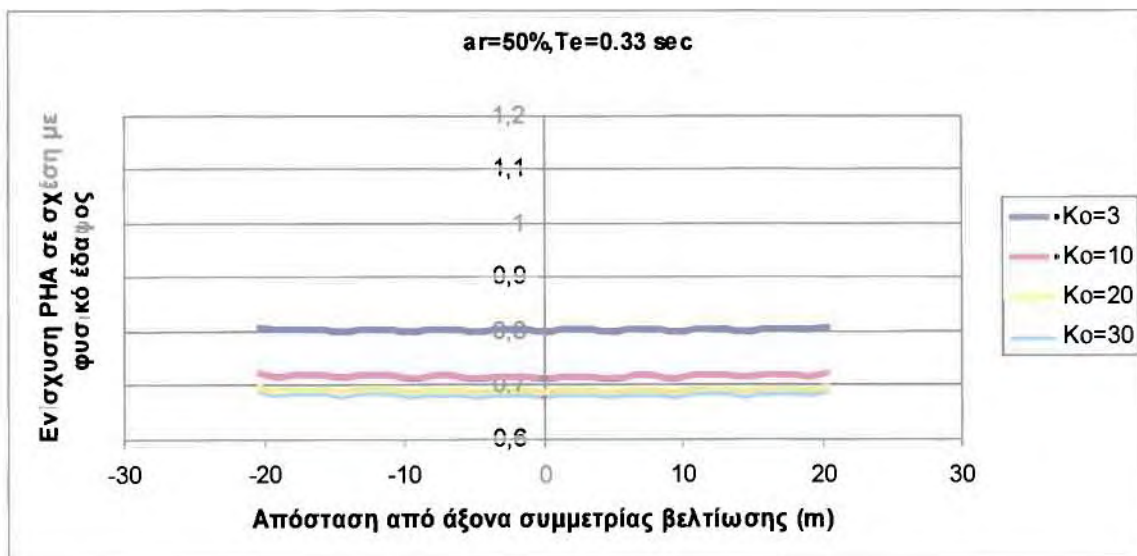
Σχήμα 4.10: Επίδραση λόγου δυστησιών K_o στην ενίσχυση λόγω βελτίωσης της μέγιστης σεισμικής επιτάχυνσης στην επιφάνεια του εδάφους, για βελτίωση εδαφικής στρώσης μέχρι το υπόβαθρο ($H_{imp}=H=10m$) με ποσοστό αντικατάστασης $a_r=25\%$ υπό σεισμική διέγερση δεσπόζουσας περιόδου $T_e=0.17sec$.



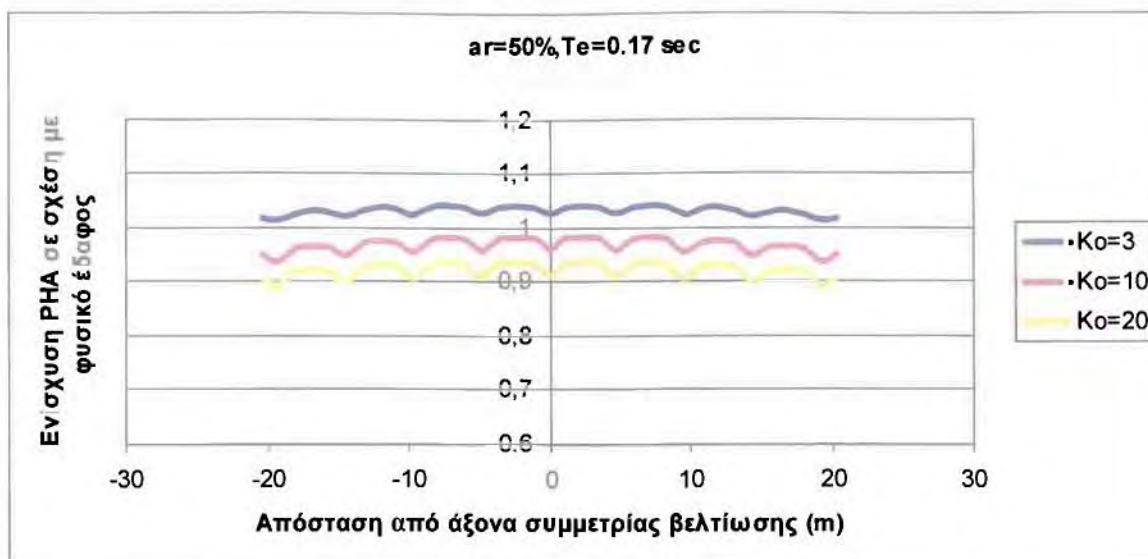
Σχήμα 4.11: Επίδραση λόγου δυστησιών K_o στην ενίσχυση λόγω βελτίωσης της μέγιστης σεισμικής επιτάχυνσης στην επιφάνεια του εδάφους, για βελτίωση εδαφικής στρώσης μέχρι το υπόβαθρο ($H_{imp}=H=10m$) με ποσοστό αντικατάστασης $a_r=25\%$ υπό σεισμική διέγερση δεσπόζουσας περιόδου $T_e=0.06sec$.



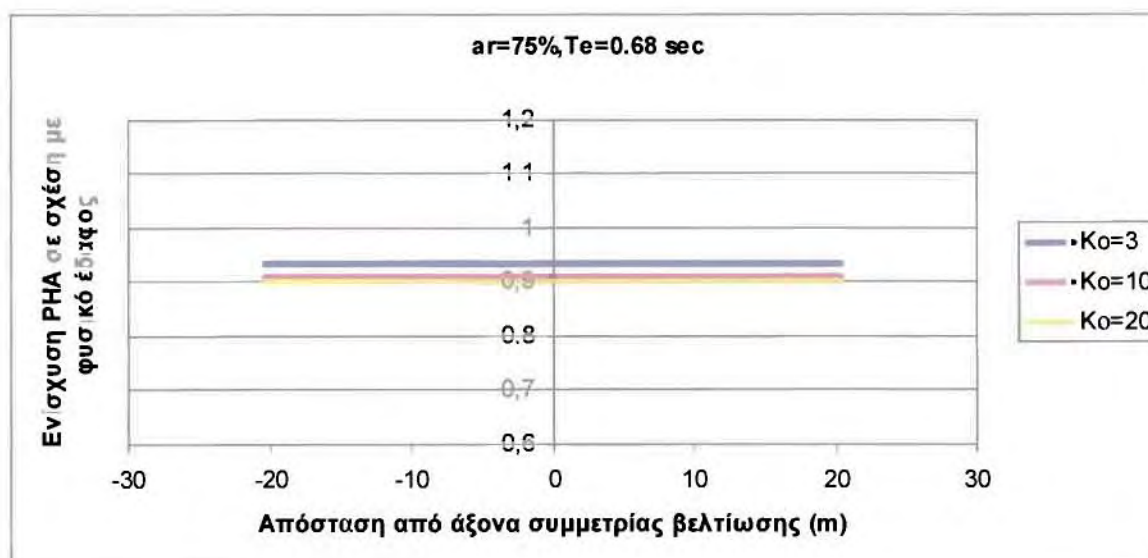
Σχήμα 4.12:Επίδραση λόγου δυστησιών K_0 στην ενίσχυση λόγω βελτίωσης της μέγιστης σεισμικής επιτάχυνσης στην επιφάνεια του εδάφους, για βελτίωση εδαφικής στρώσης μέχρι το υπόβαθρο ($H_{imp}=H=10m$) με ποσοστό αντικατάστασης $a_r=50\%$ υπό σεισμική διέγερση δεσπόζουσας περιόδου $T_e=0.68sec$.



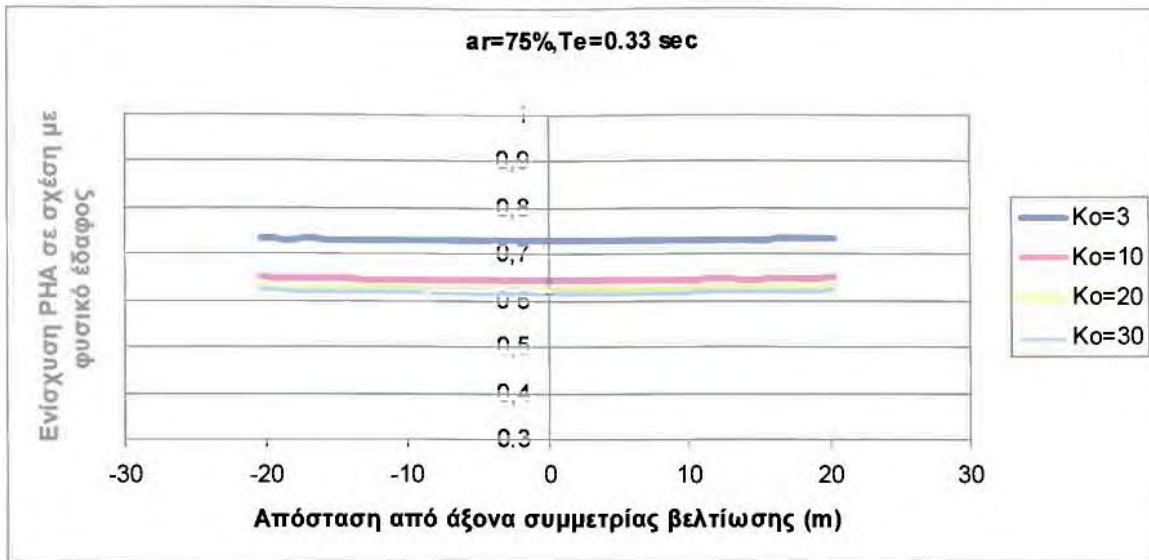
Σχήμα 4.13:Επίδραση λόγου δυστησιών K_0 στην ενίσχυση λόγω βελτίωσης της μέγιστης σεισμικής επιτάχυνσης στην επιφάνεια του εδάφους, για βελτίωση εδαφικής στρώσης μέχρι το υπόβαθρο ($H_{imp}=H=10m$) με ποσοστό αντικατάστασης $a_r=50\%$ υπό σεισμική διέγερση δεσπόζουσας περιόδου $T_e=0.33sec$.



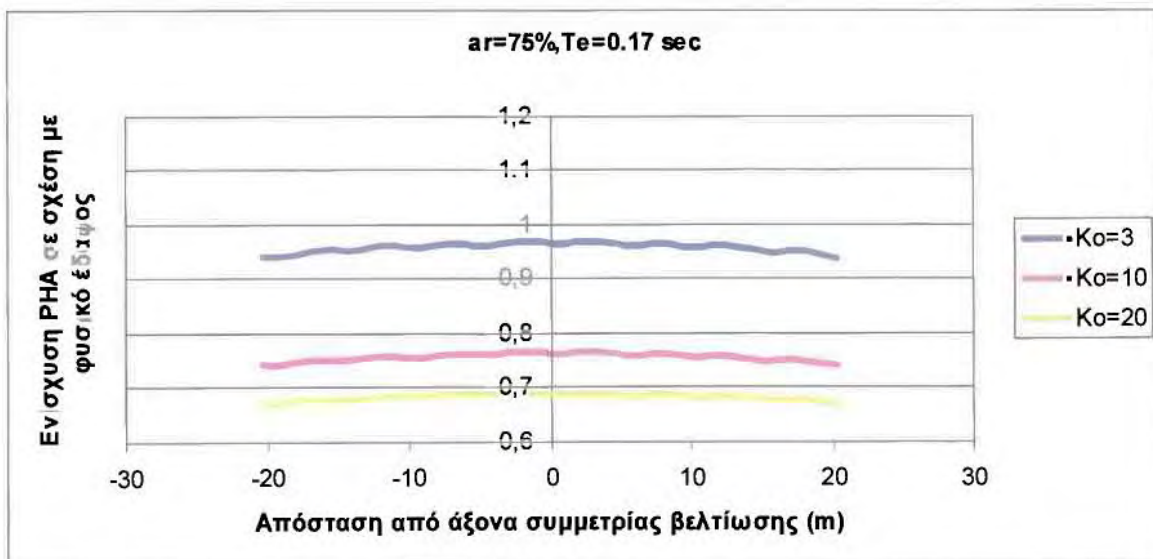
Σχήμα 4.14: Επίδραση λόγου δυστημσιών K_0 στην ενίσχυση λόγω βελτίωσης της μέγιστης σεισμικής επιτάχυνσης στην επιφάνεια του εδάφους, για βελτίωση εδαφικής στρώσης μέχρι το υπόβαθρο ($H_{imp}=H=10m$) με ποσοστό αντικατάστασης $a_r=50\%$ υπό σεισμική διέγερση δεσπόζουσας περιόδου $T_e=0.17sec$.



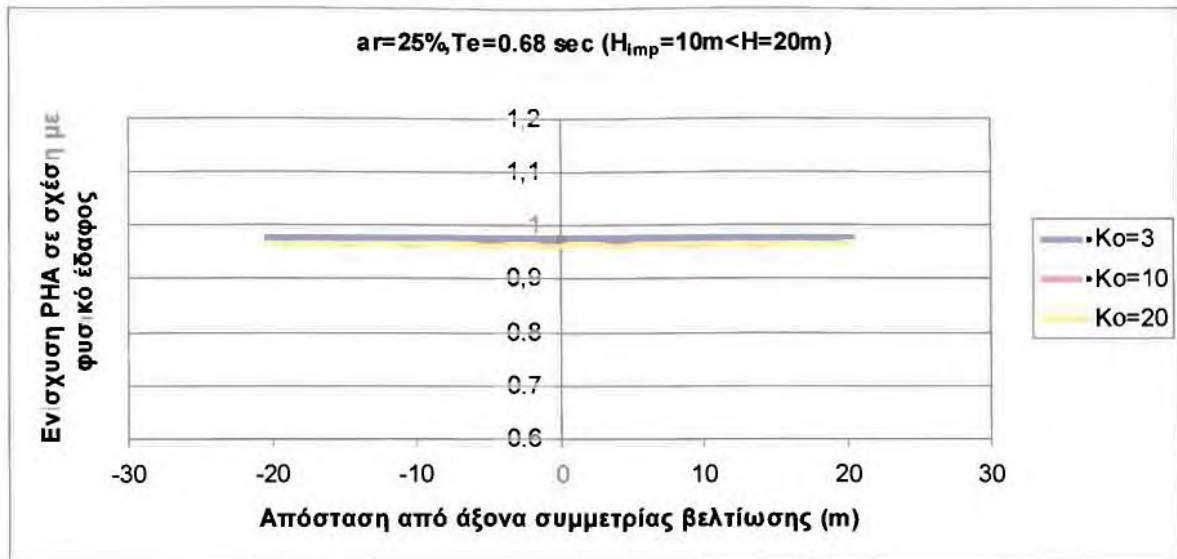
Σχήμα 4.15: Επίδραση λόγου δυστημσιών K_0 στην ενίσχυση λόγω βελτίωσης της μέγιστης σεισμικής επιτάχυνσης στην επιφάνεια του εδάφους, για βελτίωση εδαφικής στρώσης μέχρι το υπόβαθρο ($H_{imp}=H=10m$) με ποσοστό αντικατάστασης $a_r=75\%$ υπό σεισμική διέγερση δεσπόζουσας περιόδου $T_e=0.68sec$.



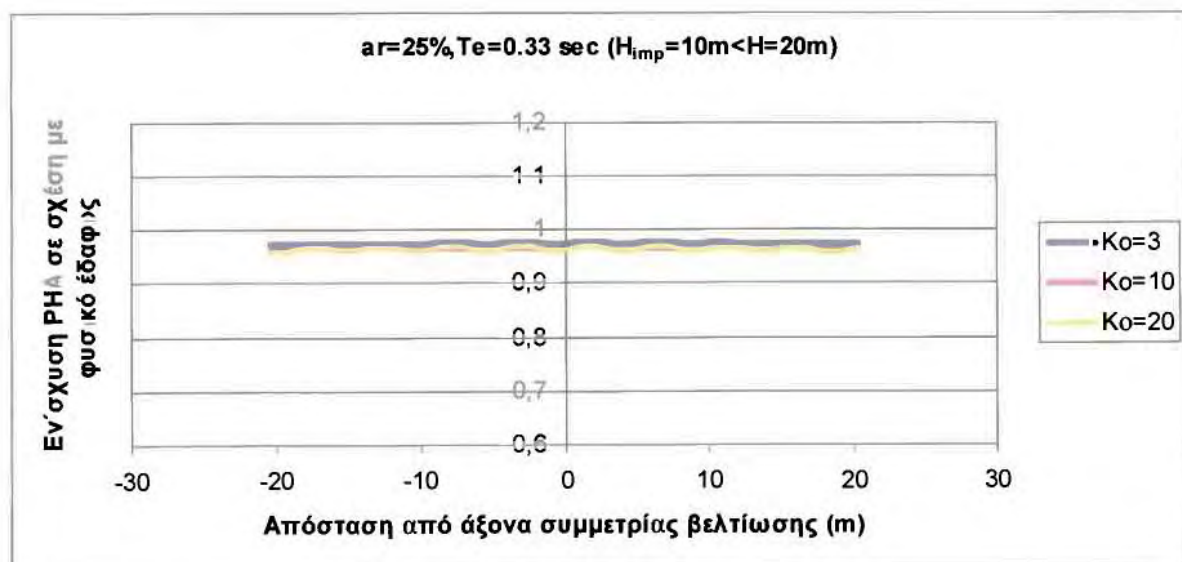
Σχήμα 4.16: Επίδραση λόγου δυστημοσιών K_0 στην ενίσχυση λόγω βελτίωσης της μέγιστης σεισμικής επιτάχυνσης στην επιφάνεια του εδάφους, για βελτίωση εδαφικής στρώσης μέχρι το υπόβαθρο ($H_{imp}=H=10m$) με ποσοστό αντικατάστασης $a_r=75\%$ υπό σεισμική διέγερση δεσπόζουσας περιόδου $T_e=0.33sec$.



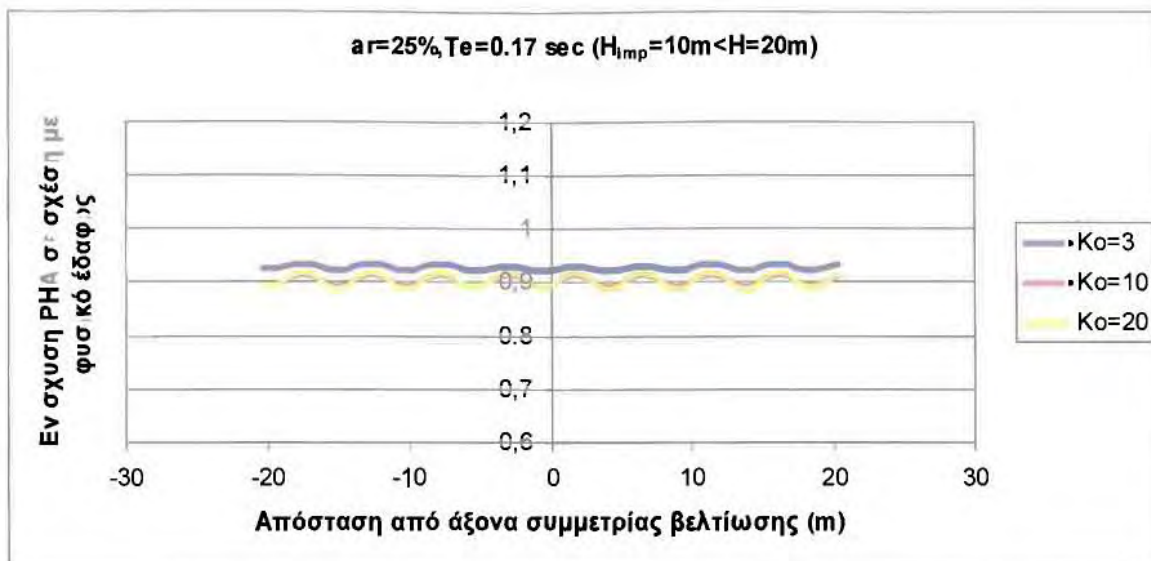
Σχήμα 4.17: Επίδραση λόγου δυστημοσιών K_0 στην ενίσχυση λόγω βελτίωσης της μέγιστης σεισμικής επιτάχυνσης στην επιφάνεια του εδάφους, για βελτίωση εδαφικής στρώσης μέχρι το υπόβαθρο ($H_{imp}=H=10m$) με ποσοστό αντικατάστασης $a_r=75\%$ υπό σεισμική διέγερση δεσπόζουσας περιόδου $T_e=0.17sec$.



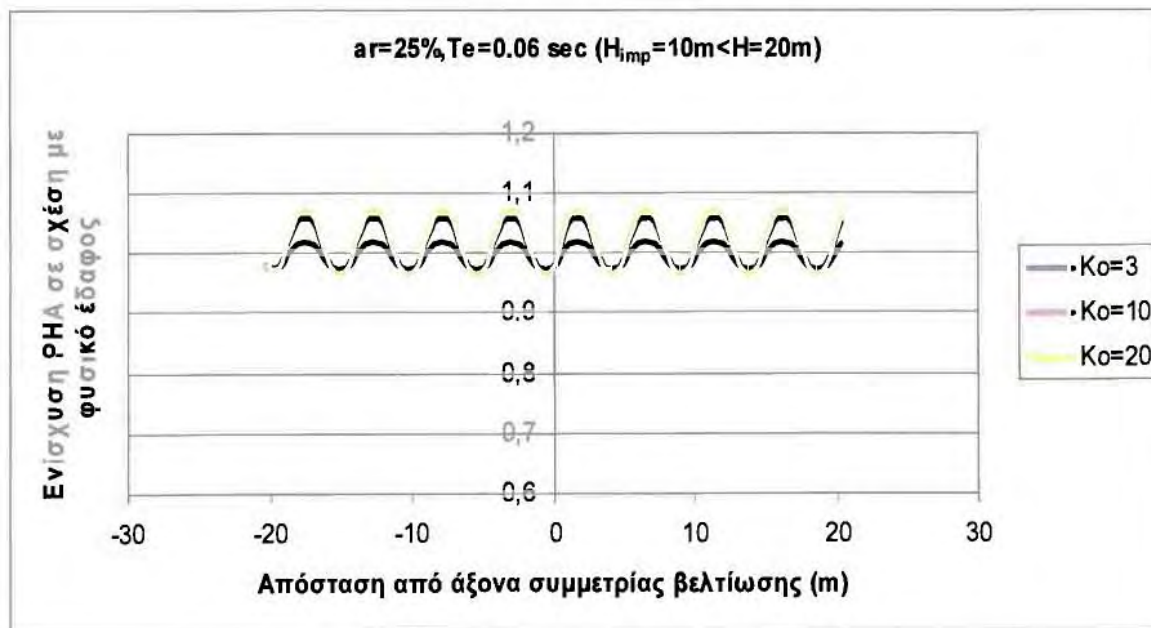
Σχήμα 4.18: Επίδραση λόγου δυστησιών K_o στην ενίσχυση λόγω βελτίωσης της μέγιστης σεισμικής επιτάχυνσης στην επιφάνεια του εδάφους, για βελτίωση εδαφικής στρώσης μέχρι ($H_{imp}=10\text{m}$) σε συνολικό βάθος υποβάθρου ($H=20\text{m}$) με ποσοστό αντικατάστασης $a_r=25\%$ υπό σεισμική διέγερση δεσπόζουσας περιόδου $T_e=0.68\text{sec}$.



Σχήμα 4.19: Επίδραση λόγου δυστησιών K_o στην ενίσχυση λόγω βελτίωσης της μέγιστης σεισμικής επιτάχυνσης στην επιφάνεια του εδάφους, για βελτίωση εδαφικής στρώσης μέχρι ($H_{imp}=10\text{m}$) σε συνολικό βάθος υποβάθρου ($H=20\text{m}$) με ποσοστό αντικατάστασης $a_r=25\%$ υπό σεισμική διέγερση δεσπόζουσας περιόδου $T_e=0.33\text{sec}$.



Σχήμα 4.20: Επίδραση λόγου δυστημοσιών K_o στην ενίσχυση λόγω βελτίωσης της μέγιστης σεισμικής επιτάχυνσης στην επιφάνεια του εδάφους, για βελτίωση εδαφικής στρώσης μέχρι ($H_{imp}=10m$) σε συνολικό βάθος υποβάθρου ($H=20m$) με ποσοστό αντικατάστασης $a_r=25\%$ υπό σεισμική διέγερση δεσπόζουσας περιόδου $T_e=0.17sec$.

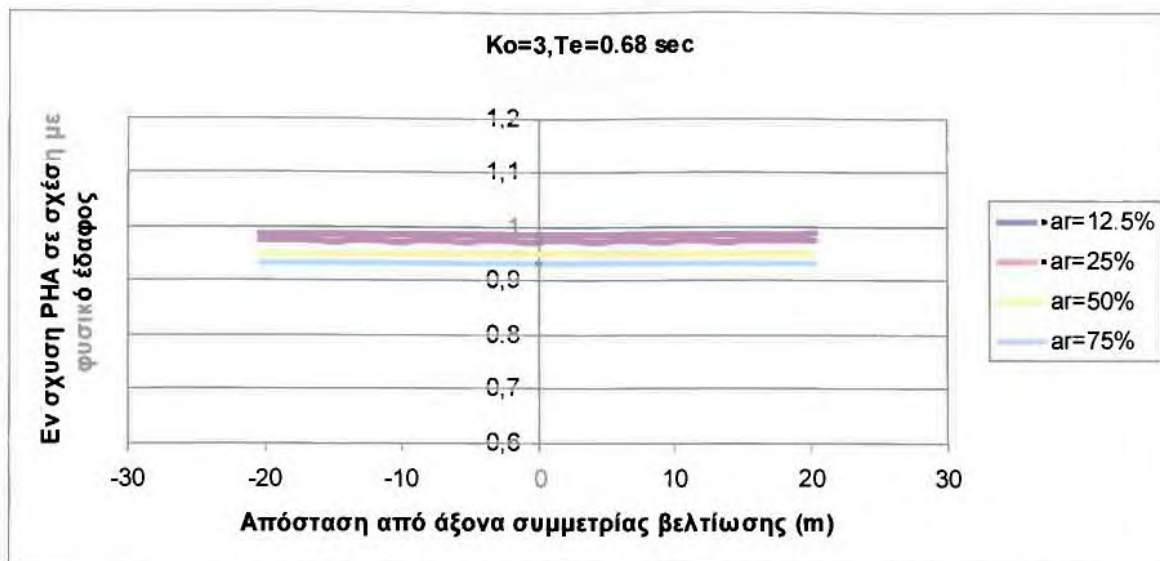


Σχήμα 4.21: Επίδραση λόγου δυστημοσιών K_o στην ενίσχυση λόγω βελτίωσης της μέγιστης σεισμικής επιτάχυνσης στην επιφάνεια του εδάφους, για βελτίωση εδαφικής στρώσης μέχρι ($H_{imp}=10m$) σε συνολικό βάθος υποβάθρου ($H=20m$) με ποσοστό αντικατάστασης $a_r=25\%$ υπό σεισμική διέγερση δεσπόζουσας περιόδου $T_e=0.06sec$.

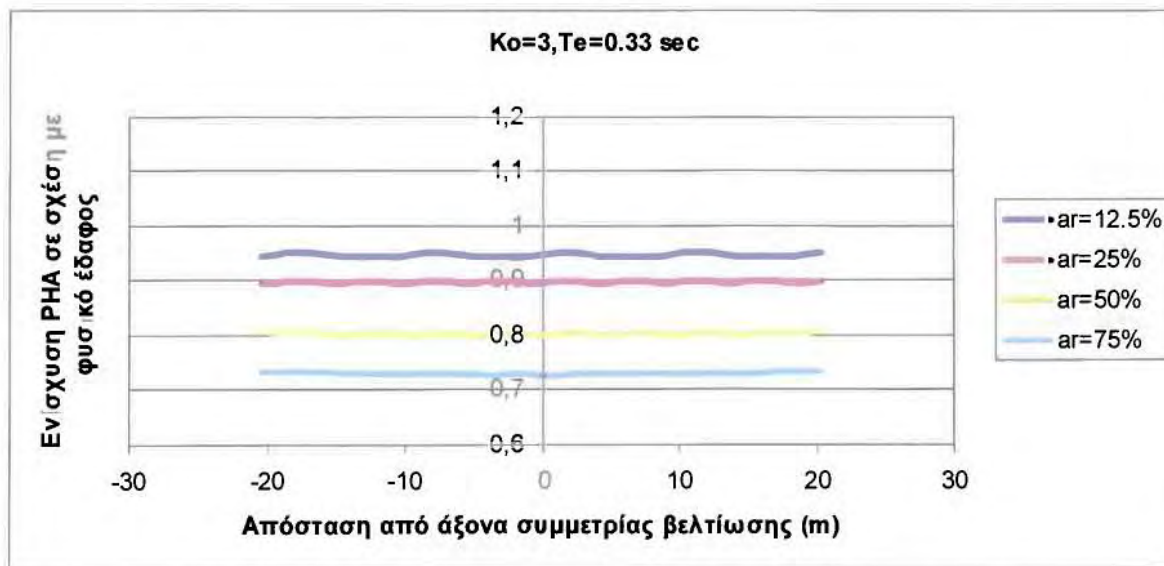
4.3 Επίδραση ποσοστού αντικατάστασης φυσικού εδάφους

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται τα διαγράμματα επίδρασης του ποσοστού αντικατάστασης $a_r(\%)=12.5\%$, 25% , 50% και 75% στην ενίσχυση λόγω βελτίωσης της μέγιστης σεισμικής επιτάχυνσης στην επιφάνεια του εδάφους, για βελτίωση εδαφικής στρώσης μέχρι το υπόβαθρο ($H_{imp}=H=10m$) με διάφορους λόγους δυστησιών K_o και δεσπόζουσες περιόδους T_e (sec) σεισμικής διέγερσης (Σχήματα 4.22 έως 4.34). Η κατηγοριοποίηση της παρουσίασης των σχημάτων γίνεται με βάση το λόγο δυστησιών K_o , δηλαδή στα Σχήματα 4.22 έως 4.25 για $K_o=3$, στα Σχήματα 4.26 έως 4.29 για $K_o=10$, στα Σχήματα 4.30 έως 4.33 για $K_o=20$ και τέλος στο Σχήμα 4.34 για $K_o=30$. Συνοψίζοντας τις παρατηρήσεις που προκύπτουν από τα διαγράμματα αυτά προκύπτει ότι:

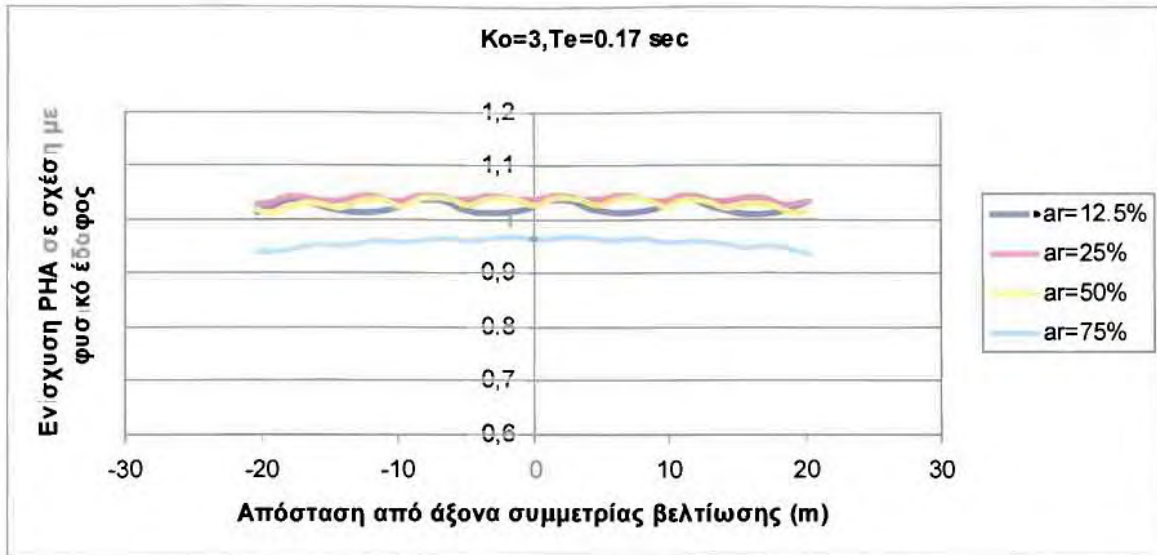
- Για τις χαμηλόσυχνες διεγέρσεις με δεσπόζουσες περιόδους $T_e=0.68$ sec και $T_e=0.33$ sec (Σχήματα 4.22, 4.23, 4.26, 4.27, 4.30, 4.31 και 4.34) ανεξαρτήτως του λόγου δυστησιών K_o , η βελτίωση του εδάφους οδηγεί σε απομείωση της σεισμικής κίνησης του εδάφους. Μάλιστα προκαλείται απομείωση αυτής όσο αυξάνει το ποσοστό αντικατάστασης $a_r(\%)$ του βελτιωμένου εδάφους.
- Στις ιδιαίτερα υψίσυχνες διεγέρσεις με δεσπόζουσα περίοδο $T_e=0.06$ sec το βελτιωμένο έδαφος δίνει ενίσχυση της σεισμικής κίνησης σε σχέση με το φυσικό, η οποία γίνεται λιγότερο έντονη με την μείωση του ποσοστού αντικατάστασης a_r (Σχήματα 4.25, 4.29, 4.33).
- Για δεσπόζουσα περίοδο διέγερσης ίση με $T_e=0.17$ sec, πολύ κοντά στην ιδιοπερίοδο $T_{soil}=0.2$ sec φυσικού εδάφους, παρατηρείται ότι άλλοτε ενίσχυση και άλλοτε απομείωση της σεισμικής κίνησης λόγω της βελτίωσης ανάλογα με το πραγματοποιούμενο ποσοστό αντικατάστασης a_r κάθε φορά. Συγκεκριμένα, στις περιπτώσεις για $K_o=10$ και 20 τα ποσοστά αντικατάστασης $a_r=25\%$ και 12.5% δίνουν ενίσχυση, η οποία ελαττώνεται με τη μείωση του a_r χωρίς όμως αυτή η ενίσχυση να πέφτει από τη μονάδα. Αντιθέτως για $a_r=50\%$ και 75% η βελτίωση δίνει απομείωση της κίνησης, η οποία γίνεται πιο έντονη με την αύξηση του ποσοστού αντικατάστασης. Η περίπτωση για $K_o=3$ διαφοροποιείται λίγο από τις δύο παραπάνω καθώς εκτός των ποσοστών $a_r=12.5\%$ και 25% δίνει ενίσχυση και η περίπτωση για $a_r=50\%$ με μόνη περίπτωση απομείωσης της κίνησης για $a_r=75\%$. (Σχήματα 4.24, 4.28, 4.32)



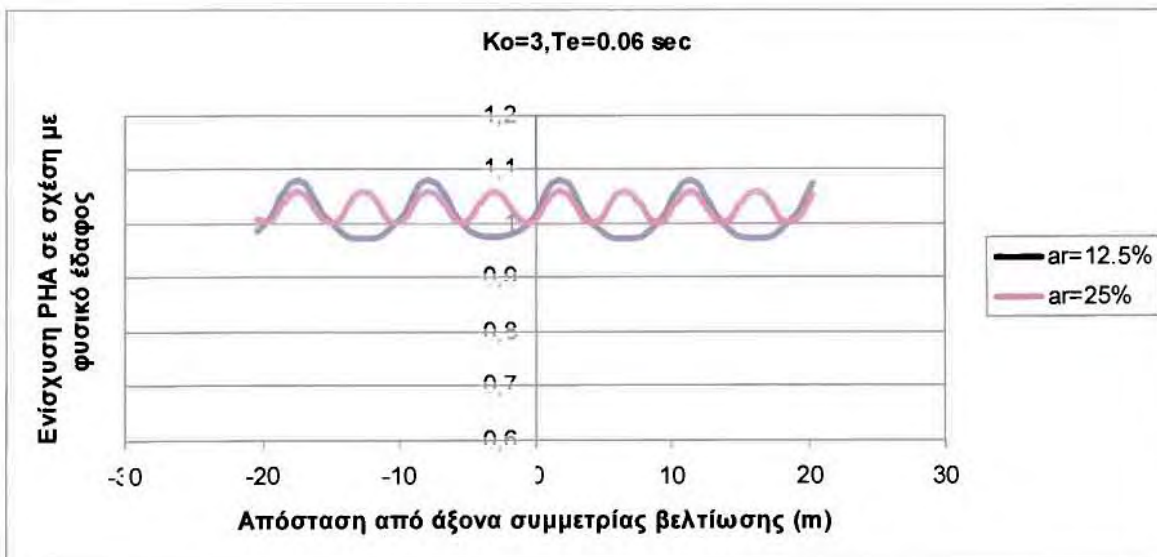
Σχήμα 4.22: Επίδραση ποσοστού αντικατάστασης a_r (%) στην ενίσχυση λόγω βελτίωσης της μέγιστης σεισμικής επιτάχυνσης στην επιφάνεια του εδάφους, για βελτίωση εδαφικής στρώσης μέχρι το υπόβαθρο ($H_{imp}=H=10m$) με λόγο δυστημιαίων $K_o=3$ υπό σεισμική διέγερση δεσπόζουσας περιόδου $T_e=0.68sec$.



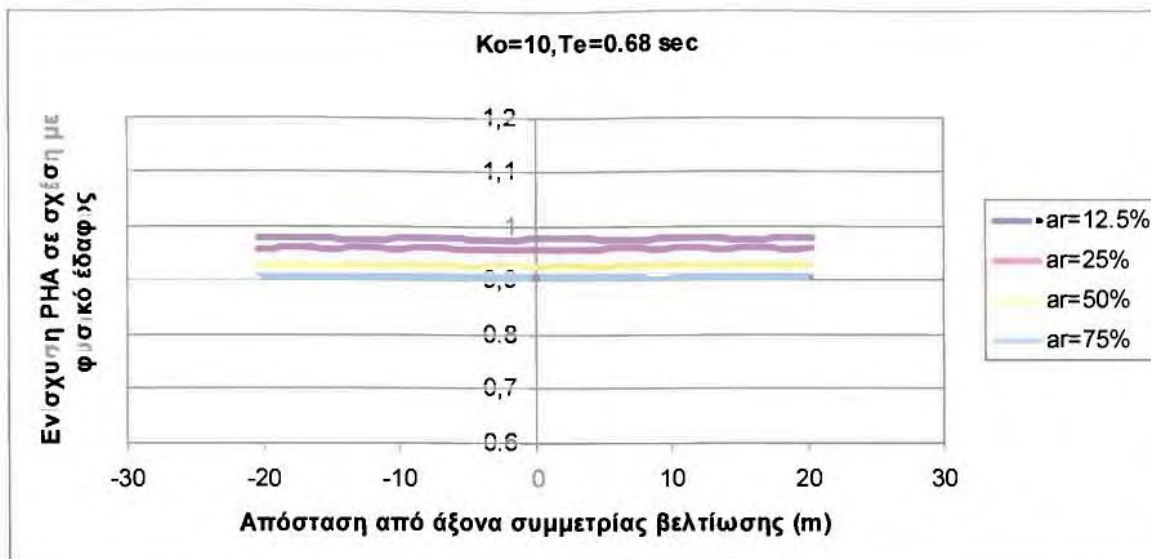
Σχήμα 4.23: Επίδραση ποσοστού αντικατάστασης a_r (%) στην ενίσχυση λόγω βελτίωσης της μέγιστης σεισμικής επιτάχυνσης στην επιφάνεια του εδάφους, για βελτίωση εδαφικής στρώσης μέχρι το υπόβαθρο ($H_{imp}=H=10m$) με λόγο δυστημιαίων $K_o=3$ υπό σεισμική διέγερση δεσπόζουσας περιόδου $T_e=0.33sec$.



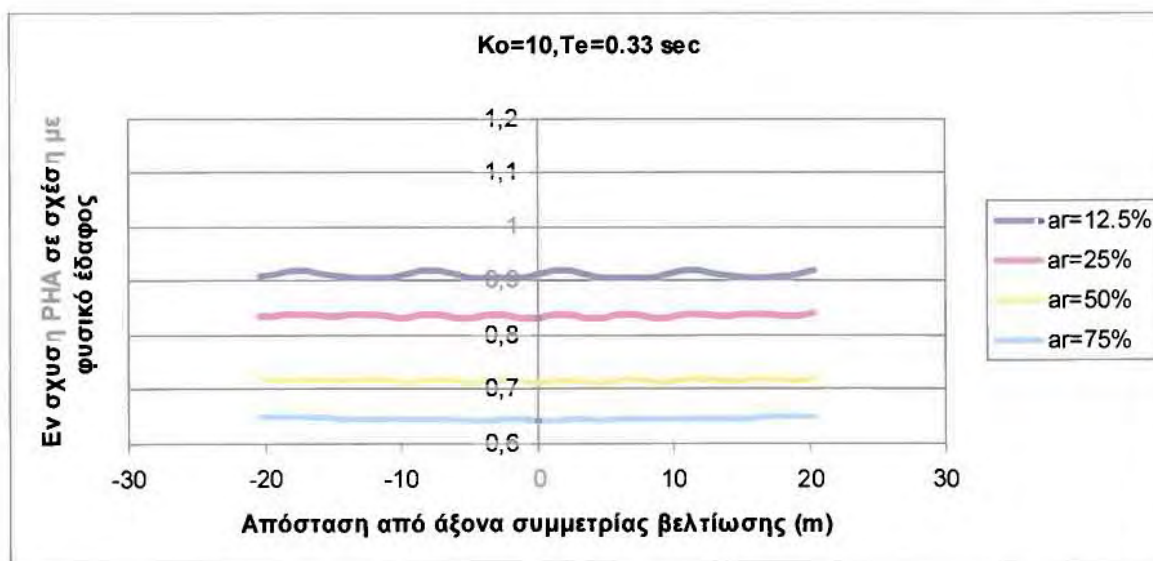
Σχήμα 4.24: Επίδραση ποσοστού αντικατάστασης a_r (%) στην ενίσχυση λόγω βελτίωσης της μέγιστης σεισμικής επιτάχυνσης στην επιφάνεια του εδάφους, για βελτίωση εδαφικής στρώσης μέχρι το υπόβαθρο ($H_{imp}=H=10m$) με λόγο δυστημσιών $K_0=3$ υπό σεισμική διέγερση δεσπόζουσας περιόδου $T_e=0.17sec$.



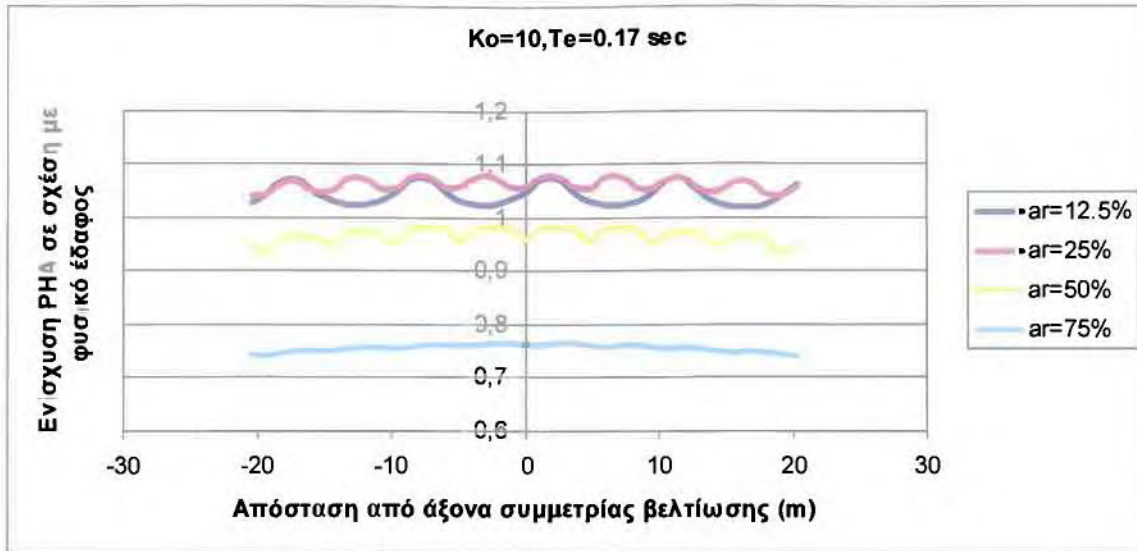
Σχήμα 4.25: Επίδραση ποσοστού αντικατάστασης a_r (%) στην ενίσχυση λόγω βελτίωσης της μέγιστης σεισμικής επιτάχυνσης στην επιφάνεια του εδάφους, για βελτίωση εδαφικής στρώσης μέχρι το υπόβαθρο ($H_{imp}=H=10m$) με λόγο δυστημσιών $K_0=3$ υπό σεισμική διέγερση δεσπόζουσας περιόδου $T_e=0.06sec$.



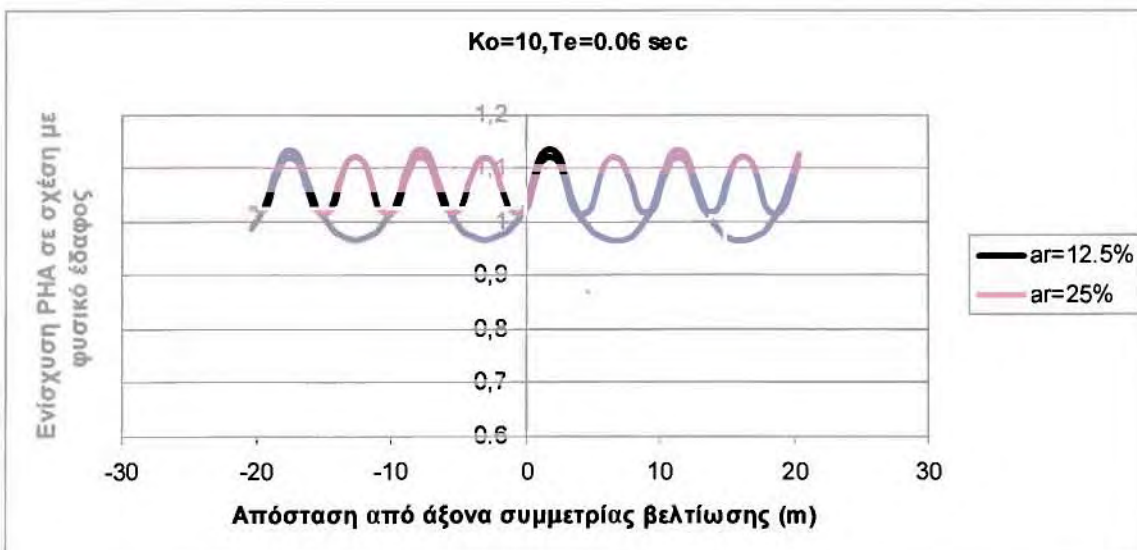
Σχήμα 4.26: Επίδραση ποσοστού αντικατάστασης a_r (%) στην ενίσχυση λόγω βελτίωσης της μέγιστης σεισμικής επιτάχυνσης στην επιφάνεια του εδάφους, για βελτίωση εδαφικής στρώσης μέχρι το υπόβαθρο ($H_{imp}=H=10m$) με λόγο δυσστησιών $K_0=10$ υπό σεισμική διέγερση δεσπόζουσας περιόδου $T_e=0.68sec$.



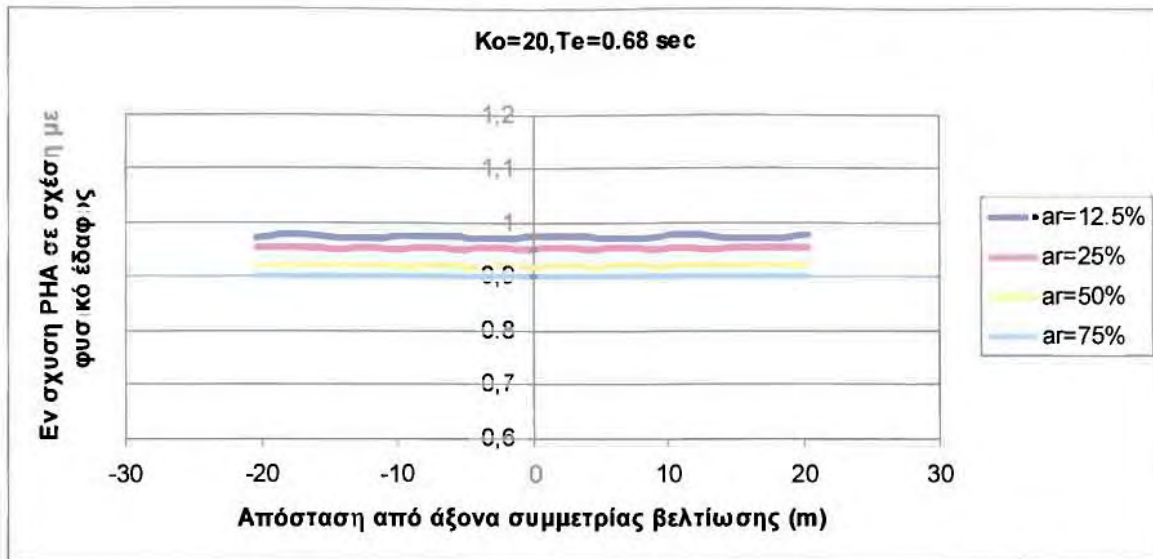
Σχήμα 4.27: Επίδραση ποσοστού αντικατάστασης a_r (%) στην ενίσχυση λόγω βελτίωσης της μέγιστης σεισμικής επιτάχυνσης στην επιφάνεια του εδάφους, για βελτίωση εδαφικής στρώσης μέχρι το υπόβαθρο ($H_{imp}=H=10m$) με λόγο δυσστησιών $K_0=10$ υπό σεισμική διέγερση δεσπόζουσας περιόδου $T_e=0.33sec$.



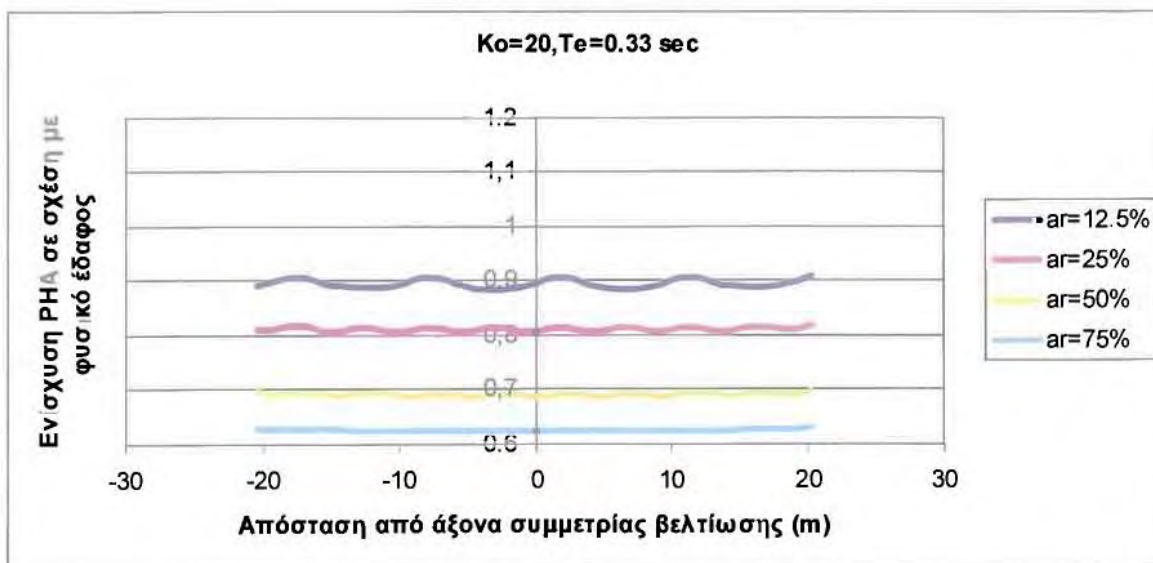
Σχήμα 4.28: Επίδραση ποσοστού αντικατάστασης a_r (%) στην ενίσχυση λόγω βελτίωσης της μέγιστης σεισμικής επιτάχυνσης στην επιφάνεια του εδάφους, για βελτίωση εδαφικής στρώσης μέχρι το υπόβαθρο ($H_{imp}=H=10\text{m}$) με λόγο δυσστησιών $K_0=10$ υπό σεισμική διέγερση δεσπόζουσας περιόδου $T_e=0.17\text{sec}$.



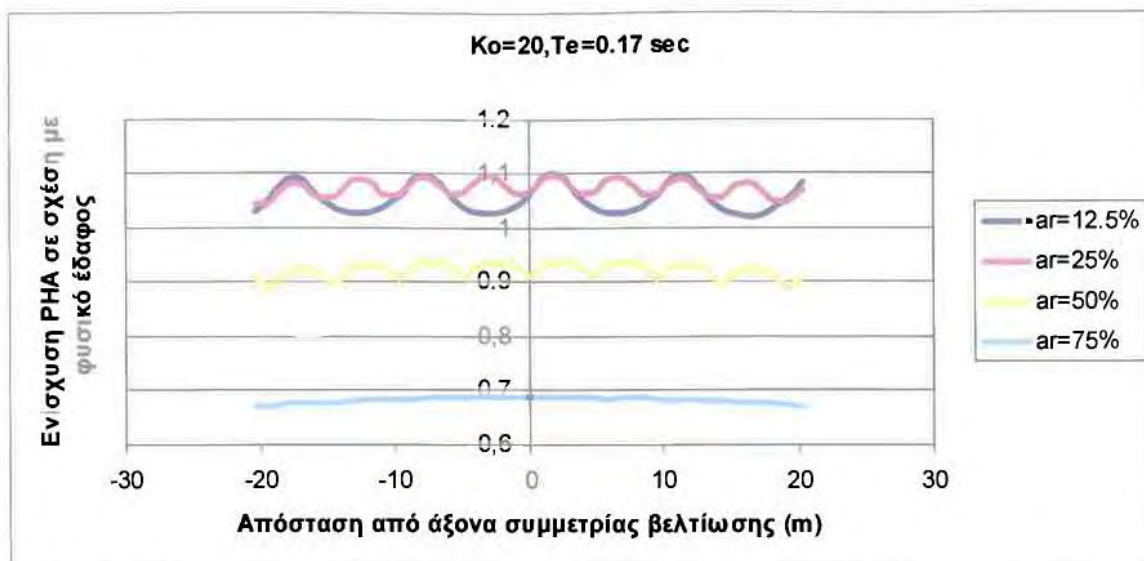
Σχήμα 4.29: Επίδραση ποσοστού αντικατάστασης a_r (%) στην ενίσχυση λόγω βελτίωσης της μέγιστης σεισμικής επιτάχυνσης στην επιφάνεια του εδάφους, για βελτίωση εδαφικής στρώσης μέχρι το υπόβαθρο ($H_{imp}=H=10\text{m}$) με λόγο δυσστησιών $K_0=10$ υπό σεισμική διέγερση δεσπόζουσας περιόδου $T_e=0.06\text{sec}$.



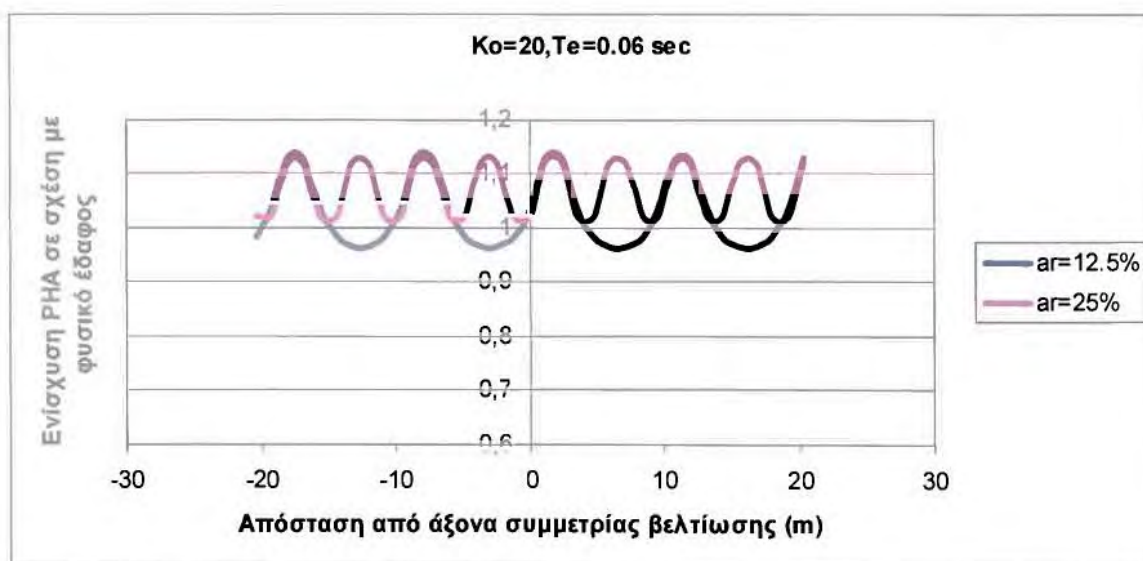
Σχήμα 4.30: Επίδραση ποσοστού αντικατάστασης a_r (%) στην ενίσχυση λόγω βελτίωσης της μέγιστης σεισμικής επιτάχυνσης στην επιφάνεια του εδάφους, για βελτίωση εδαφικής στρώσης μέχρι το υπόβαθρο ($H_{imp}=H=10m$) με λόγο δυσστησιών $K_o=20$ υπό σεισμική διέγερση δεσπόζουσας περιόδου $T_e=0.68sec$.



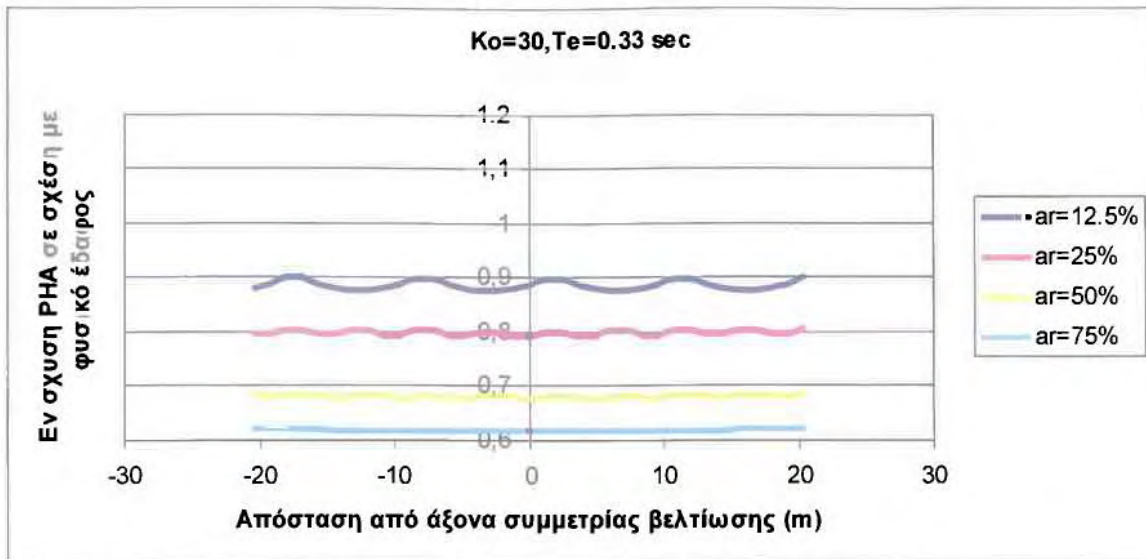
Σχήμα 4.31: Επίδραση ποσοστού αντικατάστασης a_r (%) στην ενίσχυση λόγω βελτίωσης της μέγιστης σεισμικής επιτάχυνσης στην επιφάνεια του εδάφους, για βελτίωση εδαφικής στρώσης μέχρι το υπόβαθρο ($H_{imp}=H=10m$) με λόγο δυσστησιών $K_o=20$ υπό σεισμική διέγερση δεσπόζουσας περιόδου $T_e=0.33sec$.



Σχήμα 4.32: Επίδραση ποσοστού αντικατάστασης a_r (%) στην ενίσχυση λόγω βελτίωσης της μέγιστης σεισμικής επιτάχυνσης στην επιφάνεια του εδάφους, για βελτίωση εδαφικής στρώσης μέχρι το υπόβαθρο ($H_{imp}=H=10m$) με λόγο δυσστησιών $K_o=20$ υπό σεισμική διέγερση δεσπόζουσας περιόδου $T_e=0.17sec$.



Σχήμα 4.33: Επίδραση ποσοστού αντικατάστασης a_r (%) στην ενίσχυση λόγω βελτίωσης της μέγιστης σεισμικής επιτάχυνσης στην επιφάνεια του εδάφους, για βελτίωση εδαφικής στρώσης μέχρι το υπόβαθρο ($H_{imp}=H=10m$) με λόγο δυσστησιών $K_o=20$ υπό σεισμική διέγερση δεσπόζουσας περιόδου $T_e=0.06sec$.



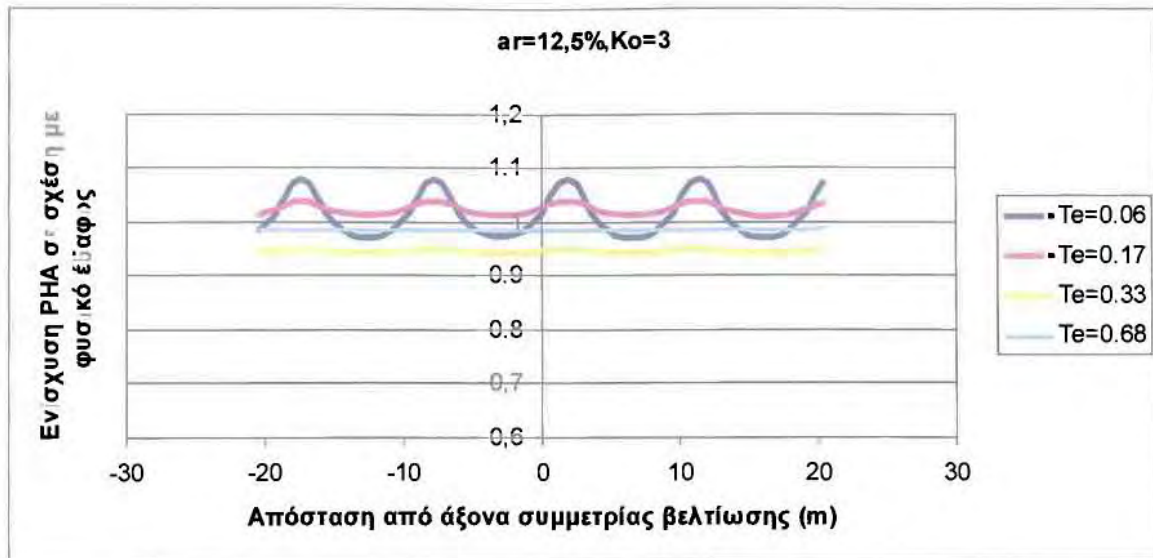
Σχήμα 4.34: Επίδραση ποσοστού αντικατάστασης a_r (%) στην ενίσχυση λόγω βελτίωσης της μέγιστης σεισμικής επιτάχυνσης στην επιφάνεια του εδάφους, για βελτίωση εδαφικής στρώσης μέχρι το υπόβαθρο ($H_{imp}=H=10m$) με λόγο δυστημσιών $K_o=30$ υπό σεισμική διέγερση δεσπόζουσας περιόδου $T_e=0.33sec$.

4.4 Επίδραση δεσπόζουσας περιόδου διέγερσης

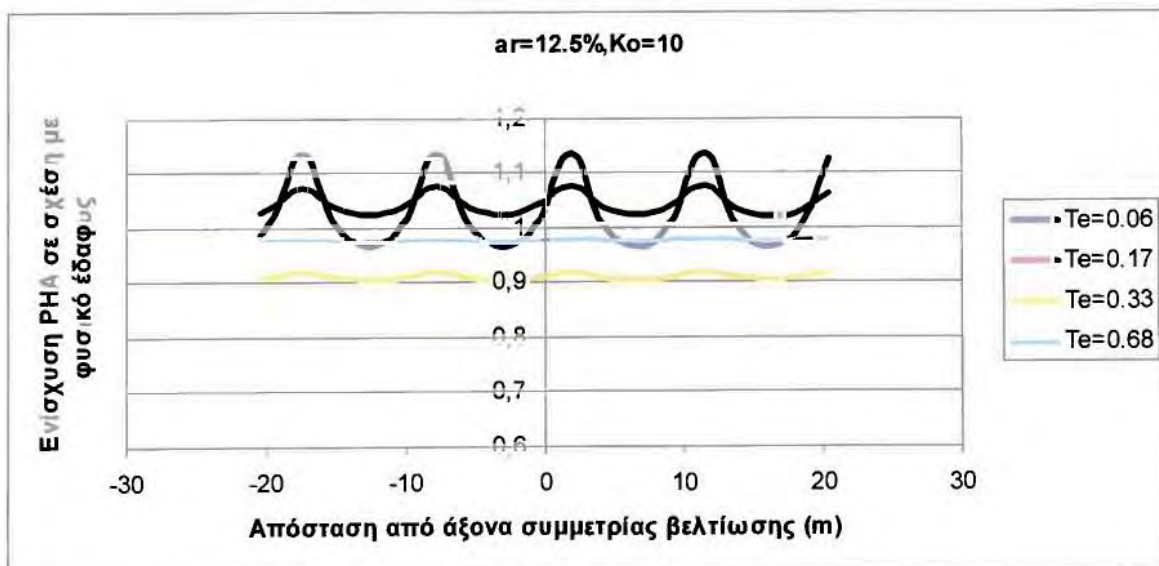
Σε αυτήν την παράγραφο παρουσιάζονται τα διαγράμματα επίδρασης της δεσπόζουσας περιόδου $T_e=0.68, 0.33, 0.17$ και 0.06 sec της σεισμικής διέγερσης στην ενίσχυση λόγω βελτίωσης της μέγιστης σεισμικής επιτάχυνσης στην επιφάνεια του εδάφους. Πιο συγκεκριμένα, στα Σχήματα 4.35 έως 4.46 δίνονται τα διαγράμματα για βελτίωση εδαφικής στρώσης μέχρι το υπόβαθρο ($H_{imp}=H=10m$), και στα Σχήματα 4.47 έως 4.49 για βελτίωση εδαφικής στρώσης $H_{imp}=10m$ σε έδαφος βάθους $H=20m$. Από εκεί και πέρα, η παρουσίαση των Σχημάτων γίνεται με βάση το ποσοστό αντικατάστασης $a_r(\%)$, δηλαδή στα Σχήματα 4.35 έως 4.37 για $a_r=12.5\%$, στα Σχήματα 4.38 έως 4.40 για $a_r=25\%$, στα Σχήματα 4.41 έως 4.43 για $a_r=50\%$ και στα Σχήματα 4.44 έως 4.46 για $a_r=75\%$, ενώ τα Σχήματα 4.47 έως 4.49, που αφορούν βελτίωση με $H_{imp}=10m$ σε στρώση με $H=20m$, για ποσοστό αντικατάστασης $a_r=25\%$. Ομαδοποιώντας τα συμπεράσματα για αυτές τις περιπτώσεις παρατηρείται ότι:

- Για μικρά ποσοστά αντικατάστασης $a_r=12.5\%$ και 25% ανεξαρτήτως του λόγου δυστησιών K_o , οι χαμηλόσυχνες διεγέρσεις με δεσπόζουσες περιόδους $T_e=0.68$ και 0.33 sec δίνουν απομείωση της σεισμικής κίνησης του βελτιωμένου εδάφους σε σχέση με το φυσικό, η οποία είναι εντονότερη όσο μεγαλώνει η T_e . Αντίθετα, στις υψηλόσυχνες διεγέρσεις με δεσπόζουσες περιόδους $T_e=0.17$ και 0.06 sec η βελτίωση δίνει ενίσχυση της σεισμικής κίνησης. (Σχήματα 4.35, 4.36, 4.37, 4.38, 4.39 και 4.40).
- Διαφορετική συμπεριφορά παρατηρείται για $a_r=75\%$ και $K_o=3, 10, 20$ όπου δεν υπάρχει ενίσχυση της σεισμικής κίνησης στο βελτιωμένο έδαφος για το υπό εξέταση εύρος των $T_e=0.17, 0.33$ και 0.68 sec και η σχετική ένταση της απομείωσης εξαρτάται από την τιμή του K_o και της T_e . (Σχήματα 4.44, 4.45 και 4.46).
- Αντίστοιχα πολύπλοκη είναι και η απόκριση για $a_r=50\%$. Πιο συγκεκριμένα, για κάθε $K_o=3, 10$ και 20 και $T_e=0.17, 0.33$ και 0.68 sec προκύπτει απομείωση με την εξαίρεση της $K_o=3$ για $T_e=0.17$ sec (Σχήματα 4.41, 4.42 και 4.43).
- Εξετάζοντας τα διαγράμματα για ποσοστό $a_r=25\%$ και τους υπό εξέταση λόγους δυστησιών K_o , στην περίπτωση των αναλύσεων για βελτίωση εδαφικής στρώσης $H_{imp}=10m$ σε έδαφος βάθους $H=20m$ παρατηρούμε ότι για λόγο $K_o=3$ η βελτίωση απομειώνει τη σεισμική κίνηση σε όλο το φάσμα των δεσπόζουσων περιόδων T_e που εξετάζονται και το ίδιο ισχύει και για $K_o=10$ και 20 και $T_e \geq 0.17$

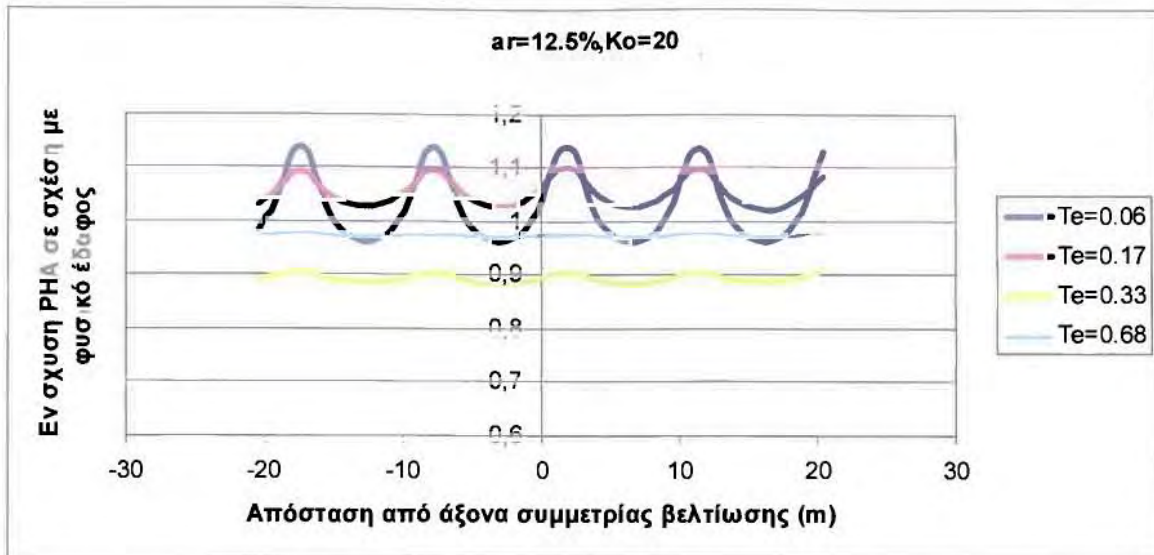
sec. Αντίθετα, για $K_0=10$, 20 και $T_e=0.06$ sec αναμένεται μικρή ενίσχυση της σεισμικής κίνησης σε σχέση με το φυσικό έδαφος. (Σχήματα 4.47, 4.48 και 4.49).



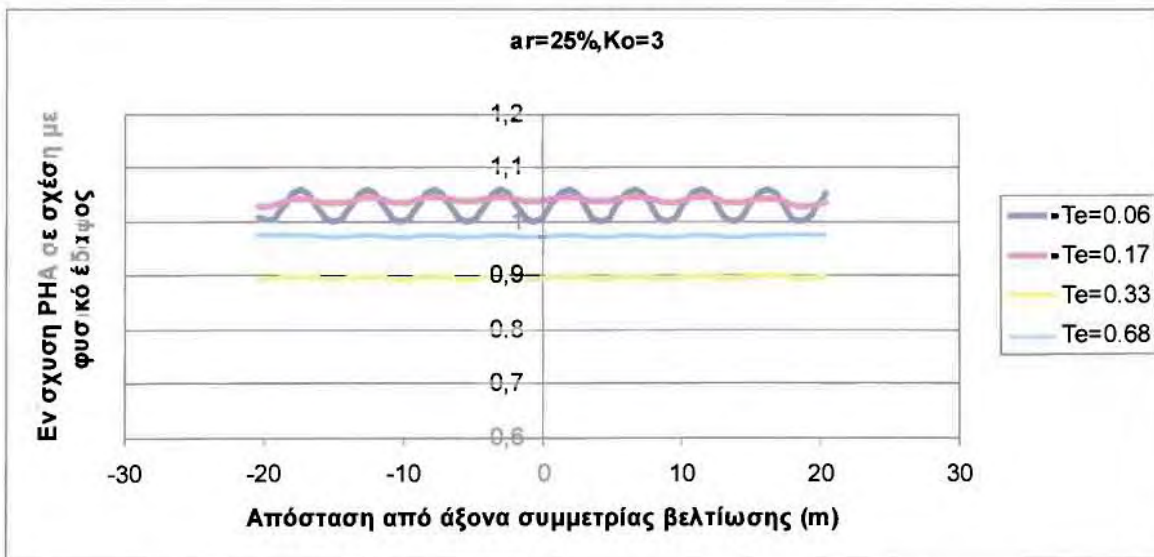
Σχήμα 4.35: Επίδραση δεσπόζουσας περιόδου T_e (sec) στην ενίσχυση λόγω βελτίωσης της μέγιστης σεισμικής επιτάχυνσης στην επιφάνεια του εδάφους, για βελτίωση εδαφικής στρώσης μέχρι το υπόβαθρο ($H_{imp}=H=10m$) με λόγο δυστημψιών $K_0=3$ και ποσοστό αντικαταστάσεως $a_r=12.5(\%)$



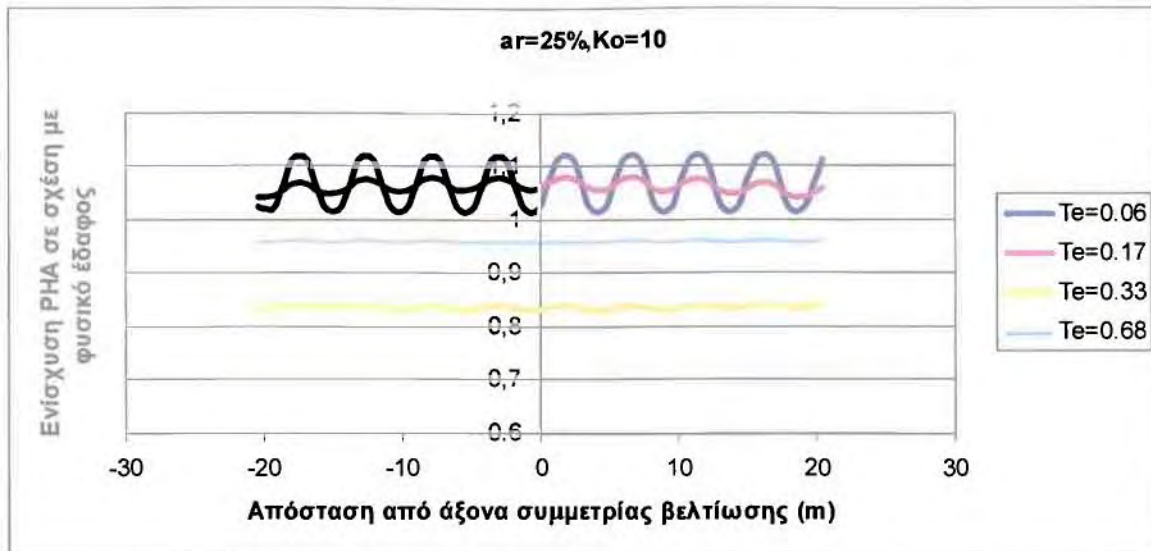
Σχήμα 4.36: Επίδραση δεσπόζουσας περιόδου T_e (sec) στην ενίσχυση λόγω βελτίωσης της μέγιστης σεισμικής επιτάχυνσης στην επιφάνεια του εδάφους, για βελτίωση εδαφικής στρώσης μέχρι το υπόβαθρο ($H_{imp}=H=10m$) με λόγο δυστημψιών $K_0=10$ και ποσοστό αντικαταστάσεως $a_r=12.5(\%)$



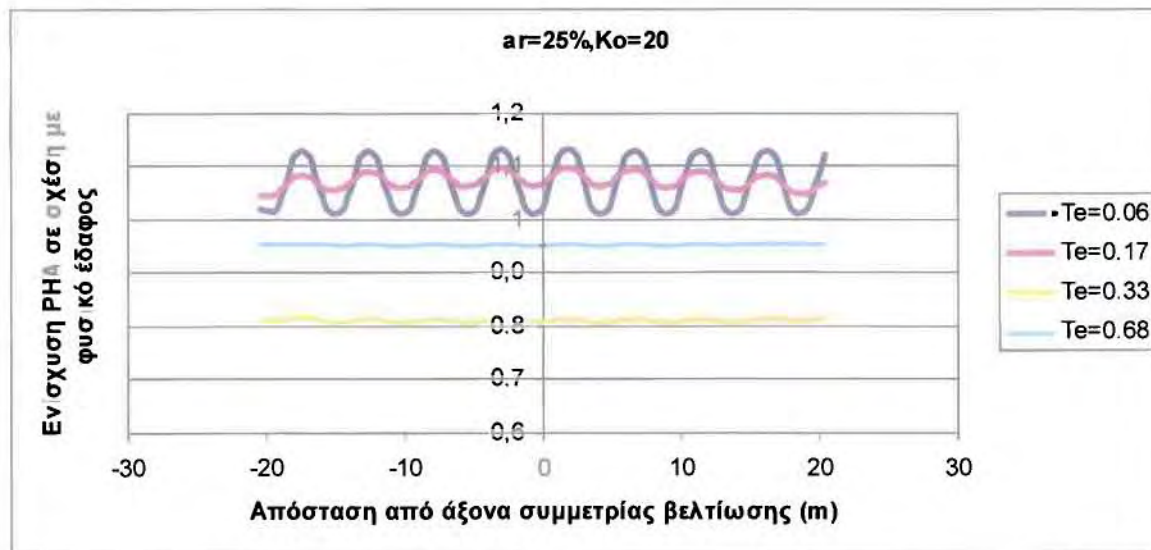
Σχήμα 4.37: Επίδραση δεσπόζουσας περιόδου T_e (sec) στην ενίσχυση λόγω βελτίωσης της μέγιστης σεισμικής επιτάχυνσης στην επιφάνεια του εδάφους, για βελτίωση εδαφικής στρώσης μέχρι το υπόβαθρο ($H_{imp}=H=10m$) με λόγο δυστημσιών $K_o=20$ και ποσοστό αντικαταστάσεως $a_r=12.5(\%)$



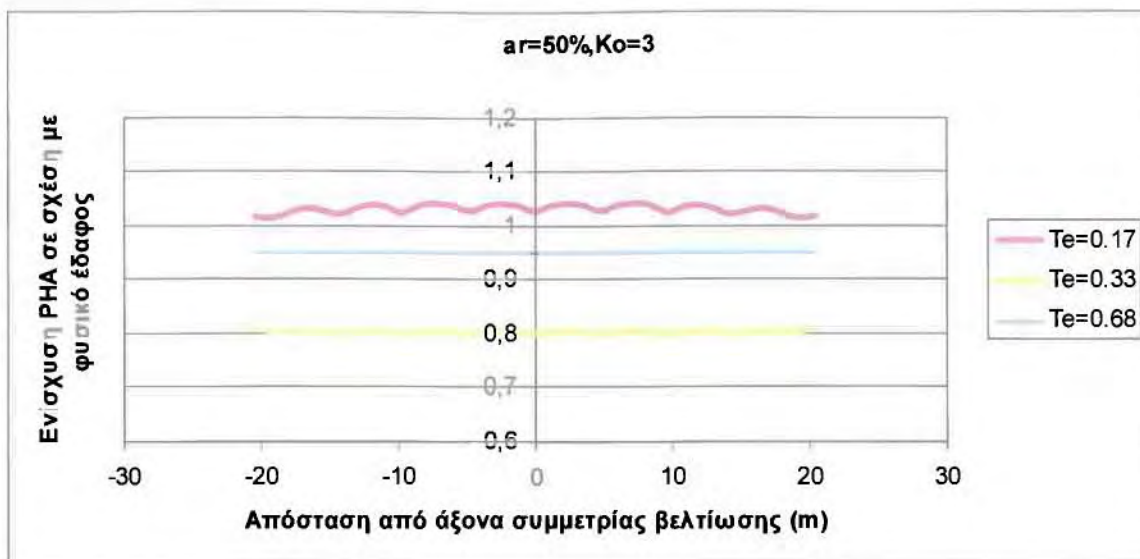
Σχήμα 4.38: Επίδραση δεσπόζουσας περιόδου T_e (sec) στην ενίσχυση λόγω βελτίωσης της μέγιστης σεισμικής επιτάχυνσης στην επιφάνεια του εδάφους, για βελτίωση εδαφικής στρώσης μέχρι το υπόβαθρο ($H_{imp}=H=10m$) με λόγο δυστημσιών $K_o=3$ και ποσοστό αντικαταστάσεως $a_r=25(\%)$



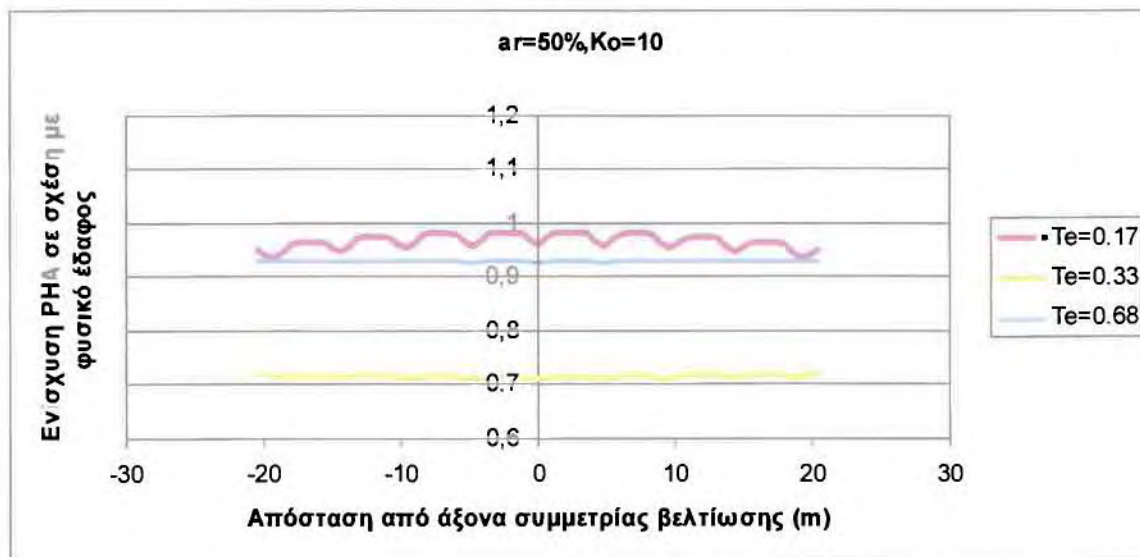
Σχήμα 4.39: Επίδραση δεσπόζουσας περιόδου T_e (sec) στην ενίσχυση λόγω βελτίωσης της μέγιστης σεισμικής επιτάχυνσης στην επιφάνεια του εδάφους, για βελτίωση εδαφικής στρώσης μέχρι το υπόβαθρο ($H_{imp}=H=10m$) με λόγο δυστημσιών $K_o=10$ και ποσοστό αντικατάστασης $a_r=25(\%)$



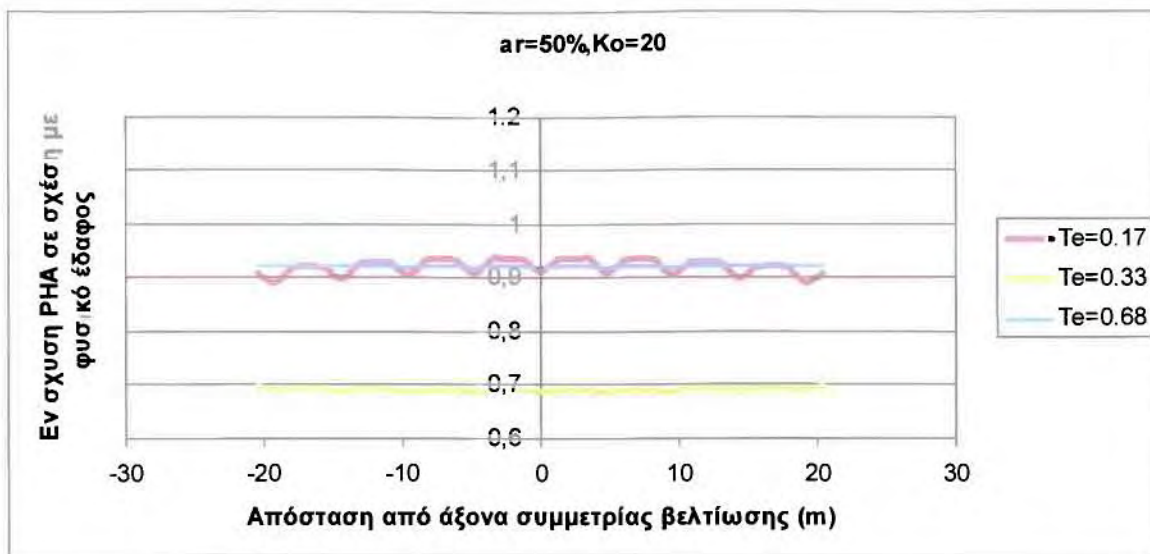
Σχήμα 4.40: Επίδραση δεσπόζουσας περιόδου T_e (sec) στην ενίσχυση λόγω βελτίωσης της μέγιστης σεισμικής επιτάχυνσης στην επιφάνεια του εδάφους, για βελτίωση εδαφικής στρώσης μέχρι το υπόβαθρο ($H_{imp}=H=10m$) με λόγο δυστημσιών $K_o=20$ και ποσοστό αντικατάστασης $a_r=25(\%)$



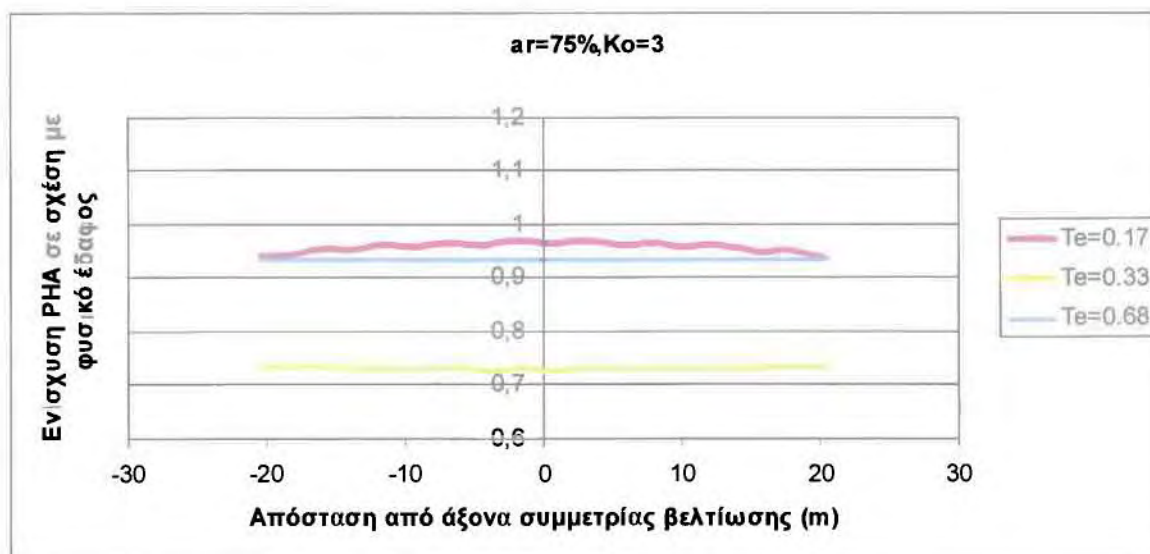
Σχήμα 4.41: Επίδραση δεσπόζουσας περιόδου T_e (sec) στην ενίσχυση λόγω βελτίωσης της μέγιστης σεισμικής επιτάχυνσης στην επιφάνεια του εδάφους, για βελτίωση εδαφικής στρώσης μέχρι το υπόβαθρο ($H_{imp}=H=10m$) με λόγο δυστημσιών $K_o=3$ και ποσοστό αντικατάστασης $a_r=50(\%)$



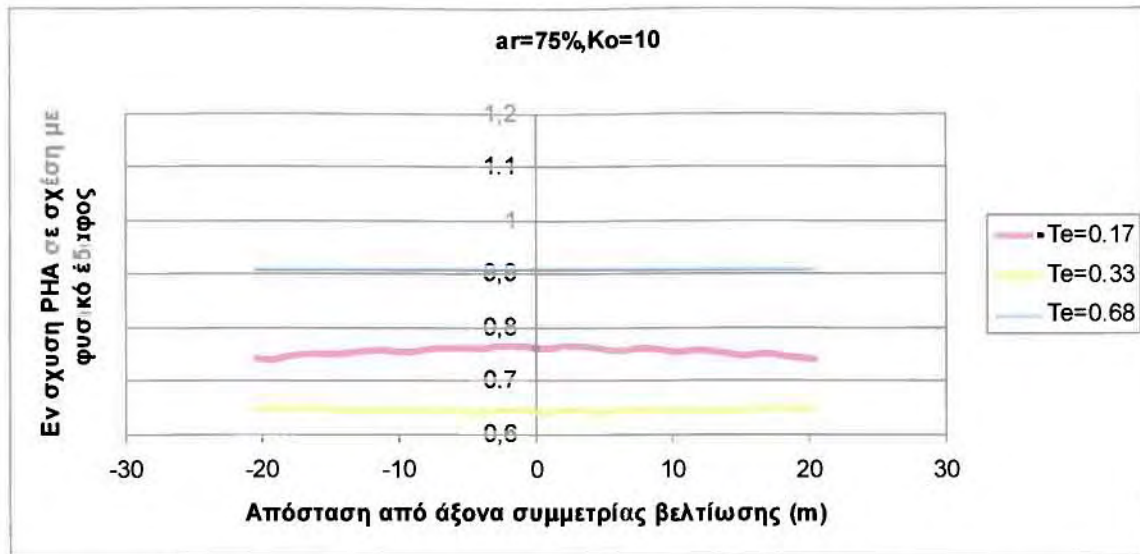
Σχήμα 4.42: Επίδραση δεσπόζουσας περιόδου T_e (sec) στην ενίσχυση λόγω βελτίωσης της μέγιστης σεισμικής επιτάχυνσης στην επιφάνεια του εδάφους, για βελτίωση εδαφικής στρώσης μέχρι το υπόβαθρο ($H_{imp}=H=10m$) με λόγο δυστημσιών $K_o=10$ και ποσοστό αντικατάστασης $a_r=50(\%)$



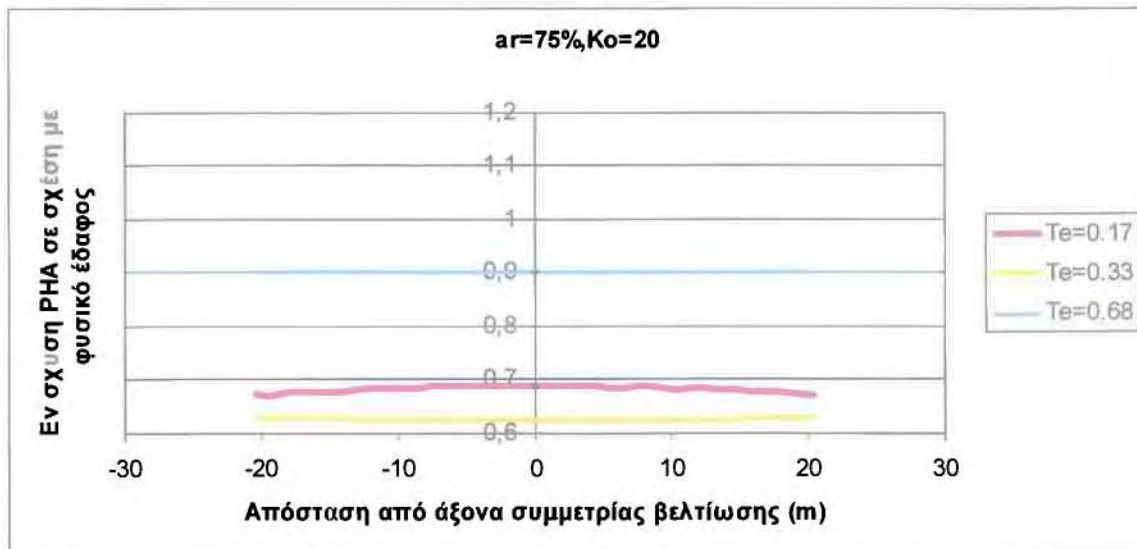
Σχήμα 4.43: Επίδραση δεσπόζουσας περιόδου T_e (sec) στην ενίσχυση λόγω βελτίωσης της μέγιστης σεισμικής επιτάχυνσης στην επιφάνεια του εδάφους, για βελτίωση εδαφικής στρώσης μέχρι το υπόβαθρο ($H_{imp}=H=10m$) με λόγο δυσμησιών $K_0=20$ και ποσοστό αντικατάστασης $a_r=50(\%)$



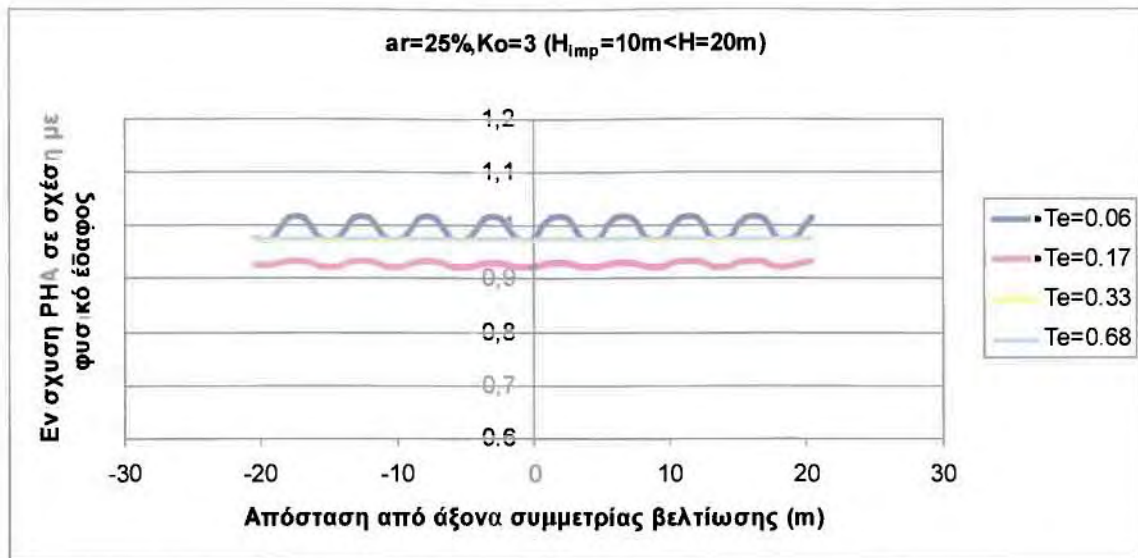
Σχήμα 4.44: Επίδραση δεσπόζουσας περιόδου T_e (sec) στην ενίσχυση λόγω βελτίωσης της μέγιστης σεισμικής επιτάχυνσης στην επιφάνεια του εδάφους, για βελτίωση εδαφικής στρώσης μέχρι το υπόβαθρο ($H_{imp}=H=10m$) με λόγο δυσμησιών $K_0=3$ και ποσοστό αντικατάστασης $a_r=75(\%)$



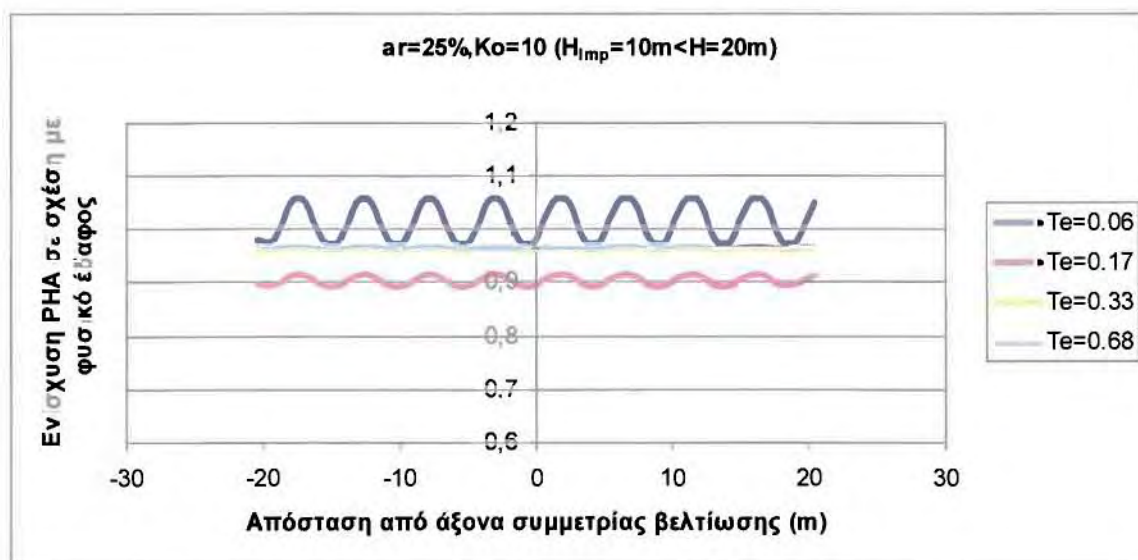
Σχήμα 4.45: Επίδραση δεσπόζουσας περιόδου T_e (sec) στην ενίσχυση λόγω βελτίωσης της μέγιστης σεισμικής επιτάχυνσης στην επιφάνεια του εδάφους, για βελτίωση εδαφικής στρώσης μέχρι το υπόβαθρο ($H_{imp}=H=10m$) με λόγο δυστημσιών $K_o=10$ και ποσοστό αντικατάστασης $a_r=75(\%)$



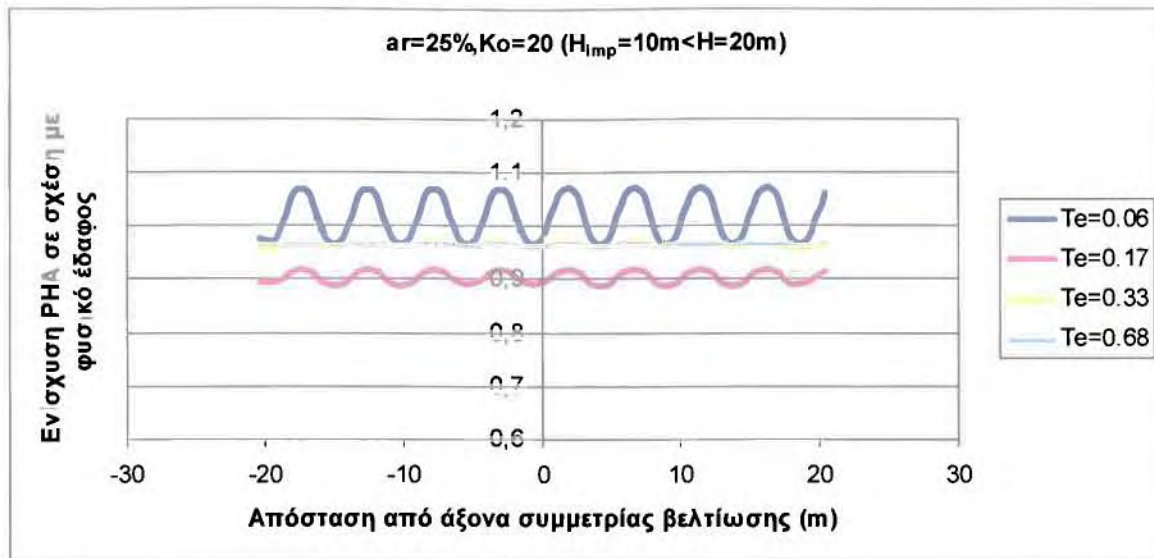
Σχήμα 4.46: Επίδραση δεσπόζουσας περιόδου T_e (sec) στην ενίσχυση λόγω βελτίωσης της μέγιστης σεισμικής επιτάχυνσης στην επιφάνεια του εδάφους, για βελτίωση εδαφικής στρώσης μέχρι το υπόβαθρο ($H_{mp}=H=10m$) με λόγο δυστημσιών $K_o=20$ και ποσοστό αντικατάστασης $a_r=75(\%)$



Σχήμα 4.47: Επίδραση δεσπόζουσας περιόδου T_e (sec) στην ενίσχυση λόγω βελτίωσης της μέγιστης σεισμικής επιτάχυνσης στην επιφάνεια του εδάφους, για βελτίωση εδαφικής στρώσης μέχρι ($H_{imp}=10m$) σε συνολικό βάθος υποβάθρου ($H=20m$) με λόγο δυσστησιών $K_0=3$ και ποσοστό αντικαταστάσεως $a_r=25(\%)$



Σχήμα 4.48: Επίδραση δεσπόζουσας περιόδου T_e (sec) στην ενίσχυση λόγω βελτίωσης της μέγιστης σεισμικής επιτάχυνσης στην επιφάνεια του εδάφους, για βελτίωση εδαφικής στρώσης μέχρι ($H_{imp}=10m$) σε συνολικό βάθος υποβάθρου ($H=20m$) με λόγο δυσστησιών $K_0=10$ και ποσοστό αντικαταστάσεως $a_r=25(\%)$

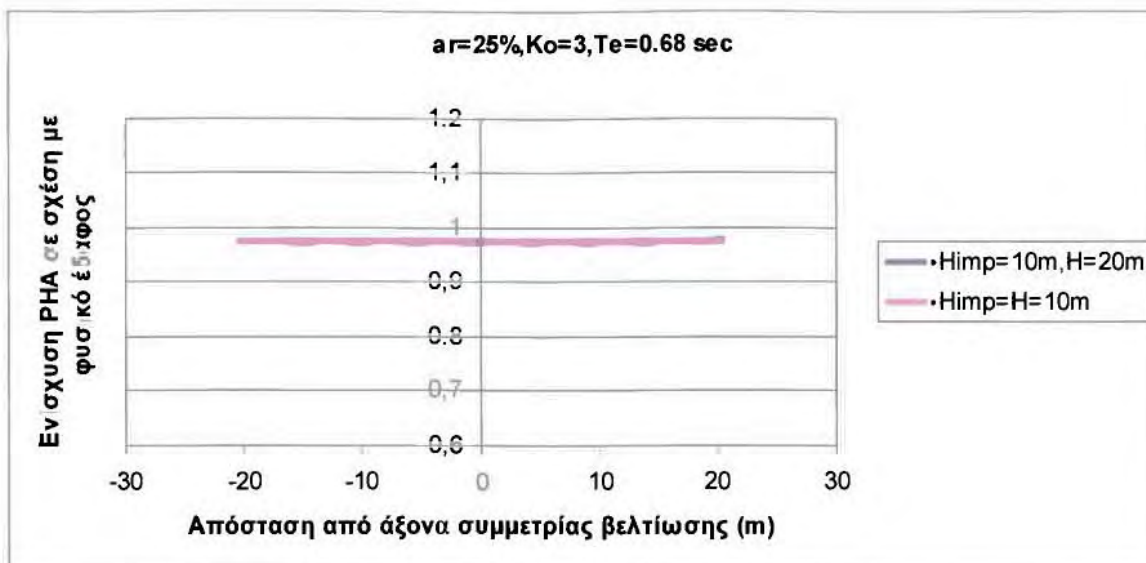


Σχήμα 4.49: Επίδραση δεσπόζουσας περιόδου T_e (sec) στην ενίσχυση λόγω βελτίωσης της μέγιστης σεισμικής επιτάχυνσης στην επιφάνεια του εδάφους, για βελτίωση εδαφικής στρώσης μέχρι ($H_{imp}=10m$) σε συνολικό βάθος υποβάθρου ($H=20m$) με λόγο δυστημσιών $K_o=20$ και ποσοστό αντικαταστάσεως $a_r=25(\%)$

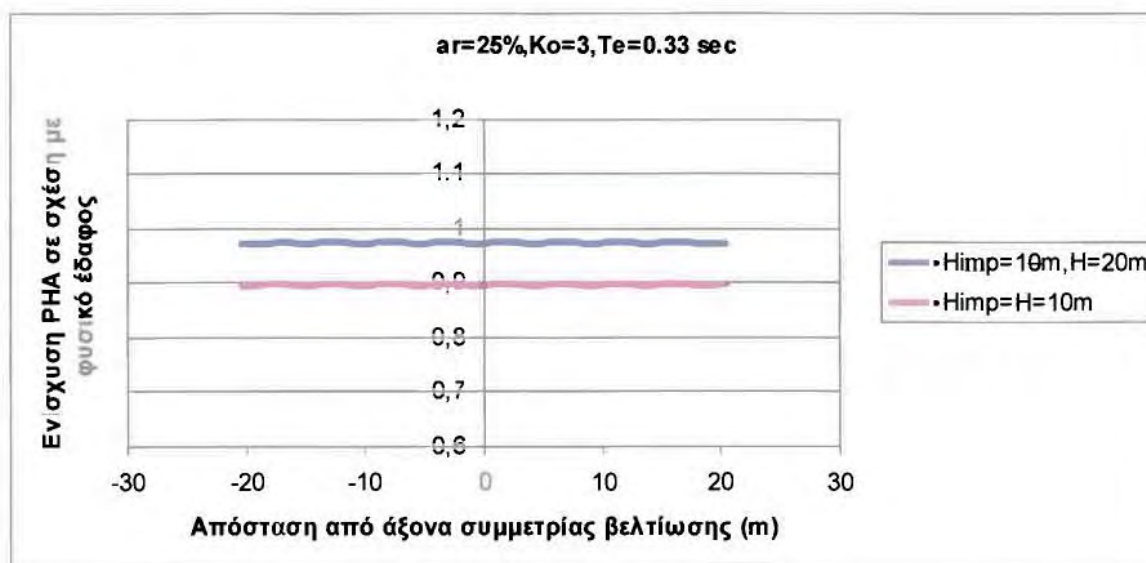
4.5 Επίδραση βάθους βελτίωσης

Στην τελευταία παράγραφο αυτού του κεφαλαίου παρουσιάζονται τα διαγράμματα επίδρασης του βάθους βελτίωσης, για βελτίωση εδαφικής στρώσης μέχρι το υπόβαθρο ($H_{imp}=H=10m$) και για βελτίωση εδαφικής στρώσης $H_{imp}=10m$ σε έδαφος βάθους $H=20m$ στην ενίσχυση της μέγιστης σεισμικής επιτάχυνσης στην επιφάνεια του εδάφους (Σχήματα 4.50 έως 4.61). Πιο συγκεκριμένα η παρουσίαση των Σχημάτων γίνεται με βάση το λόγο δυστησιών K_o , δηλαδή στα Σχήματα 4.50 έως 4.53 για $K_o=3$, στα Σχήματα 4.54 έως 4.57 για $K_o=10$ και στα Σχήματα 4.58 έως 4.61 για $K_o=20$. Από τα διαγράμματα που ακολουθούν αυτά που συμπεραίνουμε συνοψίζονται ως:

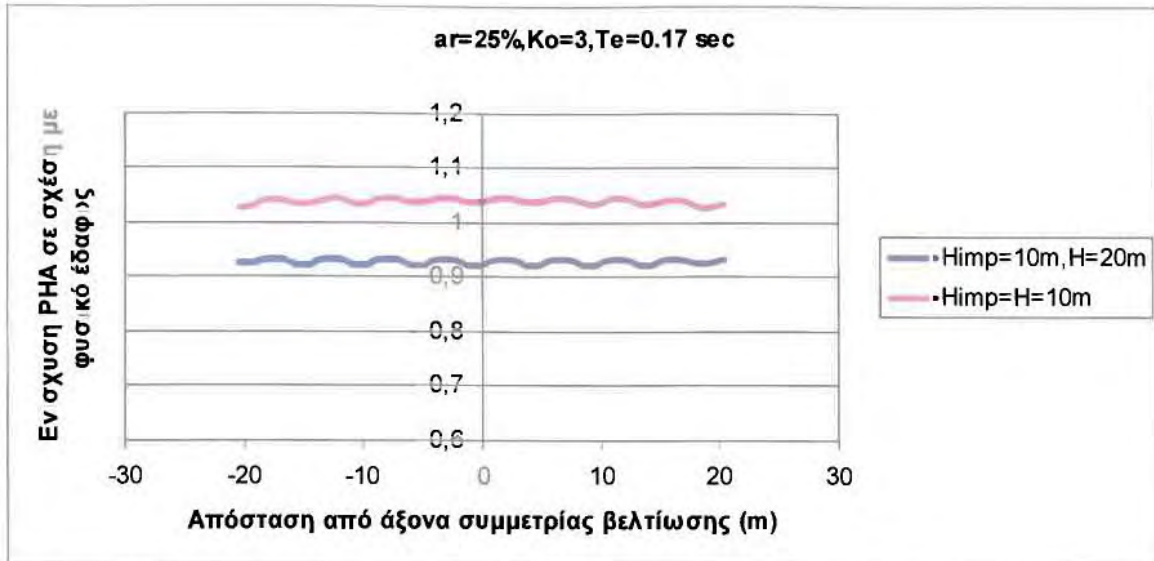
- Για ποσοστό αντικατάστασης $a_r=25\%$, λόγους δυστησιών $K_o=3, 10$ και 20 και χαμηλόσυχνες δεσπόζουσες περιόδους $T_e=0.68$ και 0.33 sec η βελτίωση απομειώνει τη σεισμική κίνηση στην επιφάνεια και στις δύο γεωμετρίες βελτίωσης. Πιο συγκεκριμένα, για δεσπόζουσα περίοδο ίση με $T_e=0.68$ sec η ενίσχυση σε σχέση με το φυσικό έδαφος είναι πρακτικώς ίδια. Για δεσπόζουσα περίοδο ίση με $T_e=0.33$ sec οι ενισχύσεις είναι σαφώς διαφορετικές και μεγαλύτερες στις περιπτώσεις για βελτίωση εδαφικής στρώσης $H_{imp}=10m$ σε έδαφος βάθους $H=20m$ (Σχήματα 4.50, 4.51, 4.54, 4.55, 4.58 και 4.59).
- Τα αποτελέσματα αρχίζουν να διαφοροποιούνται όταν για μια πιο υψίσυχη διέγερση ($T_e=0.17$ sec) και βελτιώσεις με $a_r=25\%$, λόγους δυστησιών $K_o=3, 10$ και 20 και παρατηρείται ενίσχυση σε σχέση με το φυσικό έδαφος για βελτίωση εδαφικής στρώσης μέχρι το υπόβαθρο ($H_{imp}=H=10m$), ενώ για βελτίωση εδαφικής στρώσης $H_{imp}=10m$ σε έδαφος βάθους $H=20m$ η βελτίωση δίνει απομείωση της σεισμικής κίνησης (Σχήματα 4.52, 4.56 και 4.60).
- Τέλος, για ιδιαίτερα υψίσυχη δεσπόζουσα περίοδο $T_e=0.06$ sec και $K_o=10$ και 20 έχουμε ενίσχυση λόγω της βελτίωσης και για τις δύο γεωμετρίες βελτίωσης, με αυτή για ($H_{imp}=H=10m$) να δίνει μεγαλύτερη ενίσχυση σε σχέση με την βελτίωση για εδαφική στρώση $H_{imp}=10m$ σε έδαφος βάθους $H=20m$. Αντιθέτως, στην περίπτωση για λόγο δυστησιών $K_o=3$ η βελτίωση δίνει ενίσχυση της σεισμικής κίνησης του εδάφους μόνο για βελτίωση μέχρι το υπόβαθρο ($H_{imp}=H=10m$) (Σχήματα 4.53, 4.57 και 4.61).



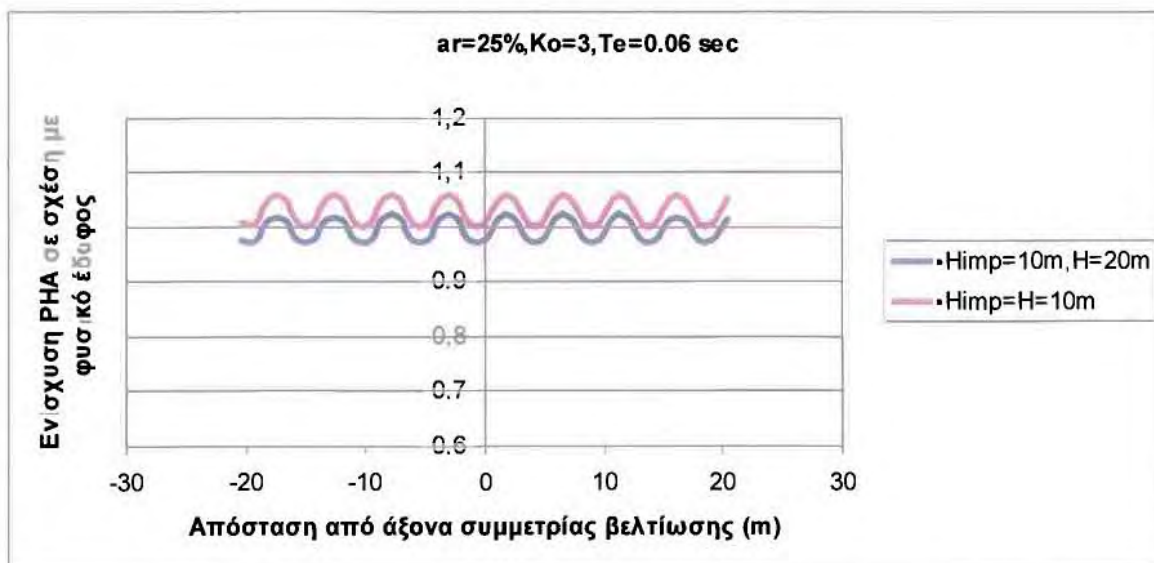
Σχήμα 4.50:Επίδραση βάθους βελτίωσης στην ενίσχυση της μέγιστης σεισμικής επιτάχυνσης στην επιφάνεια του εδάφους, για βελτίωση εδαφικής στρώσης μέχρι το υπόβαθρο ($H_{imp}=H=10m$) και για βελτίωση εδαφικής στρώσης μέχρι ($H_{imp}=10m$) σε συνολικό βάθος υποβάθρου ($H=20m$) με λόγο δυστημσιών $K_o=3$, ποσοστό αντικαταστάσεως $a_r=25(\%)$ και δεσπόζουσα περίοδο διέγερσης $T_c=0.68$ sec



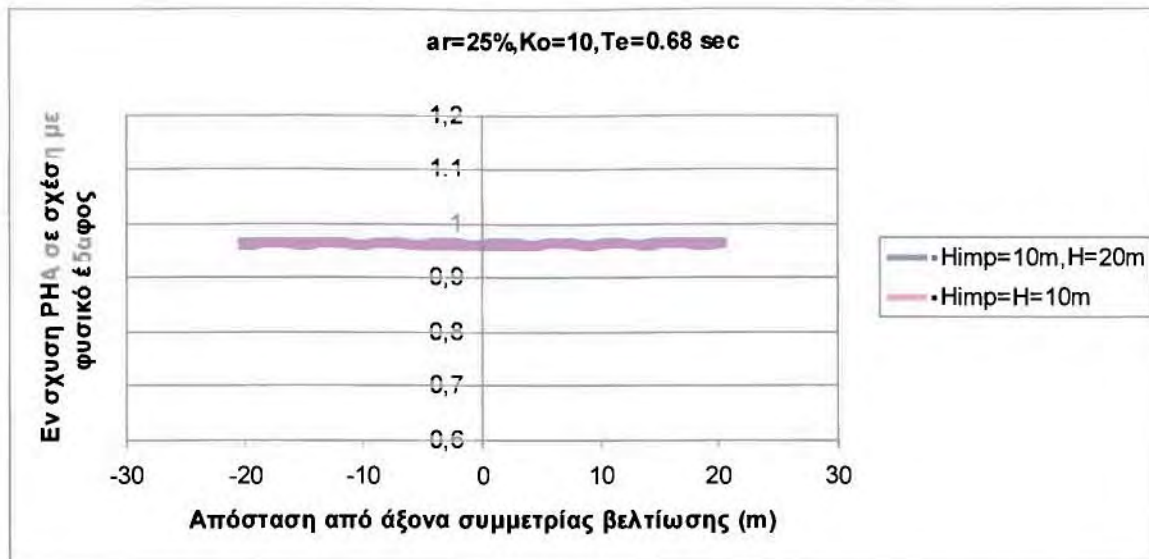
Σχήμα 4.51:Επίδραση βάθους βελτίωσης στην ενίσχυση της μέγιστης σεισμικής επιτάχυνσης στην επιφάνεια του εδάφους, για βελτίωση εδαφικής στρώσης μέχρι το υπόβαθρο ($H_{imp}=H=10m$) και για βελτίωση εδαφικής στρώσης μέχρι ($H_{imp}=10m$) σε συνολικό βάθος υποβάθρου ($H=20m$) με λόγο δυστημσιών $K_o=3$, ποσοστό αντικαταστάσεως $a_r=25(\%)$ και δεσπόζουσα περίοδο διέγερσης $T_c=0.33$ sec



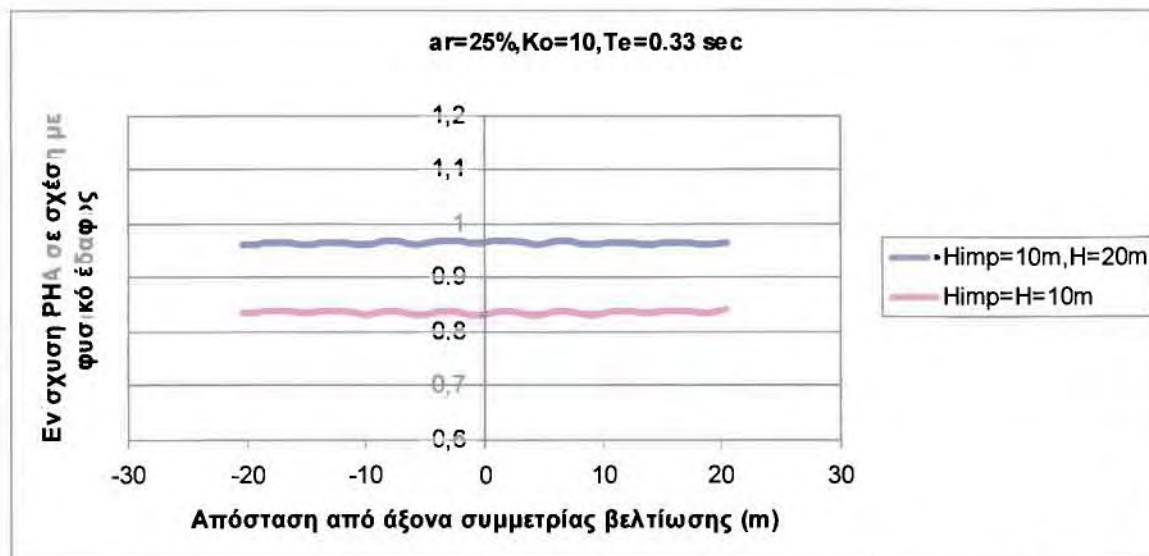
Σχήμα 4.52: Επίδραση βάθους βελτίωσης στην ενίσχυση της μέγιστης σεισμικής επιτάχυνσης στην επιφάνεια του εδάφους, για βελτίωση εδαφικής στρώσης μέχρι το υπόβαθρο ($H_{imp}=H=10m$) και για βελτίωση εδαφικής στρώσης μέχρι ($H_{imp}=10m$) σε συνολικό βάθος υποβάθρου ($H=20m$) με λόγο δυσστημιών $K_o=3$, ποσοστό αντικαταστάσεως $a_r=25(\%)$ και δεσπόζουσα περίοδο διέγερσης $T_e=0.17 \text{ sec}$



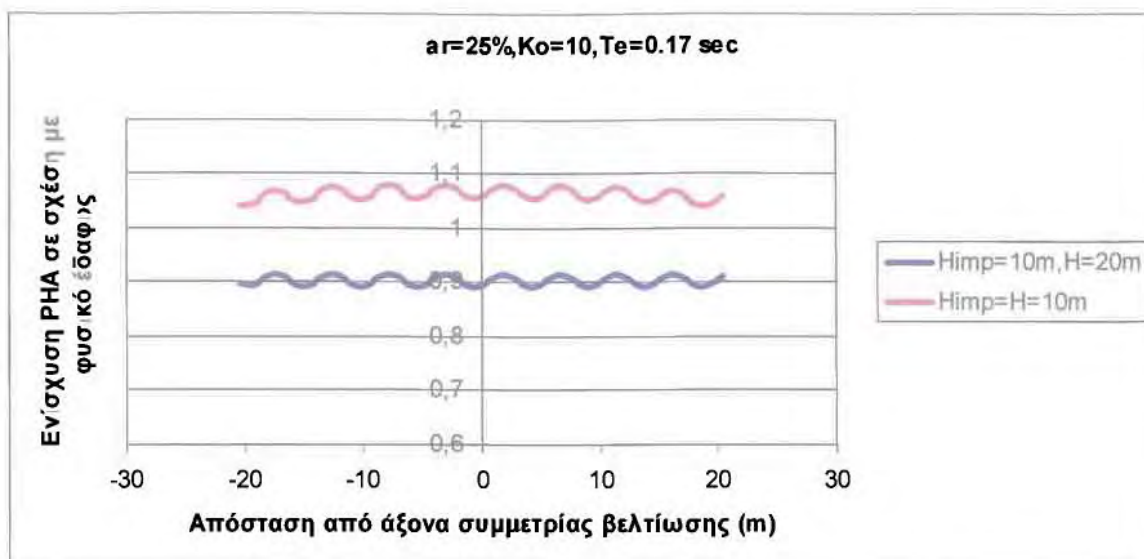
Σχήμα 4.53: Επίδραση βάθους βελτίωσης στην ενίσχυση της μέγιστης σεισμικής επιτάχυνσης στην επιφάνεια του εδάφους, για βελτίωση εδαφικής στρώσης μέχρι το υπόβαθρο ($H_{imp}=H=10m$) και για βελτίωση εδαφικής στρώσης μέχρι ($H_{imp}=10m$) σε συνολικό βάθος υποβάθρου ($H=20m$) με λόγο δυσστημιών $K_o=3$, ποσοστό αντικαταστάσεως $a_r=25(\%)$ και δεσπόζουσα περίοδο διέγερσης $T_e=0.06 \text{ sec}$



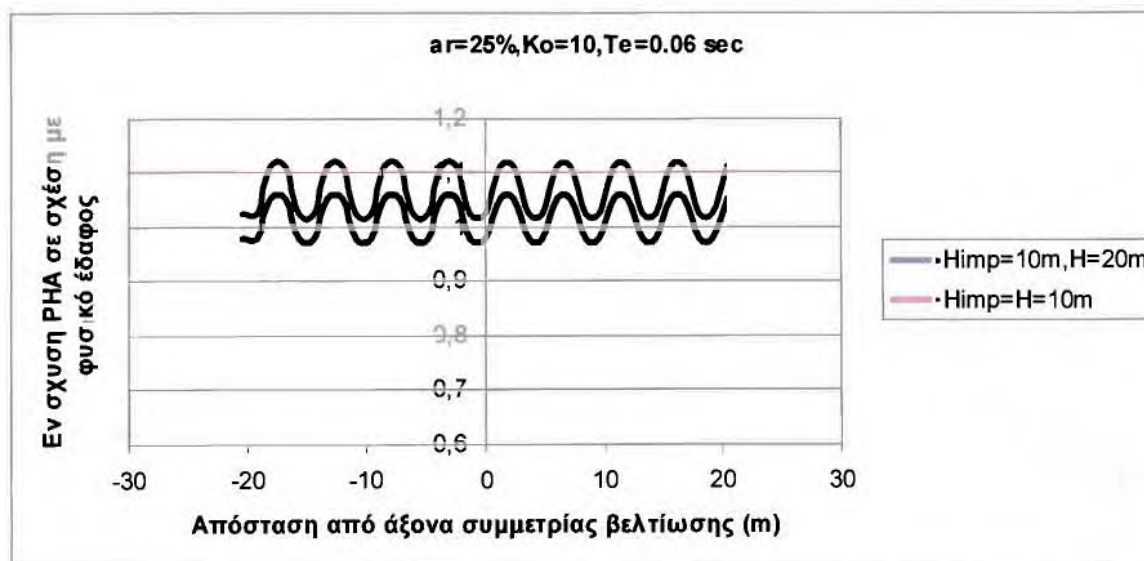
Σχήμα 4.54: Επίδραση βάθους βελτίωσης στην ενίσχυση της μέγιστης σεισμικής επιτάχυνσης στην επιφάνεια του εδάφους, για βελτίωση εδαφικής στρώσης μέχρι το υπόβαθρο ($H_{imp}=H=10m$) και για βελτίωση εδαφικής στρώσης μέχρι ($H_{imp}=10m$) σε συνολικό βάθος υποβάθρου ($H=20m$) με λόγο δυστημσιών $K_0=10$, ποσοστό αντικαταστάσεως $a_T=25(\%)$ και δεσπόζουσα περίοδο διέγερσης $T_e=0.68$ sec



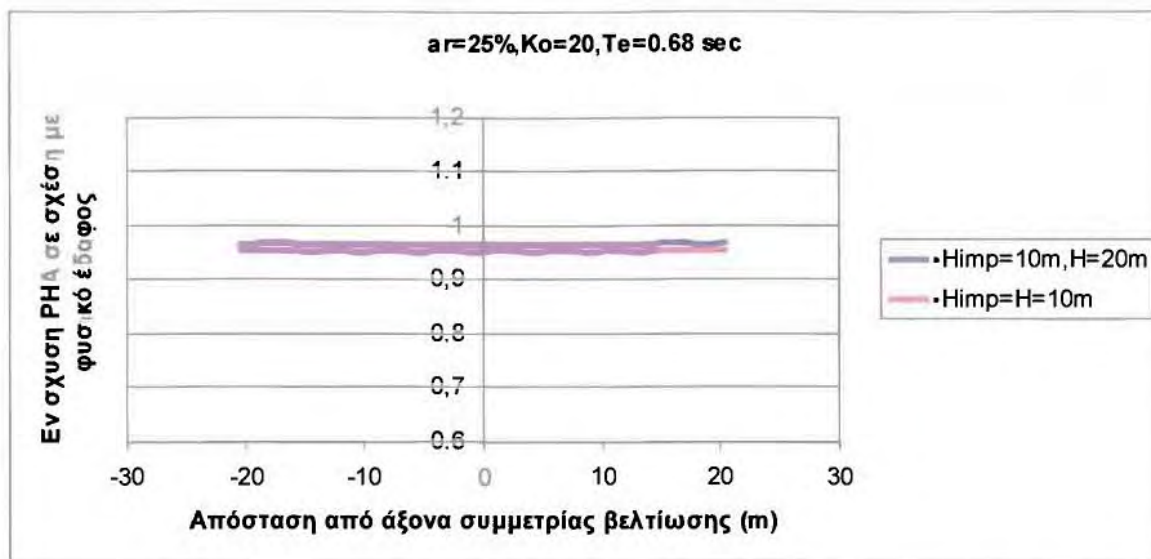
Σχήμα 4.55: Επίδραση βάθους βελτίωσης στην ενίσχυση της μέγιστης σεισμικής επιτάχυνσης στην επιφάνεια του εδάφους, για βελτίωση εδαφικής στρώσης μέχρι το υπόβαθρο ($H_{imp}=H=10m$) και για βελτίωση εδαφικής στρώσης μέχρι ($H_{imp}=10m$) σε συνολικό βάθος υποβάθρου ($H=20m$) με λόγο δυστημσιών $K_0=10$, ποσοστό αντικαταστάσεως $a_T=25(\%)$ και δεσπόζουσα περίοδο διέγερσης $T_e=0.33$ sec



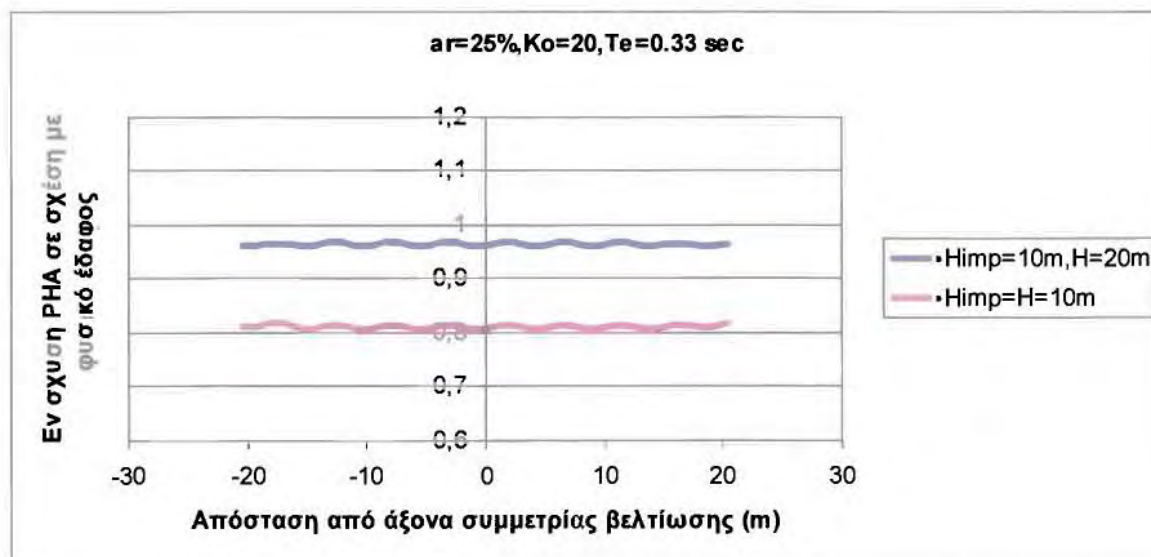
Σχήμα 4.56: Επίδραση βάθους βελτίωσης στην ενίσχυση της μέγιστης σεισμικής επιτάχυνσης στην επιφάνεια του εδάφους, για βελτίωση εδαφικής στρώσης μέχρι το υπόβαθρο ($H_{imp}=H=10m$) και για βελτίωση εδαφικής στρώσης μέχρι ($H_{imp}=10m$) σε συνολικό βάθος υποβάθρου ($H=20m$) με λόγο δυσστημιών $K_0=10$, ποσοστό αντικαταστάσεως $a_r=25(\%)$ και δεσπόζουσα περίοδο διέγερσης $T_e=0.17$ sec



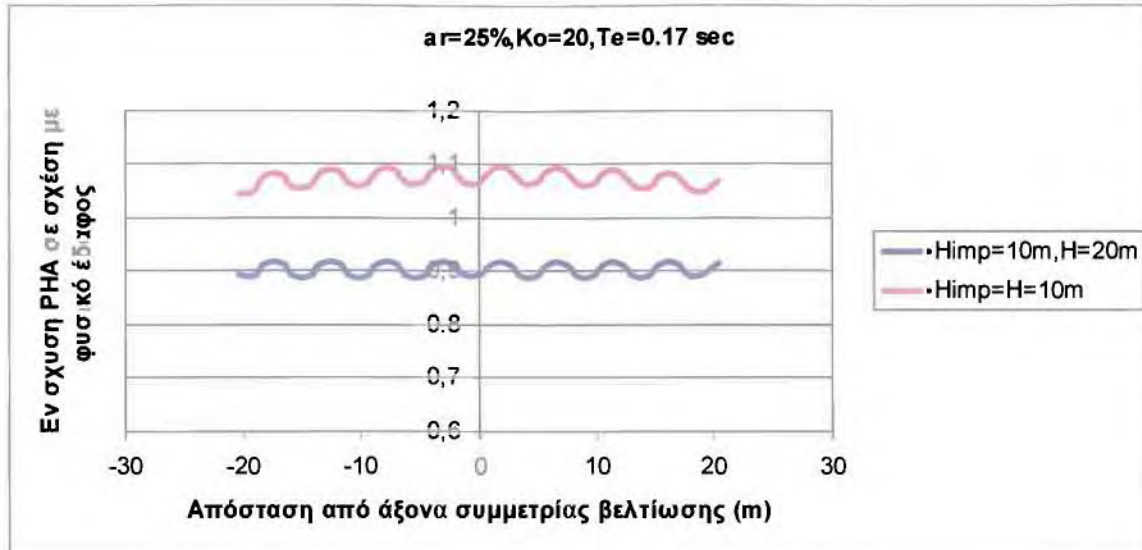
Σχήμα 4.57: Επίδραση βάθους βελτίωσης στην ενίσχυση της μέγιστης σεισμικής επιτάχυνσης στην επιφάνεια του εδάφους, για βελτίωση εδαφικής στρώσης μέχρι το υπόβαθρο ($H_{imp}=H=10m$) και για βελτίωση εδαφικής στρώσης μέχρι ($H_{imp}=10m$) σε συνολικό βάθος υποβάθρου ($H=20m$) με λόγο δυσστημιών $K_0=10$, ποσοστό αντικαταστάσεως $a_r=25(\%)$ και δεσπόζουσα περίοδο διέγερσης $T_e=0.06$ sec



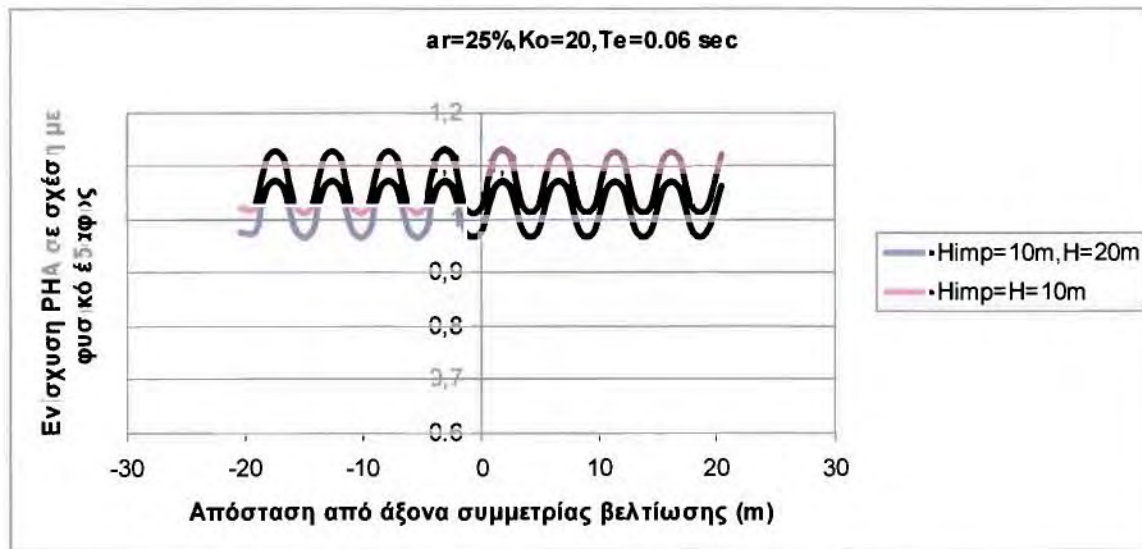
Σχήμα 4.58: Επίδραση βάθους βελτίωσης στην ενίσχυση της μέγιστης σεισμικής επιτάχυνσης στην επιφάνεια του εδάφους, για βελτίωση εδαφικής στρώσης μέχρι το υπόβαθρο ($H_{imp}=H=10m$) και για βελτίωση εδαφικής στρώσης μέχρι ($H_{imp}=10m$) σε συνολικό βάθος υποβάθρου ($H=20m$) με λόγο δυσστησιών $K_o=20$, ποσοστό αντικαταστάσεως $a_r=25(\%)$ και δεσπόζουσα περίοδο διέγερσης $T_e=0.68$ sec



Σχήμα 4.59: Επίδραση βάθους βελτίωσης στην ενίσχυση της μέγιστης σεισμικής επιτάχυνσης στην επιφάνεια του εδάφους, για βελτίωση εδαφικής στρώσης μέχρι το υπόβαθρο ($H_{imp}=H=10m$) και για βελτίωση εδαφικής στρώσης μέχρι ($H_{imp}=10m$) σε συνολικό βάθος υποβάθρου ($H=20m$) με λόγο δυσστησιών $K_o=20$, ποσοστό αντικαταστάσεως $a_r=25(\%)$ και δεσπόζουσα περίοδο διέγερσης $T_e=0.33$ sec



Σχήμα 4.60: Επίδραση βάθους βελτίωσης στην ενίσχυση της μέγιστης σεισμικής επιτάχυνσης στην επιφάνεια του εδάφους, για βελτίωση εδαφικής στρώσης μέχρι το υπόβαθρο ($H_{imp}=H=10m$) και για βελτίωση εδαφικής στρώσης μέχρι ($H_{imp}=10m$) σε συνολικό βάθος υποβάθρου ($H=20m$) με λόγο δυστημσιών $K_0=20$, ποσοστό αντικαταστάσεως $a_r=25(\%)$ και δεσπόζουσα περίοδο διέγερσης $T_e=0.17$ sec



Σχήμα 4.61: Επίδραση βάθους βελτίωσης στην ενίσχυση της μέγιστης σεισμικής επιτάχυνσης στην επιφάνεια του εδάφους, για βελτίωση εδαφικής στρώσης μέχρι το υπόβαθρο ($H_{imp}=H=10m$) και για βελτίωση εδαφικής στρώσης μέχρι ($H_{imp}=10m$) σε συνολικό βάθος υποβάθρου ($H=20m$) με λόγο δυστημσιών $K_0=20$, ποσοστό αντικαταστάσεως $a_r=25(\%)$ και δεσπόζουσα περίοδο διέγερσης $T_e=0.06$ sec

Κεφάλαιο 5

ΔΥΝΑΜΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΙΣΟΔΥΝΑΜΑ-ΟΜΟΙΟΜΟΡΦΟΥ ΒΕΛΤΙΩΜΕΝΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ

5.1 Γενικά

Στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάστηκαν και σχολιάστηκαν τα αποτελέσματα από 58 αναλύσεις σεισμικής απόκρισης βελτιωμένου εδάφους. Ένα βασικό χαρακτηριστικό όλων είναι ότι παρουσιάζουν μικρή διαφοροποίηση στην ενίσχυση στην επιφάνεια του βελτιωμένου εδάφους και συνεπώς μπορούν να προσομοιωθούν επαρκώς με 1Δ αναλύσεις αρκεί να είναι γνωστά τα δυναμικά χαρακτηριστικά αυτού του ισοδύναμα-ομοιόμορφου βελτιωμένου εδάφους. Αυτός είναι ο στόχος του Κεφαλαίου 5 και στην παρούσα παράγραφο παρουσιάζεται η διαδικασία αυτής της ανάλυσης. Πιο συγκεκριμένα, όπως αναφερθήρηκε στην παράγραφο 2.4 έχουν προταθεί δύο αναλυτικές σχέσεις για τον προσδιορισμό του ισοδύναμου μέτρου διάτμησης, η πρώτη μέσω της ισοδυναμίας των διατμητικών παραμορφώσεων γ στο φυσικό έδαφος και στον πάσσαλο βελτίωσης (σχέση 2.10) και η δεύτερη μέσω της ισοδυναμίας των διατμητικών τάσεων τ στο φυσικό έδαφος και στον πάσσαλο βελτίωσης (σχέση 2.13).

Για να διακριβωθεί ποιά από τις δύο σχέσεις είναι πιο κατάλληλη για χρήση σε 1Δ αναλύσεις σεισμικής απόκρισης του ισοδύναμα-ομοιόμορφου βελτιωμένου εδάφους γίνονται επαναληπτικές αριθμητικές αναλύσεις (διαδικασία trial and error) μέχρις επίτευξης ταύτισης των αποτελεσμάτων τους με την "μέση" απόκριση του βελτιωμένου εδάφους. Πιο συγκεκριμένα, για την επίδειξη της διαδικασίας η έμφαση δίνεται στο τυπικό παράδειγμα βελτιωμένου εδάφους που παρουσιάστηκε στην παράγραφο 4.1. Σε αυτό το σημείο κρίνεται σκόπιμο να υπενθυμίσουμε τις δύο

αναλυτικές σχέσεις, όπου για την περίπτωση της ισότητας των διατμητικών παραμορφώσεων γ στο φυσικό έδαφος και τον πάσσαλο προκύπτει :

$$\bullet \quad G_{eq,o}=G_{\gamma}=G_{s,o}[(1-a_r)+K_o a_r] \quad (5.1)$$

ενώ για ισότητα των διατμητικών τάσεων τ στο φυσικό έδαφος και τον πάσσαλο προκύπτει

$$\bullet \quad G_{eq,o}=G_{\tau}=G_{s,o}[K_o/(a_r+(1-a_r)K_o)] \quad (5.2)$$

και η λογική αυτή αποτυπώνεται και στο Σχήμα 5.3

Ο κάρναβος των αναλύσεων του Σχήματος 5.1 είναι ίδιος με εκείνον του φυσικού εδάφους (βλέπε Σχήμα 4.1) με τη διαφορά στην τιμή της δυσστησίας του ισοδύναμο-ομοιόμορφου βελτιωμένου εδάφους $G_{eq,o}$, η οποία έχει μέγιστη και ελάχιστη τιμή $G_{eq,o}$ ίση με :

- 160 MPa, που αντιστοιχεί στην τιμή $G_{eq,o}=G_{\gamma}$ για ισοδύναμο ομοιόμορφο βελτιωμένο έδαφος με χαρακτηριστικά $G_{s,o}=80$ MPa, $K_o=3$, $a_r=50\%$ σύμφωνα με τη σχέση 5.1 $G_{eq,o}=G_{\gamma}=G_{s,o}[(1-a_r)+K_o a_r]$ (ισοδυναμία γ) και
- 120 MPa, που αντιστοιχεί στην τιμή του $G_{eq,o}=G_{\tau}$ για ισοδύναμο ομοιόμορφο βελτιωμένο έδαφος με χαρακτηριστικά $G_{s,o}=80$ MPa, $K_o=3$, $a_r=50\%$ σύμφωνα με τη σχέση 5.2 $G_{eq,o}=G_{\tau}=G_{s,o}[K_o/(a_r+(1-a_r)K_o)]$ (ισοδυναμία τ)

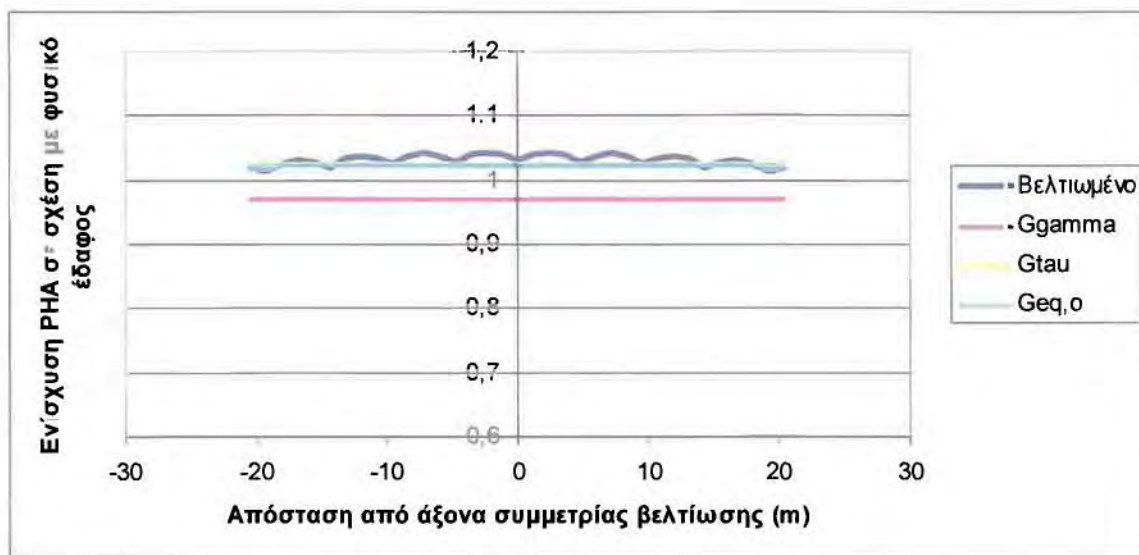


Σχήμα 5.1: Κάρναβος πεπερασμένων διαφορών ισοδύναμο-ομοιόμορφου βελτιωμένου εδάφους για βάθος βελτίωσης $H=10m$ και πλάτους $120m$ 1Δ ανάλυσης (στοιχεία 120×11)

Μετά το πέρας της επαναληπτικής διαδικασίας των αναλύσεων η τιμή του ισοδύναμου μέτρου διάτμησης για την συγκεκριμένη περίπτωση βρέθηκε ίση με $G_{eq}=123MPa$.

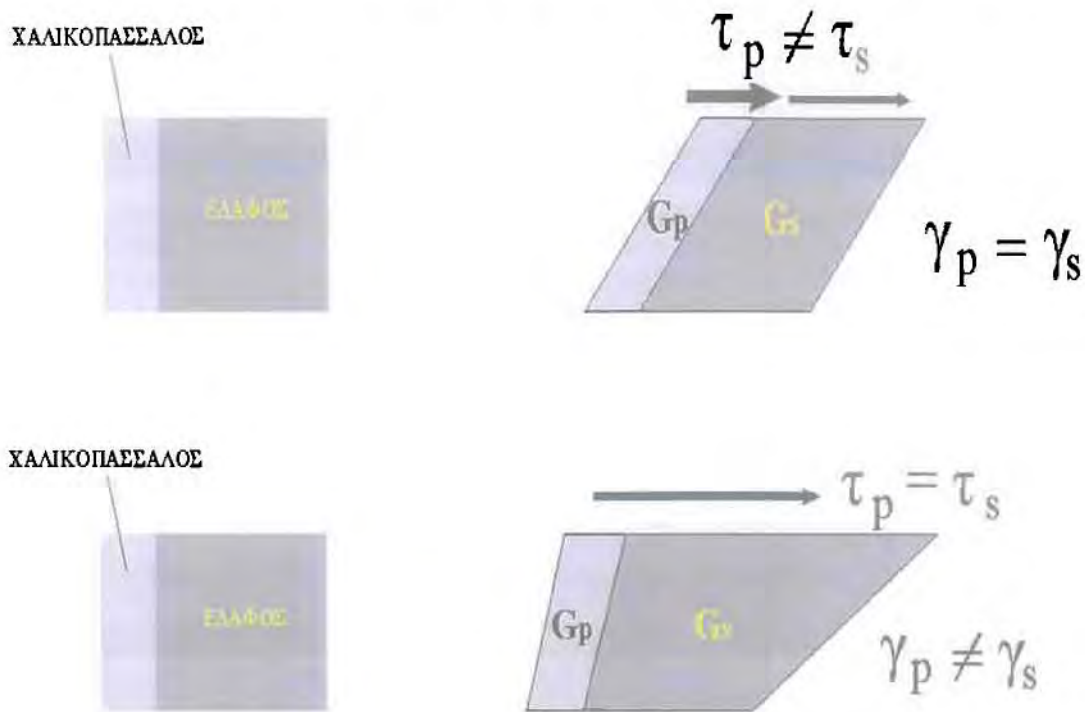
Τα αποτελέσματα των τριών αυτών αναλύσεων συγκρίνονται στο Σχήμα 5.2 με τα αποτελέσματα της 2Δ ανάλυσης σεισμικής απόκρισης για το σύνθετο βελτιωμένο έδαφος που παρουσιάστηκε στη παράγραφο 4.1 με χαρακτηριστικά $G_{s,o}=80$ MPa,

$K_0=3$ και $a_r=50\%$ (βλέπε Σχήμα 4.3). Πιο συγκεκριμένα στο Σχήμα 5.2 η σύγκριση γίνεται σε όρους ενίσχυσης της a_{max} σε σχέση με τη μέγιστη επιτάχυνση κατά μήκος της επιφάνειας του φυσικού εδάφους. Όπως προκύπτει η 1Δ ανάλυση για ένα ισοδύναμα-ομοιόμορφο γεωυλικό του οποίου το μέτρο διάτμησης εκτιμάται μέσω της σχέσεως 5.2 πρακτικώς αναπαράγει τα αποτελέσματα της 2Δ ανάλυσης του σύνθετα βελτιωμένου εδάφους ,που ήταν το ζητούμενο, ενώ η χρήση της σχέσης 5.1 οδηγεί σε λανθασμένες εκτιμήσεις.



Σχήμα 5.2: Σύγκριση αποτελεσμάτων από 1Δ αναλύσεις για ισοδύναμα-ομοιόμορφο βελτιωμένο έδαφος με αποτελέσματα από 2Δ ανάλυση για σύνθετο βελτιωμένο έδαφος σε όρους ενίσχυσης της μέγιστης επιτάχυνσης a_{max} στην επιφάνεια του εδάφους, σε σχέση με το φυσικό για ποσοστό αντικατάστασης $a_r = 50\%$, λόγω δυστησιών $K_0=3$ και δεσπόζουσας περιόδου $T_e = 0.17$ sec

Ουσιαστικά λοιπόν, στο Σχήμα 5.2 παρουσιάζεται ένα παράδειγμα της μεθοδολογίας έμμεσης (επαναληπτικής) εκτίμησης της τιμής του $G_{eq,o}$ για ένα συγκεκριμένο σετ τιμών $G_{s,o}$, K_0 και $a_r(\%)$. Με άλλα λόγια, για κάθε περίπτωση βελτίωσης (δηλαδή για κάθε σετ τιμών $G_{s,o}$, K_0 και a_r) η τιμή του $G_{eq,o}$ μπορεί να εκτιμηθεί επαναλαμβάνοντας την 1Δ ανάλυση σεισμικής απόκρισης ενός ισοδύναμα-ομοιόμορφου εδάφους με μόνη αλλαγή την τιμή του $G_{eq,o}$, έως ότου αυτή αναπαράγει τη "μέση" ενίσχυση που προκύπτει από τα αποτελέσματα της αντίστοιχης 2Δ ανάλυσης σεισμικής απόκρισης του σύνθετου βελτιωμένου εδάφους στην επιφανειά του.



Σχήμα 5.3: Σχηματική απεικόνιση της παραμορφωμένου μοναδιαίου τμήματος βελτίωσης επί τη βάση των παραδοχών ισοδυναμίας σε όρους διατμητικής παραμόρφωσης γ και τάσης τ .

5.2 Δυσστησία ισοδύναμα-ομοιόμορφου βελτιωμένου εδάφους

Ο Πίνακας 5.1 παρουσιάζει τα βασικά δεδομένα (a_r , K_o , T_e , H_{imp} , H_{soil}) των 58 αναλύσεων σεισμικής απόκρισης βελτιωμένου εδάφους που πραγματοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία (βλέπε και Πίνακα 4.1). Επιπλέον όμως, παρουσιάζει και τις τιμές των κάτωθι μεγεθών:

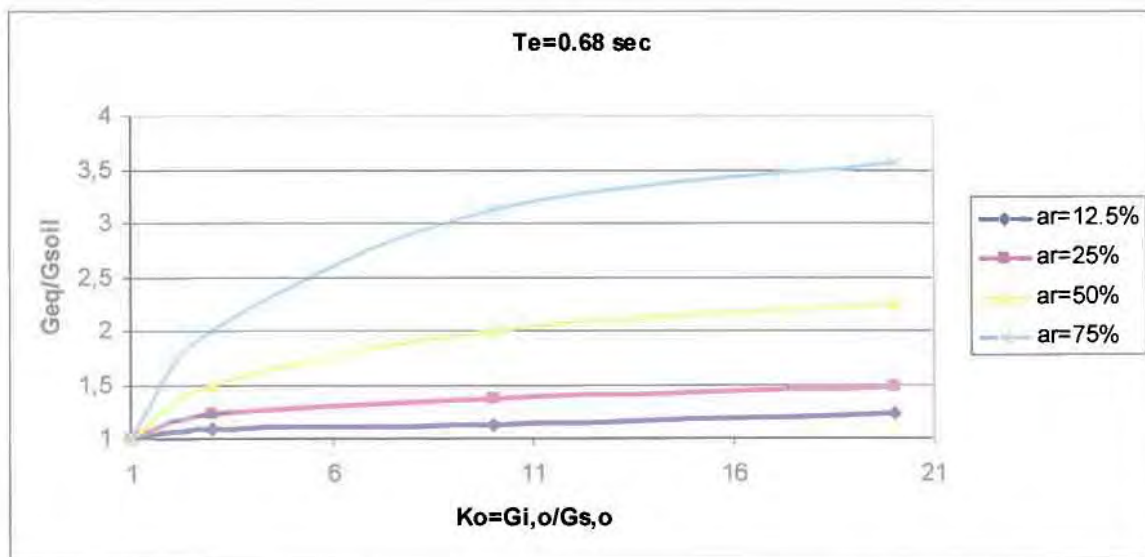
- $G_{\tau\alpha\upsilon}$: είναι η τιμή της δυσστησίας του ισοδύναμα-ομοιόμορφου βελτιωμένου εδάφους με βάση τη σχέση 5.2 που βασίζεται σε θεώρηση ισοδυναμίας τάσεων μεταξύ του εδάφους και του πασσάλου βελτίωσης
- G_{γ} : είναι η τιμή της δυσστησίας του ισοδύναμα-ομοιόμορφου βελτιωμένου εδάφους με βάση τη σχέση 5.1 που βασίζεται σε θεώρηση ισοδυναμίας διατμητικών παραμορφώσεων μεταξύ του εδάφους και του πασσάλου βελτίωσης
- G_{eq} : είναι η τιμή της δυσστησίας του ισοδύναμα-ομοιόμορφου βελτιωμένου εδάφους που υπολογίζεται επαναληπτικά έως ότου να ταυτιστούν τα αποτελέσματα με τη "μέση" απόκριση του βελτιωμένου εδάφους.

Δυναμικά χαρ/κά ισοδύναμα –ομοιόμορφου βελτιωμένου εδάφους

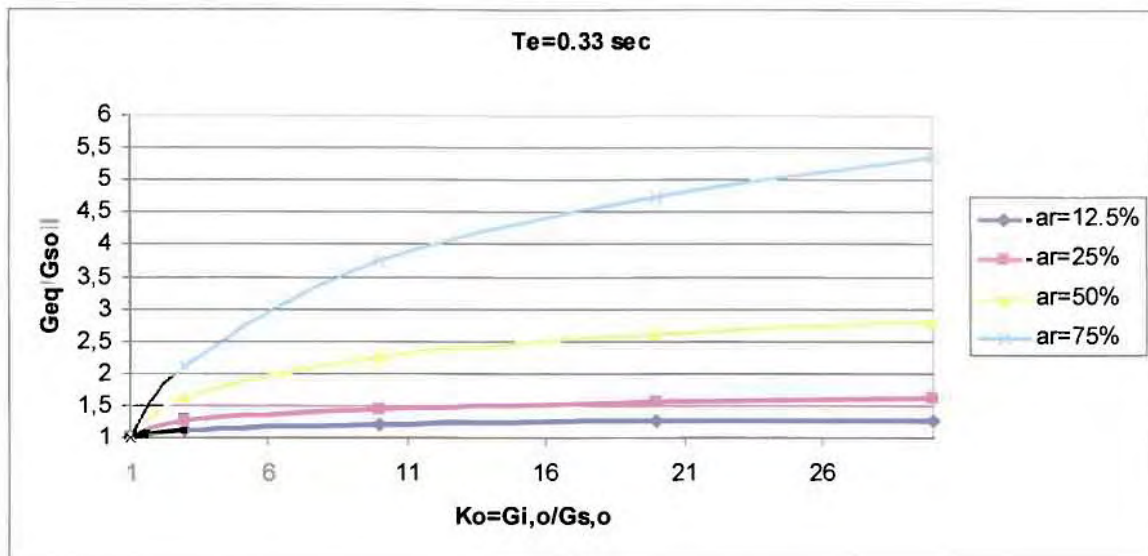
α/α	a _r (%)	K _o	T _e (sec)	H _{imp} (m)	H _{soil} (m)	G _{tau} (MPa)	G _{gamma} (MPa)	G _{eq} (MPa)
1	12,5	3	0,68	10	10	87,27	100	87,272
2	12,5	3	0,33	10	10	87,27	100	89,2
3	12,5	3	0,17	10	10	87,27	100	94
4	12,5	3	0,06	10	10	87,27	100	110
5	12,5	10	0,68	10	10	90,14	170	90,141
6	12,5	10	0,33	10	10	90,14	170	96,4
7	12,5	10	0,17	10	10	90,14	170	105
8	12,5	10	0,06	10	10	90,14	170	110
9	12,5	20	0,68	10	10	90,78	270	98,3
10	12,5	20	0,33	10	10	90,78	270	100
11	12,5	20	0,17	10	10	90,78	270	105
12	12,5	20	0,06	10	10	90,78	270	110
13	12,5	30	0,33	10	10	91,00	370	102
14	25	3	0,68	10	10	96,00	120	98,3
15	25	3	0,33	10	10	96,00	120	99,9
16	25	3	0,17	10	10	96,00	120	96
17	25	3	0,06	10	10	96,00	120	110
18	25	10	0,68	10	10	103,23	260	110
19	25	10	0,33	10	10	103,23	260	116
20	25	10	0,17	10	10	103,23	260	105
21	25	10	0,06	10	10	103,23	260	110
22	25	20	0,68	10	10	104,92	460	118,3
23	25	20	0,33	10	10	104,92	460	125
24	25	20	0,17	10	10	104,92	460	105
25	25	20	0,06	10	10	104,92	460	110
26	25	30	0,33	10	10	105,49	660	130
27	50	3	0,68	10	10	120,00	160	120
28	50	3	0,33	10	10	120,00	160	128,5
29	50	3	0,17	10	10	120,00	160	123
30	50	10	0,68	10	10	145,45	440	160
31	50	10	0,33	10	10	145,45	440	181
32	50	10	0,17	10	10	145,45	440	162
33	50	20	0,68	10	10	152,38	840	180
34	50	20	0,33	10	10	152,38	840	209
35	50	20	0,17	10	10	152,38	840	189
36	50	30	0,33	10	10	154,84	1240	224
37	75	3	0,68	10	10	160,00	200	160
38	75	3	0,33	10	10	160,00	200	169
39	75	3	0,17	10	10	160,00	200	167
40	75	10	0,68	10	10	246,15	620	250
41	75	10	0,33	10	10	246,15	620	301
42	75	10	0,17	10	10	246,15	620	307
43	75	20	0,68	10	10	278,26	1220	285
44	75	20	0,33	10	10	278,26	1220	380
45	75	20	0,17	10	10	278,26	1220	395
46	75	30	0,33	10	10	290,91	1820	428
47	25	3	0,68	10	20	96,00	120	98
48	25	3	0,33	10	20	96,00	120	103
49	25	3	0,17	10	20	96,00	120	96
50	25	3	0,06	10	20	96,00	120	87,1
51	25	10	0,68	10	20	103,23	260	104
52	25	10	0,33	10	20	103,23	260	115
53	25	10	0,17	10	20	103,23	260	101,7
54	25	10	0,06	10	20	103,23	260	87,1
55	25	20	0,68	10	20	104,92	460	105
56	25	20	0,33	10	20	104,92	460	115
57	25	20	0,17	10	20	104,92	460	101,7
58	25	20	0,06	10	20	104,92	460	87,1

Πίνακας 5.1: Συγκεντρωτικός πίνακας δεδομένων και αποτελεσμάτων

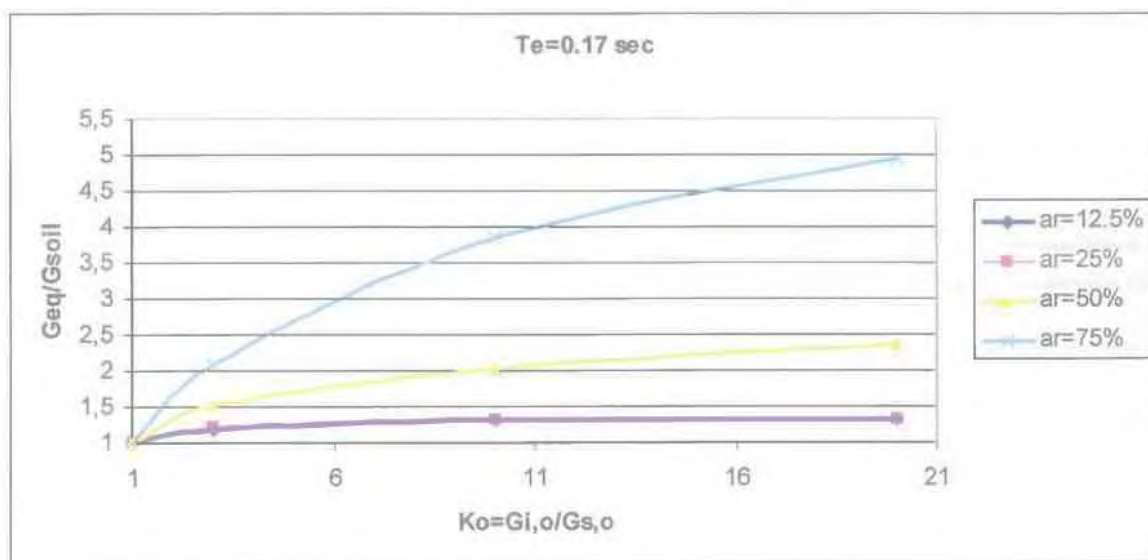
Χάριν καλύτερης εποπτείας, τα αποτελέσματα του Πίνακα 5.1 παρουσιάζονται σε διαγράμματα επίδρασης του λόγου δυστημσιών K_o στην τιμή του λόγου G_{eq}/G_{soil} (Σχήματα 5.4 έως 5.7), για διάφορες τιμές του ποσοστού αντικατάστασης a_r και T_e , ενώ στα Σχήματα 5.8 έως 5.10 τα ίδια αποτελέσματα παρουσιάζονται σε διαγράμματα επιδράσεως του ποσοστού αντικατάστασης a_r , για διάφορες τιμές του K_o και T_e . Όπως προκύπτει από τα Σχήματα 5.4 έως 5.7, ανεξαρτήτως της δεσπόζουσας περιόδου T_e , αύξηση του λόγου δυστημσιών K_o αυξάνει και το λόγο G_{eq}/G_{soil} και η αύξηση αυτή είναι εντονότερη όσο μεγαλύτερο είναι το ποσοστό αντικατάστασης a_r . Πρακτικά αυτό αποτυπώνει πως όσο πιο δύστημτο γίνεται το βελτιωμένο με χαλικοπασσάλους σύνθετο έδαφος, (λόγω αύξησης του K_o και του a_r) τόσο μεγαλύτερο γίνεται και το μέτρο διάτμησης του ισοδύναμου-ομοιόμορφου εδάφους G_{eq} . Αντίστοιχα συμπεράσματα προκύπτουν και από τα Σχήματα 5.8 έως 5.10 όπου παρουσιάζεται η επίδραση του ποσοστού αντικαταστάσεως a_r (%) στην τιμή του λόγου G_{eq}/G_{soil} , όπου πάλι ανεξαρτήτως της δεσπόζουσας περιόδου T_e η αύξηση του ποσοστού αντικατάστασης a_r οδηγεί σε μεγαλύτερες τιμές του λόγου G_{eq}/G_{soil} , και η αύξηση αυτή είναι μεγαλύτερη, όσο μεγαλύτερος είναι ο λόγος δυστημσίας K_o .



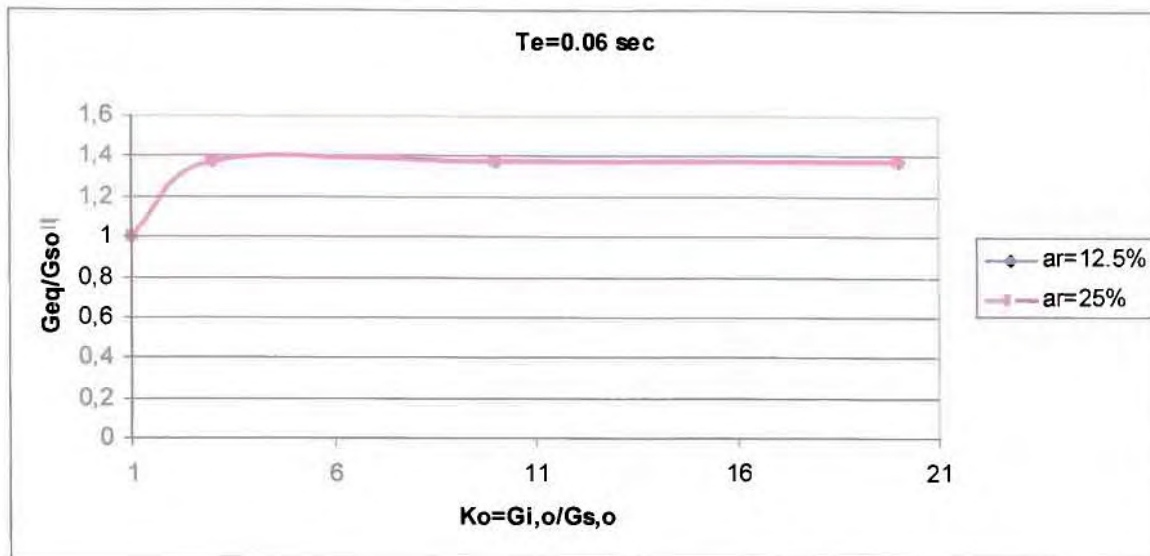
Σχήμα 5.4: Επίδραση του λόγου δυστημσιών K_o στην τιμή του λόγου G_{eq}/G_{soil} για διάφορες τιμές του ποσοστού αντικατάστασης a_r και $T_e=0.68$ sec



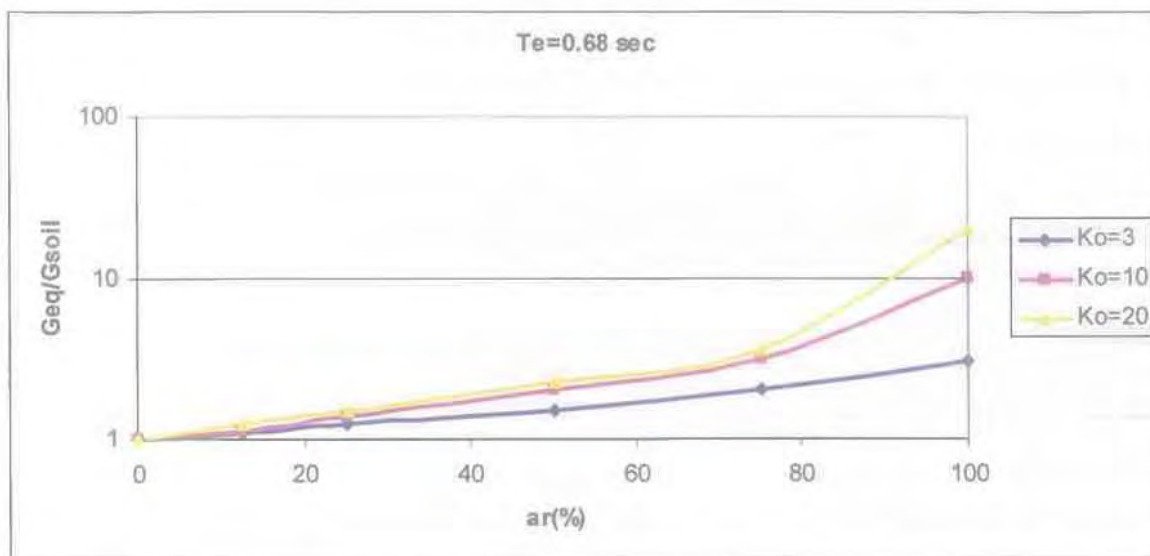
Σχήμα 5.5: Επίδραση του λόγου δυστησιών K_o στην τιμή του λόγου G_{eq}/G_{soil} για διάφορες τιμές του ποσοστού αντικατάστασης a_r και $T_e=0.33$ sec



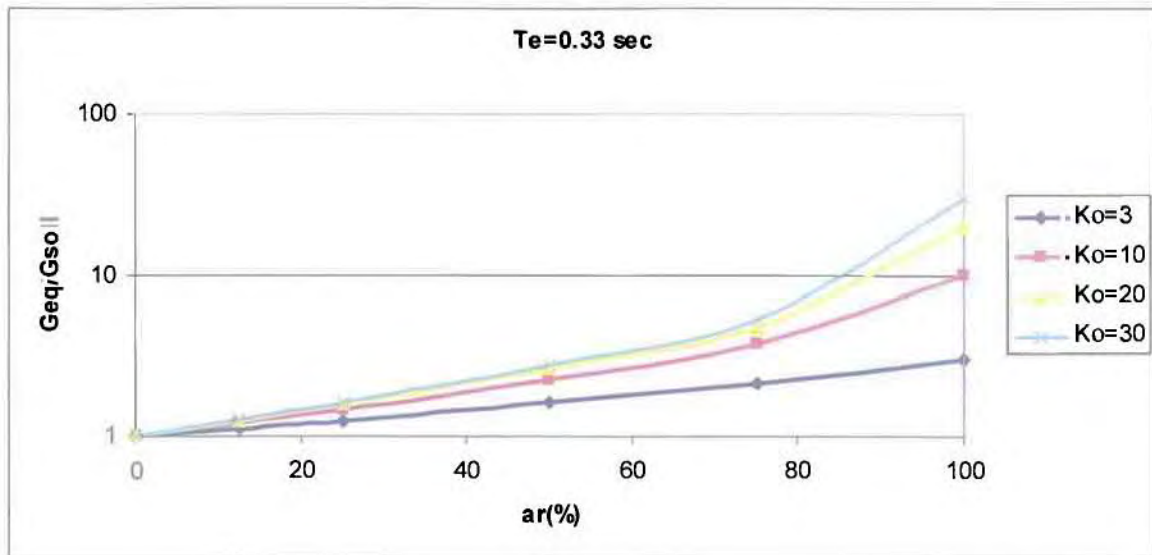
Σχήμα 5.6: Επίδραση του λόγου δυστησιών K_o στην τιμή του λόγου G_{eq}/G_{soil} για διάφορες τιμές του ποσοστού αντικατάστασης a_r και $T_e=0.17$ sec



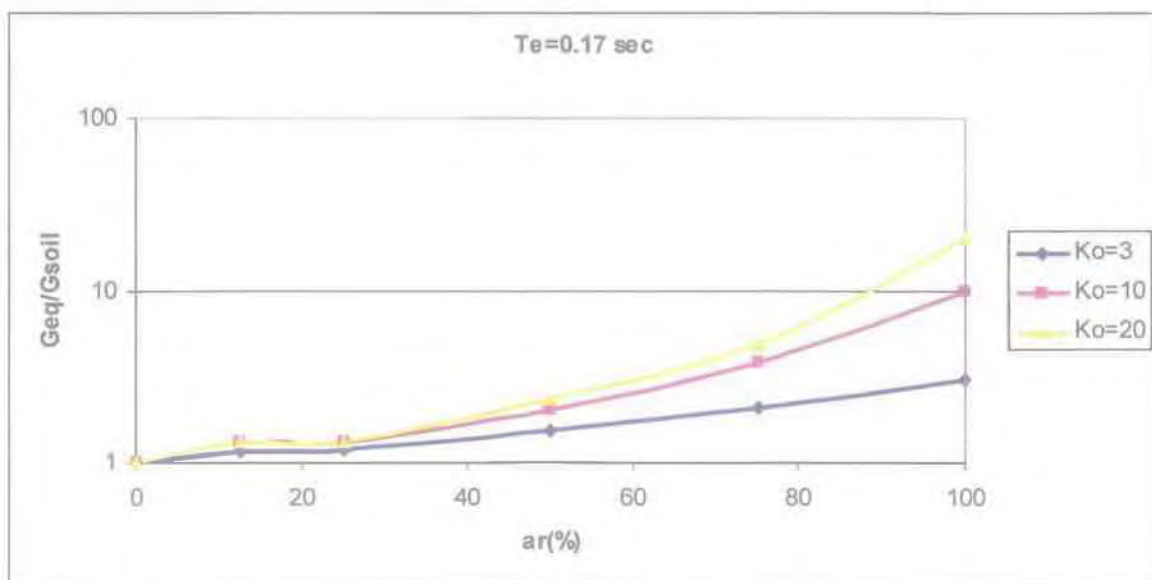
Σχήμα 5.7: Επίδραση του λόγου δυστησιών K_o , στην τιμή του λόγου G_{eq}/G_{soil} για διάφορες τιμές του ποσοστού αντικατάστασης a_r και $T_e = 0.06 \text{ sec}$



Σχήμα 5.8: Επίδραση του ποσοστού αντικατάστασης a_r , στην τιμή του λόγου G_{eq}/G_{soil} για διάφορες τιμές του λόγου δυστησιών K_o και $T_e = 0.68 \text{ sec}$

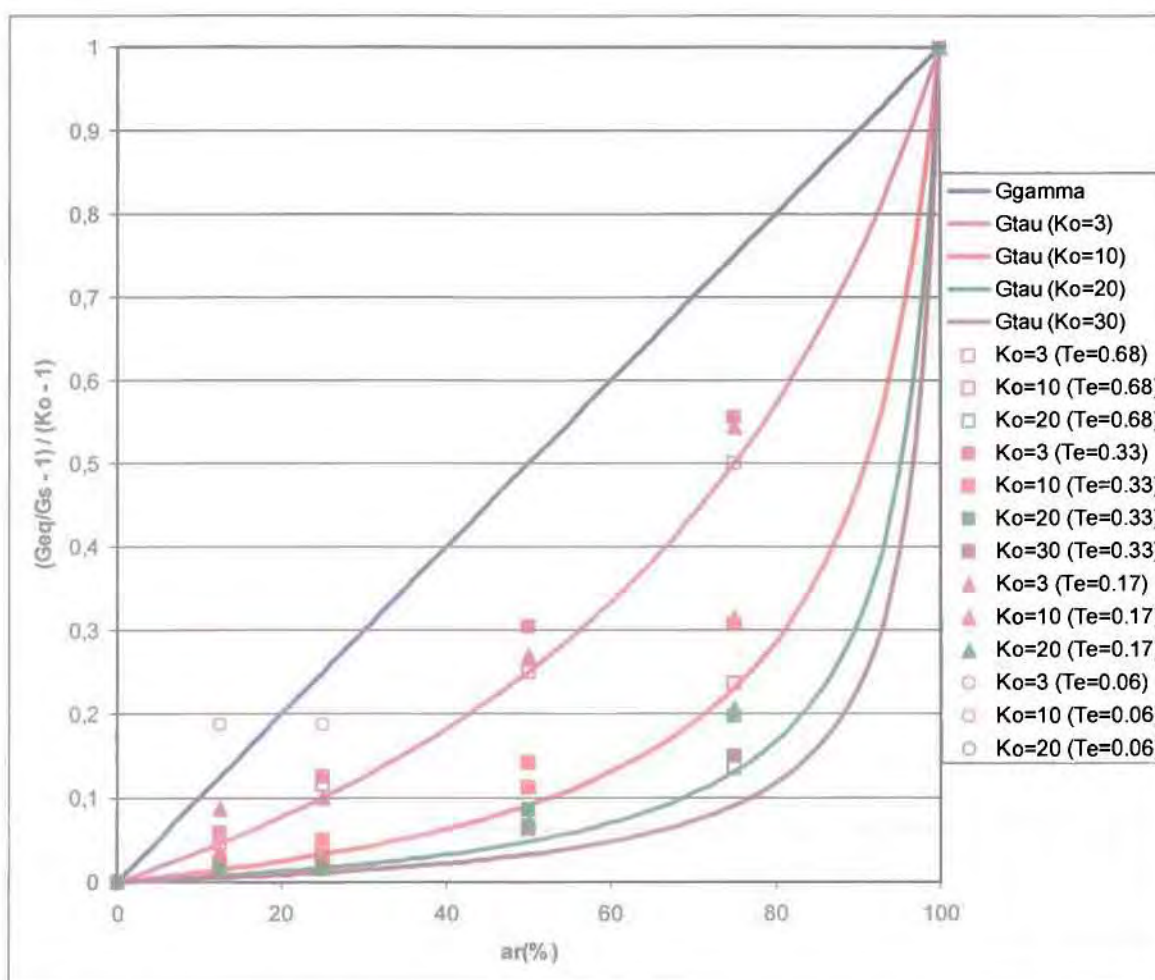


Σχήμα 5.9: Επίδραση του ποσοστού αντικατάστασης a_r , στην τιμή του λόγου G_{eq}/G_{soil} για διάφορες τιμές του λόγου δυστημσιών K_0 και $T_e=0.33$ sec

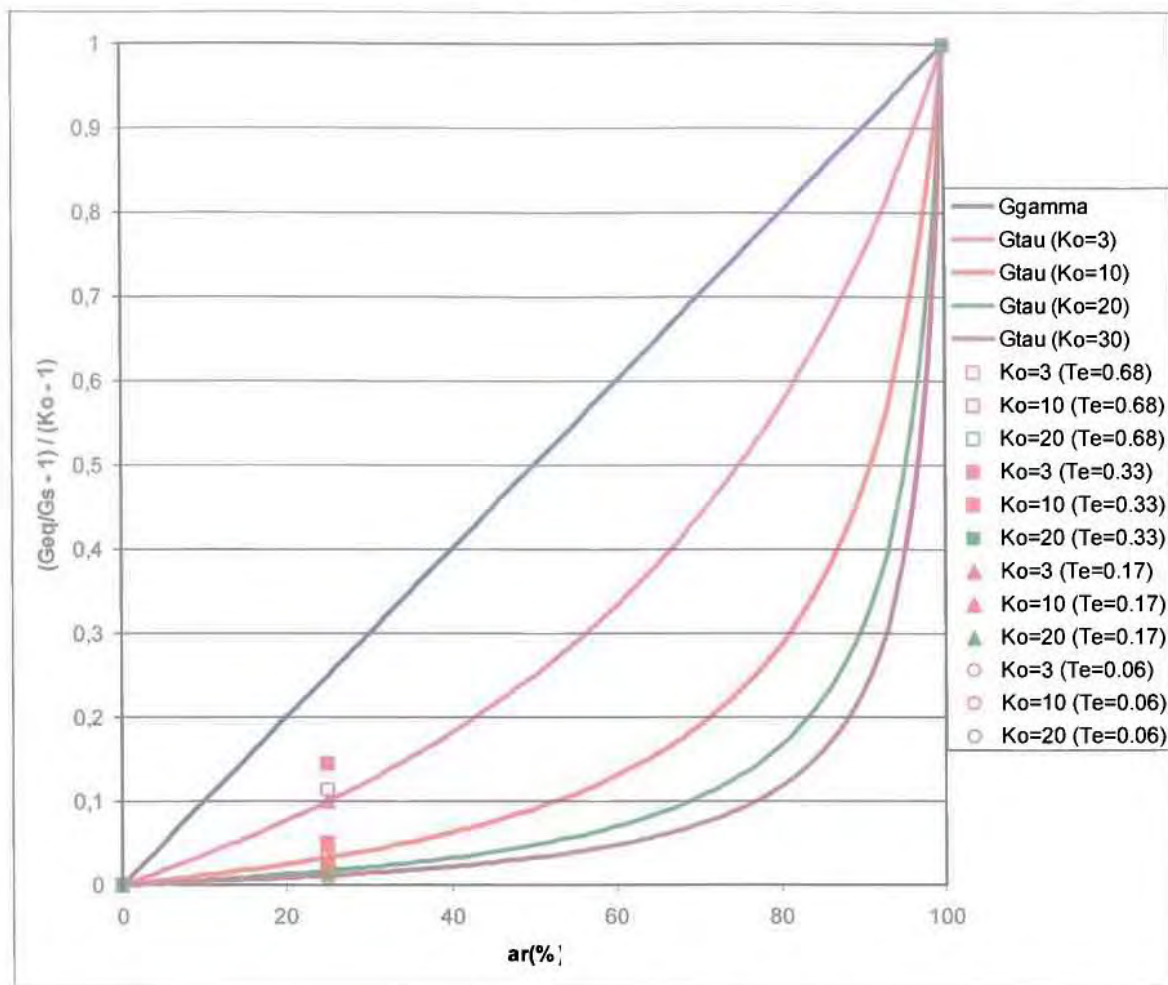


Σχήμα 5.10: Επίδραση του ποσοστού αντικατάστασης a_r , στην τιμή του λόγου G_{eq}/G_{soil} για διάφορες τιμές του λόγου δυστημσιών K_0 και $T_e=0.17$ sec

Για να γίνει πιο εύκολη η εποπτεία και να γίνει δυνατή η συγκεντρωτική παρουσίαση όλων των περιπτώσεων, έχει γίνει αδιαστατοποίηση στον άξονα των Y , της τιμής του $G_{eq,0}$ όχι μόνο ως προς το G_{soil} αλλά και ως προς την τιμή του K_0 ενώ στον άξονα των X βρίσκεται η τιμή του ποσοστού αντικαταστάσεως $a_r(\%)$ κάθε φορά. Έτσι έχουμε στο Σχήμα 5.11 ένα διάγραμμα για τις περιπτώσεις στις οποίες το βάθος βελτίωσης είναι 10 μέτρα και στο Σχήμα 5.12 ένα διάγραμμα για τις περιπτώσεις στις οποίες το βάθος βελτίωσης είναι ίσο με 20 μέτρα.



Σχήμα 5.11: Σύγκριση μεταξύ αριθμητικών εκτιμήσεων του $G_{eq,0}$ και των δύο αναλυτικών προσεγγίσεων αυτού για μεγάλο εύρος μεταβολής του ποσοστού αντικατάστασης σε όρους εμβαδού a_r , του λόγου μεγίστων μέτρων διάτμησης βελτίωσης προς του εδάφους K_0 και της δεσπόζουσας περιόδου της σεισμικής διεγέρσεως (Βάθος καννάβου $H=10m$)



Σχήμα 5.12: Σύγκριση μεταξύ αριθμητικών εκτιμήσεων του $G_{eq,0}$ και των δύο αναλυτικών προσεγγίσεων αυτού για μεγάλο εύρος μεταβολής του ποσοστού αντικατάστασης σε όρους εμβαδού a_r , του λόγου μεγίστων μέτρων διάτμησης βελτίωσης προς του εδάφους K_0 και της δεσπίζουσας περιόδου της σεισμικής διεγέρσεως (Βάθος καννάβου $H=20m$)

Από τα Σχήματα 5.11 και 5.12 συμπεραίνεται ότι για το μεγαλύτερο ποσοστό των περιπτώσεων που διερευνήθηκαν ισχύει η ίδια λογική με το παράδειγμα τυπικής απόκρισης της παραγράφου 5.1, πως η καλύτερη προσέγγιση για την τιμή του G_{eq} γίνεται μέσω της σχέσης 5.2 για ισοδυναμία διατμητικών τάσεων μεταξύ εδάφους και πασσάλου με λίγες εξαιρέσεις που αντιστοιχούν κυρίως σε υψίσυχνες διεγέρσεις.

5.3 Σύγκριση αριθμητικών και αναλυτικών προβλέψεων για την επίδραση της βελτίωσης στη σεισμική απόκριση βελτιωμένων εδαφών

Στην παράγραφο αυτή γίνεται μια προσπάθεια διακρίβωσης της αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων της παρούσας εργασίας, μέσω συγκρίσεών τους με αναλυτικές προβλέψεις. Ως πρώτο μέλημα της παραγράφου αυτής είναι η συσχέτιση της εκτιμηθείσας τιμής της δυστημσίας G_{eq} με την ιδιοπερίοδο ταλάντωσης της βελτιωμένης εδαφικής στήλης T_{imp} . Για την ευχερέστερη αναλυτική εκτίμηση της ιδιοπεριόδου T_{imp} , η έμφαση δίνεται εδώ στις αναλύσεις που αφορούσαν έδαφος με $H=10m$, το οποίο βελτιώθηκε καθολικά μέχρι το βραχώδες υπόβαθρο. Έτσι, στις συγκεκριμένες περιπτώσεις αβαθών εδαφικών στρώσεων, η (πρώτη) ιδιοπερίοδος ταλάντωσης της εδαφικής στήλης μειώνεται από $T_{soil}=4H/V_s=4H/(G_{s,o}/\rho)^{0.5}$ σε $T_{imp}=4H/(G_{eq}/\rho)^{0.5}$, με την τιμή της G_{eq} να εξαρτάται από το ποσοστό αντικατάστασης $a_r(\%)$ και το λόγο δυστημσιών K_o , και όχι από τη δεσπόζουσα περίοδο της διέγερσης T_e (βλέπε παράγραφο 5.2).

Για παράδειγμα, στο Σχήμα 5.13α παρουσιάζεται ένα ενδεικτικό φάσμα απόκρισης στην επιφάνεια του βελτιωμένου εδάφους, ενώ στο Σχήμα 5.13β παρουσιάζεται μια ενδεικτική φασματική ενίσχυση λόγω της βελτίωσης του εδάφους, για την περίπτωση βελτίωσης μια στρώσης εδάφους $T_{soil} = 0.20sec$ με $a_r=25\%$, $K_o=3$ υπό διέγερση με έντονα υψίσυχη δεσπόζουσα περίοδο ($T_e = 0.06sec$). Από το Σχήμα 5.13α επιβεβαιώνεται η δεσπόζουσα περίοδος της διέγερσης στο φάσμα απόκρισης της επιφάνειας του εδάφους, ενώ από το Σχήμα 5.13β προκύπτει η ιδιοπερίοδος της βελτιωμένης στρώσης ίση περίπου με $T_{imp} = 0.17sec$. Για να διερευνηθούν τα ίδια αποτελέσματα για την ίδια βελτίωση της στρώσης υπό διέγερση με έντονα χαμηλόσυχη δεσπόζουσα περίοδο ($T_e = 0.68sec$) παρουσιάζονται τα Σχήματα 5.14α και 5.14β. Και πάλι, από το Σχήμα 5.14α επιβεβαιώνεται η δεσπόζουσα περίοδος της διέγερσης στο φάσμα απόκρισης της επιφάνειας του εδάφους, ενώ από το Σχήμα 5.14β προκύπτει η ιδιοπερίοδος της βελτιωμένης στρώσης ίση περίπου με $T_{imp} = 0.16sec$, δηλαδή πρακτικώς ίδια με την εκτίμηση από την έντονα υψίσυχη διέγερση, επιβεβαιώνοντας δηλαδή ότι η τιμή της G_{eq} δε διαφαίνεται να εξαρτάται πρακτικώς από τη συχνότητα της διέγερσης, αλλά μόνο από τις τιμές των a_r και K_o .

Στη συνέχεια, λαμβάνοντας υπόψη όλες τις αναλύσεις της παρούσας εργασίας, διερευνάται η επίδραση της τιμής του T_{imp} στην τιμή της ενίσχυσης (ή απομείωσης) της σεισμικής κίνησης στην επιφάνεια του εδάφους λόγω της βελτίωσης, δηλαδή του λόγου PGA_{imp}/PGA_{soil} . Έτσι, στα Σχήματα 5.15 έως 5.18 παρουσιάζονται διαγράμματα των τιμών της ενίσχυσης λόγω βελτίωσης ως συνάρτηση του εκτιμηθείσας τιμής του T_{imp} για τιμές της δεσπόζουσας περιόδου $T_e = 0.06, 0.17, 0.33$ και 0.68 sec, αντίστοιχα, διαχωρίζοντας τα αποτελέσματα ανάλογα με το ποσοστό αντικατάστασης a_r . Δεδομένης της τιμής της ιδιοπεριόδου $T_{soil} = 0.20$ sec του φυσικού εδάφους, προκύπτουν τα κάτωθι συμπεράσματα:

- Όταν $T_{soil}/T_e < 1.0$ (δηλαδή για $T_e = 0.33$ και 0.68 sec, στα Σχήματα 5.17 και 5.18), η βελτίωση απομειώνει τη σεισμική κίνηση στην επιφάνεια του εδάφους. Ο λόγος είναι ότι η βελτίωση απομειώνει την τιμή της ιδιοπεριόδου από T_{soil} σε T_{imp} οδηγώντας σε λόγο T_{imp}/T_e μικρότερο από το λόγο T_{soil}/T_e , και συνεπώς το βελτιωμένο έδαφος «απομακρύνεται» ακόμη περισσότερο από τις συνθήκες συντονισμού ($T/T_e = 1$) σε σχέση με το φυσικό έδαφος. Μάλιστα, όσο μεγαλύτερο είναι το ποσοστό αντικατάστασης a_r (για τις ίδιες τιμές T_e και K_o) τόσο μικρότερη γίνεται η T_{imp} και τόσο εντονότερη γίνεται η απομείωση της σεισμικής κίνησης. Αντίστοιχη είναι η επίδραση της αύξησης του λόγου K_o (για ίδιες τιμές του T_e και a_r). Οι ανωτέρω επιδράσεις των a_r και K_o στην απομείωση της σεισμικής κίνησης είναι σε απόλυτη ποιοτική συμφωνία και με τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 4, όπου μελετώνται αμιγώς τα αποτελέσματα από τις αναλύσεις βελτιωμένου εδάφους.
- Αντιθέτως, όταν $T_{soil}/T_e \gg 1.0$ (δηλαδή για $T_e = 0.06$ sec, στο Σχήμα 5.15), η βελτίωση ενισχύει τη σεισμική κίνηση στην επιφάνεια του εδάφους. Ο λόγος είναι ότι η βελτίωση απομειώνει την τιμή της ιδιοπεριόδου από T_{soil} σε T_{imp} οδηγώντας σε λόγο T_{imp}/T_e μικρότερο από το λόγο T_{soil}/T_e , και συνεπώς το βελτιωμένο έδαφος «προσεγγίζει» τις συνθήκες συντονισμού ($T/T_e = 1$) περισσότερο απ' ό,τι το φυσικό έδαφος. Τα αποτελέσματα για την ποσοτικοποίηση της G_{eq} δεν ήταν αρκετά σαφή, μα σύμφωνα και με τα αποτελέσματα του Κεφαλαίου 4, όσο μεγαλύτερο είναι το ποσοστό αντικατάστασης a_r (για τις ίδιες τιμές T_e και K_o) τόσο μεγαλύτερη γίνεται η T_{imp} και τόσο εντονότερη γίνεται η ενίσχυση της σεισμικής κίνησης. Αντίστοιχη είναι η επίδραση της αύξησης του λόγου K_o (για ίδιες τιμές του T_e και a_r), πάντα με βάση

τα αποτελέσματα του Κεφαλαίου 4, όπου δε γίνεται λόγος για G_{eq} , αλλά σχολιάζονται αποκλειστικά τα αποτελέσματα των αναλύσεων για βελτιωμένο έδαφος.

- Σε ενδιάμεσες περιπτώσεις, όταν $T_{soil}/T_e \equiv 1.0 - 1.3$ (δηλαδή για $T_e = 0.33\text{sec}$, στο Σχήμα 5.16), η επίδραση της βελτίωσης στη σεισμική κίνηση εξαρτάται από τις τιμές των K_0 και a_r . Για παράδειγμα, Στο Σχήμα 5.16 η βελτίωση ενισχύει τη σεισμική κίνηση για $a_r = 12.5\%$ και 25% (και $K_0 = 3$ έως 20), ενώ την απομειώνει για $a_r = 75\%$ (και $K_0 = 3$ έως 20). Τέλος, από το ίδιο Σχήμα προκύπτει ότι για $a_r = 50\%$ και $K_0=3$ έχουμε ενίσχυση, ενώ όσο αυξάνει το K_0 σε τιμές 10 και 20 , η βελτίωση οδηγεί σε απομείωση. Πρακτικώς, για τέτοιους συνδυασμούς εδάφους-διέγερσης, το αν η βελτίωση οδηγεί σε απομείωση ή ενίσχυση της σεισμικής κίνησης, εξαρτάται από την τελικώς υλοποιούμενη τιμή της ιδιοπεριόδου T_{imp} , που εξαρτάται από το συνδυασμό τιμών K_0 και a_r . Πιο συγκεκριμένα, αν ο λόγος T_{imp}/T_e είναι εγγύτερος του 1.0 σε σχέση με το λόγο T_{soil}/T_e , τότε η βελτίωση οδηγεί σε ενίσχυση, ενώ σε αντίθετη περίπτωση η βελτίωση οδηγεί σε απομείωση της σεισμικής κίνησης. Τα ανωτέρω συμπεράσματα είναι και πάλι σε ποιοτική συμφωνία με τα αποτελέσματα των αναλύσεων για βελτιωμένο έδαφος που παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 4.

Με βάση όλα τα προηγούμενα, από την παράγραφο 5.2 έχει προκύψει μια διαδικασία εκτίμησης της δυστημσίας G_{eq} του ισοδύναμα-ομοιόμορφου βελτιωμένου εδάφους, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για εκτέλεση 1Δ αναλύσεων σεισμικής απόκρισης του βελτιωμένου εδάφους. Όμως, καθώς το όλο θέμα της επίδρασης μιας απειρομήκους βελτίωσης έχει αναχθεί σε ένα ισοδύναμο πρόβλημα 1Δ μετάδοσης σεισμικών κυμάτων, θα ήταν ενδιαφέρον να διακριβωθεί αν μπορούν να χρησιμοποιηθούν με ακρίβεια οι αναλυτικές σχέσεις εκτίμησης της ενίσχυσης με βάση την κυματική θεωρία αρμονικών κυμάτων σε ιξωδο-ελαστικό έδαφος. Σύμφωνα με την εν λόγω θεωρία, η ενίσχυση της μέγιστης επιτάχυνσης αρμονικών κυμάτων στην επιφάνεια μιας ομοιόμορφης ιξωδο-ελαστικής οριζόντιας εδαφικής στρώσης (με χαρακτηριστικά ρ_s, V_s, ξ_s) που επικάθεται εύκαμπτου υποβάθρου (με χαρακτηριστικά ρ_b, V_b), σε σχέση με το αναδυόμενο υπόβαθρο (βλέπε Σχήμα 5.19), δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{PGA_{soil}}{PGA_{bedrock}} = \frac{PGA_A}{PGA_r} = \frac{1}{\sqrt{\cos^2(k_{soil}H) + \left(\frac{\xi_{soil}}{\xi_b} k_{soil}H\right)^2}} \quad (5.3a)$$

όπου

$$\bar{\xi}_{soil} = \xi_s + \frac{2}{\pi} \frac{\rho_s V_s}{\rho_b V_b} \frac{T_s}{T_{soil}} \quad \text{και} \quad k_{soil} H = \frac{\pi}{2} \frac{T_{soil}}{T_e} \quad (5.3\beta)$$

Εφαρμόζοντας τις ίδιες σχέσεις για μια οριζόντια ισοδύναμα-ομοιόμορφη βελτιωμένη ιξωδο-ελαστική εδαφική στρώση (με χαρακτηριστικά, τα οποία θεωρούνται απλουστευτικά: $\rho_{imp} = \rho_s$, $V_{imp} = [G_{eq}/\rho_s]^{0.5}$, $\xi_{imp} = \xi_s$) που επικάθεται επί του ίδιου εύκαμπτου υποβάθρου (με χαρακτηριστικά ρ_b , V_b), προκύπτει ότι:

$$\frac{PGA_{imp}}{PGA_{bedrock}} = \frac{1}{\sqrt{\cos^2(k_{imp} H) + (\bar{\xi}_{imp} k_{imp} H)^2}} \quad (5.4\alpha)$$

όπου

$$\bar{\xi}_{imp} = \xi_s + \frac{2}{\pi} \frac{\rho_s V_{imp}}{\rho_b V_b} \frac{T_s}{T_{imp}} \quad \text{και} \quad k_{imp} H = \frac{\pi}{2} \frac{T_{imp}}{T_e} \quad (5.4\beta)$$

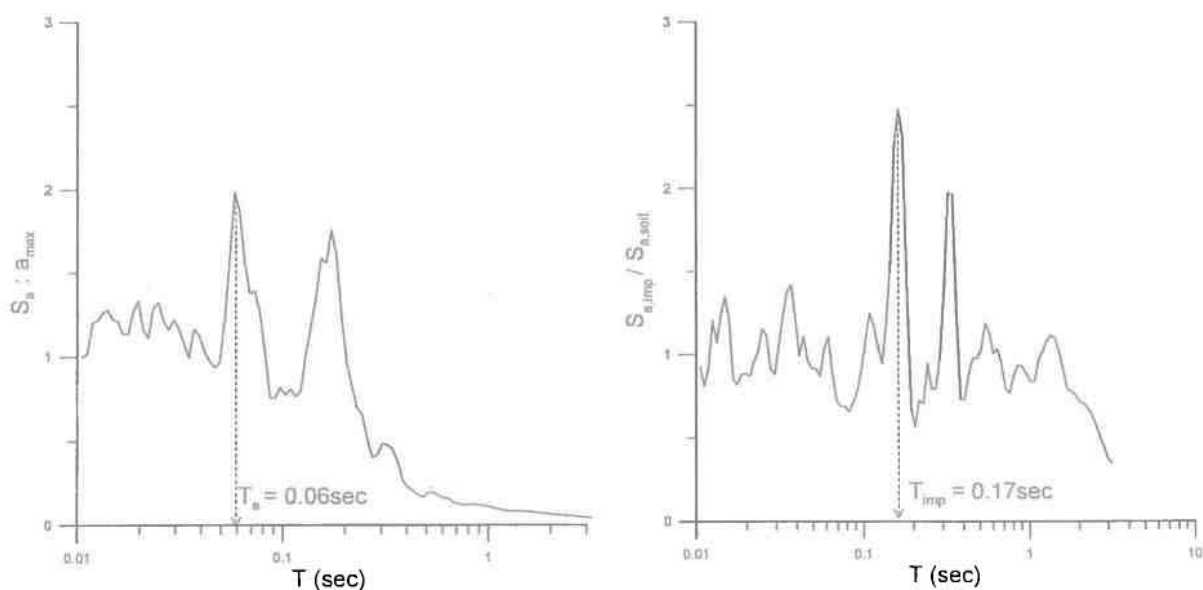
Συνεπώς, συνδυάζοντας τις σχέσεις (5.3) και (5.4) μπορεί να προκύψει ο λόγος ενίσχυσης λόγω της βελτίωσης ως:

$$\frac{PGA_{imp}}{PGA_{soil}} = \frac{\sqrt{\cos^2(k_{soil} H) + (\bar{\xi}_{soil} k_{soil} H)^2}}{\sqrt{\cos^2(k_{imp} H) + (\bar{\xi}_{imp} k_{imp} H)^2}} \quad (5.5)$$

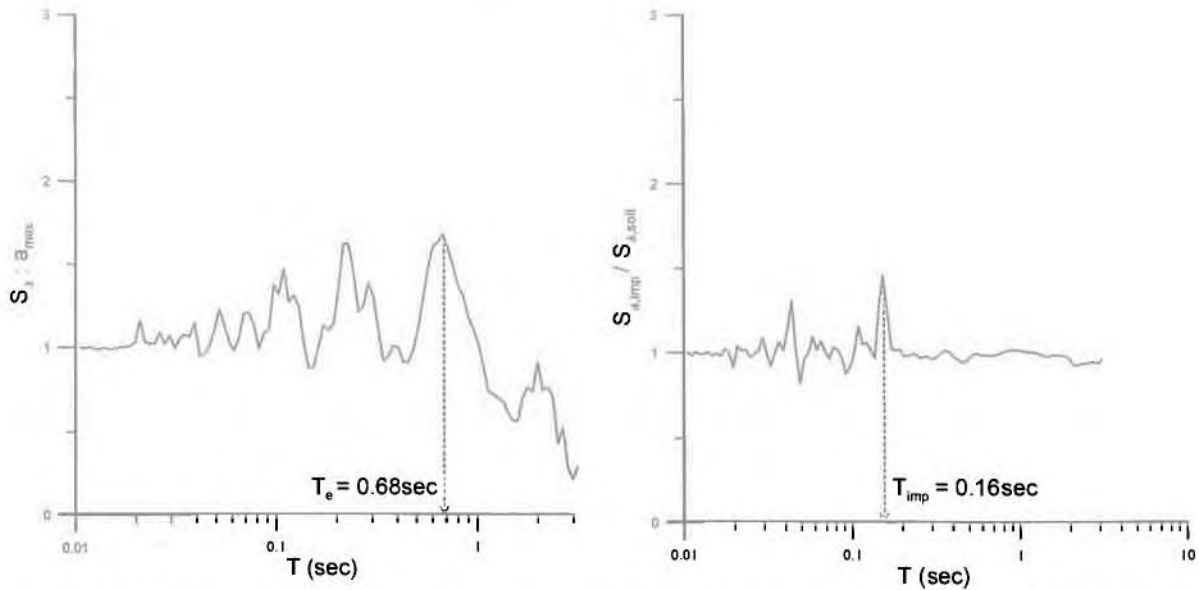
με τις τιμές των παραμέτρων που επηρεάζονται στην ανωτέρω σχέση να δίνονται από τις σχέσεις 5.3β και 5.4β.

Για την εφαρμογή των σχέσεων 5.5, 5.3β και 5.4β για τις αναλύσεις της παρούσας εργασίας (που έχουν $H = H_{imp} = 10\text{m}$), λαμβάνονται υπόψη οι εξής τιμές των παραμέτρων: $T_{soil} = 0.2\text{sec}$, $H = 10\text{m}$, $\rho_s = \rho_b = 2 \text{ Mg/m}^3$ και $\xi_s = 10\%$ που αποτυπώνει τη μέση τιμή απόσβεσης για όλες τις περιόδους ενδιαφέροντος, αν $\xi = \xi_{min} = 5\%$ για $T = 0.5(T_e + T_{soil})$. Έτσι, στο Σχήμα 5.20 παρουσιάζεται η επίδραση του λόγου T_{imp}/T_{soil} στις τιμές του λόγου ενίσχυσης λόγω βελτίωσης PGA_{imp}/PGA_{soil} από τις αναλύσεις και συγκρίνεται με τις συνεχείς γραμμές που προκύπτουν με εφαρμογή των ανωτέρω

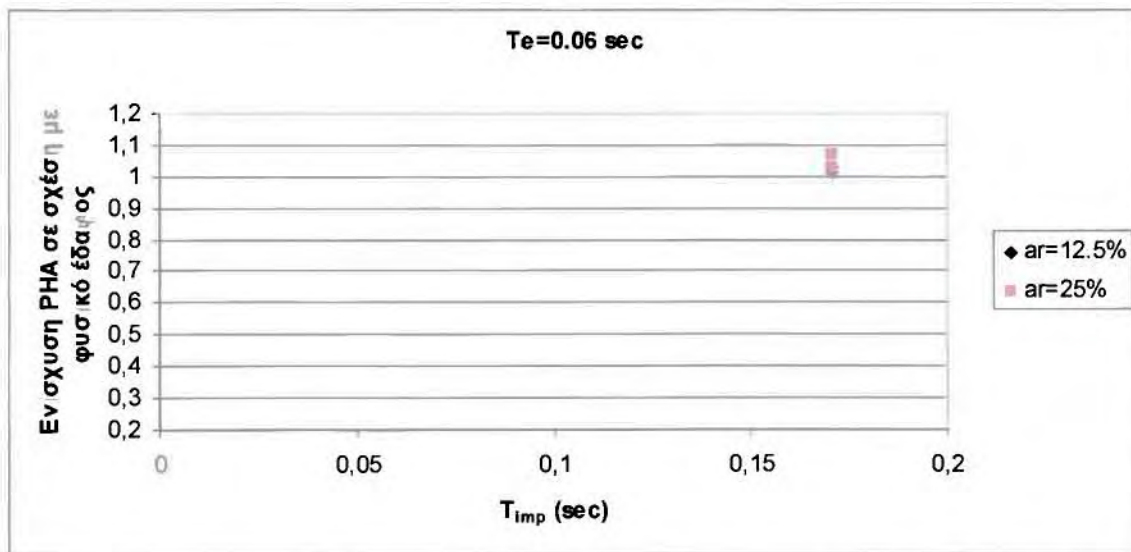
σχέσεων. Όπως παρατηρείται, η αναλυτική προσέγγιση του όλου φαινομένου είναι ιδιαίτερα επιτυχής, καθώς διαχωρίζονται οι περιπτώσεις που δίνουν ενίσχυση και εκείνες που δίνουν απομείωση, ως συνάρτηση της δεσπόζουσας περιόδου T_e . Οι όποιες διαφοροποιήσεις αφορούν κυρίως υψίσυχνες διεγέρσεις, αλλά κρίνονται ως μικρής σημασίας, αν ληφθεί υπόψη ότι: α) η αναλυτική προσέγγιση έχει προκύψει με βάση αρμονικές διεγέρσεις, ενώ οι αναλύσεις έχουν γίνει με βάση παλμούς Ricker που έχουν μία δεσπόζουσα περίοδο αλλά υπαρκτό φάσμα σημαντικών συχνοτήτων, β) η αναλυτική προσέγγιση έχει προκύψει με βάση σταθερή τιμή του ξ , ανεξαρτήτως συχνοτήτων, ενώ οι αναλύσεις έγιναν με απόσβεση Rayleigh και απόσβεση που είναι συνάρτηση της συχνότητας.



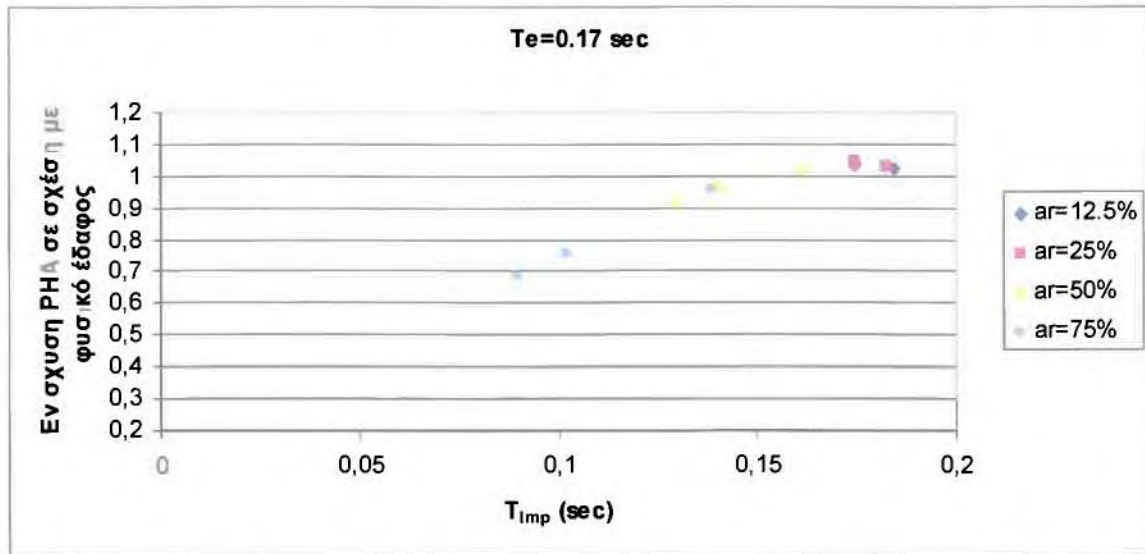
Σχήμα 5.13: Ενδεικτικά αποτελέσματα ανάλυσης σεισμικής φόρτισης βελτιωμένου εδάφους με $K_o=3$, $a_r=25\%$ και $T_e=0.06\text{sec}$: α) κανονικοποιημένο ελαστικό φάσμα απόκρισης (5% απόσβεση) στην επιφάνεια του εδάφους, β) φασματική ενίσχυση λόγω βελτίωσης στην επιφάνεια του εδάφους



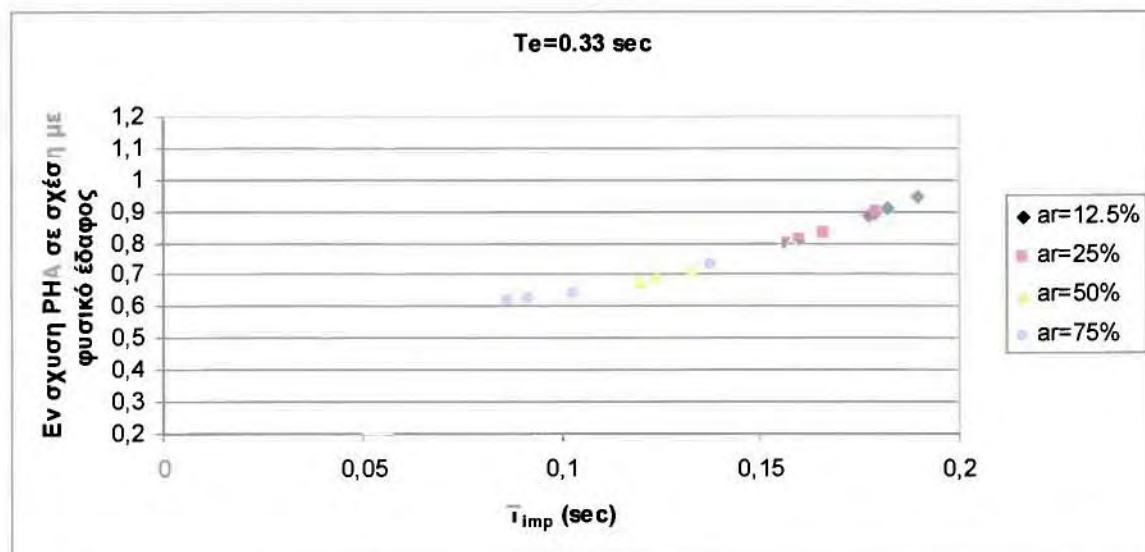
Σχήμα 5.14: Ενδεικτικά αποτελέσματα ανάλυσης σεισμικής φόρτισης βελτιωμένου εδάφους με $K_0=3$, $a_r=25\%$ και $T_e=0.68\text{sec}$: α) κανονικοποιημένο ελαστικό φάσμα απόκρισης (5% απόσβεση) στην επιφάνεια του εδάφους, β) φασματική ενίσχυση λόγω βελτίωσης στην επιφάνεια του εδάφους



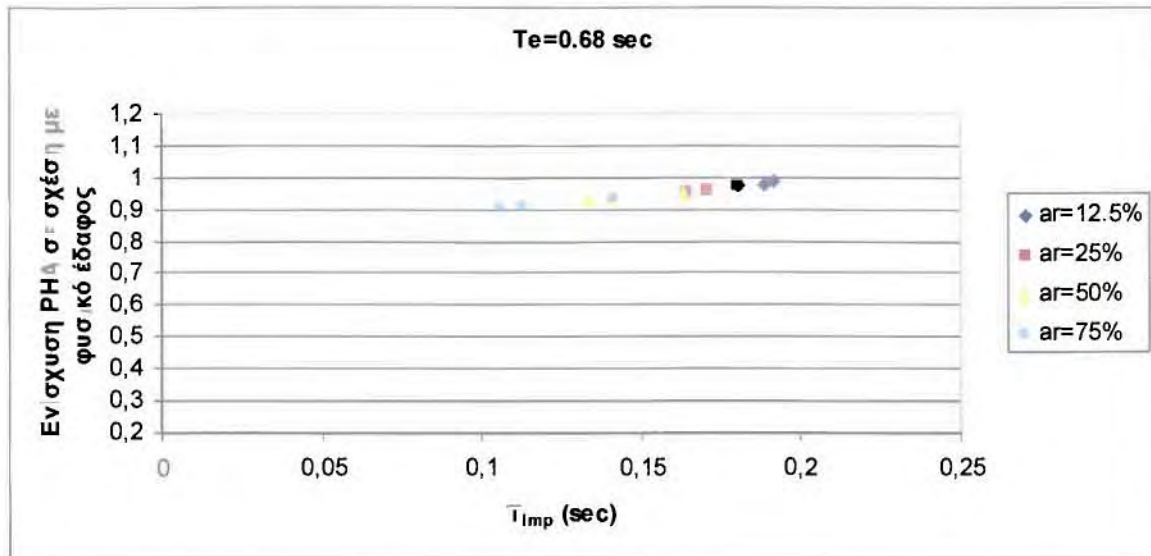
Σχήμα 5.15: Συγκεντρωτικό διάγραμμα ενίσχυσης μέγιστης σεισμικής επιτάχυνσης λόγω βελτίωσης ως συνάρτηση της εκτιμηθείσας (επαναληπτικά) ιδιοπεριόδου ταλάντωσης T_{imp} του ισοδύναμα-ομοιόμορφου βελτιωμένου εδάφους, με βάση τα αποτελέσματα αναλύσεων για στρώση $H=H_{imp}=10\text{m}$ υπό διέγερση με $T_e=0.06\text{sec}$



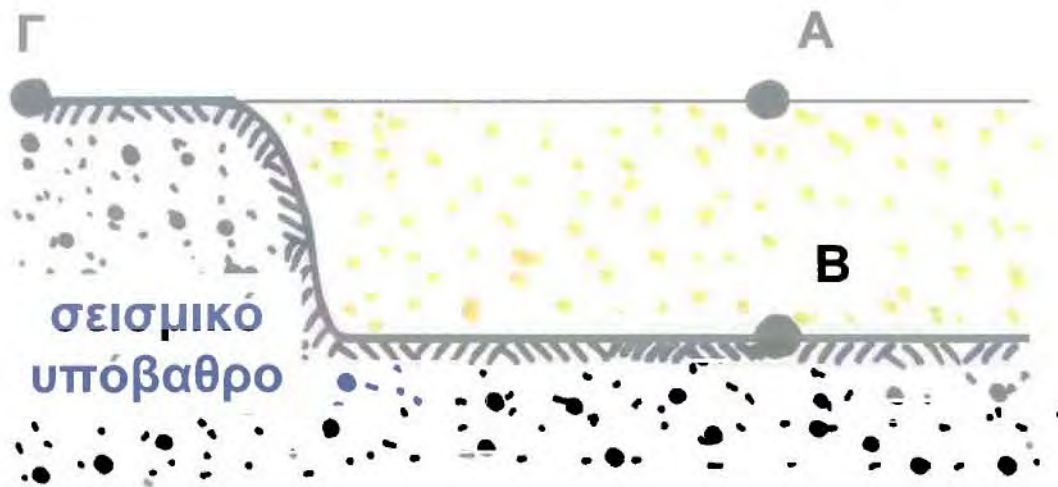
Σχήμα 5.16: Συγκεντρωτικό διάγραμμα ενίσχυσης μέγιστης σεισμικής επιτάχυνσης λόγω βελτίωσης ως συνάρτηση της εκτιμηθείσας (επαναληπτικά) ιδιοπεριόδου ταλάντωσης T_{imp} του ισοδύναμα-ομοιόμορφου βελτιωμένου εδάφους, με βάση τα αποτελέσματα αναλύσεων για στρώση $H=H_{imp}=10\text{m}$ υπό διέγερση με $T_e=0.17\text{sec}$



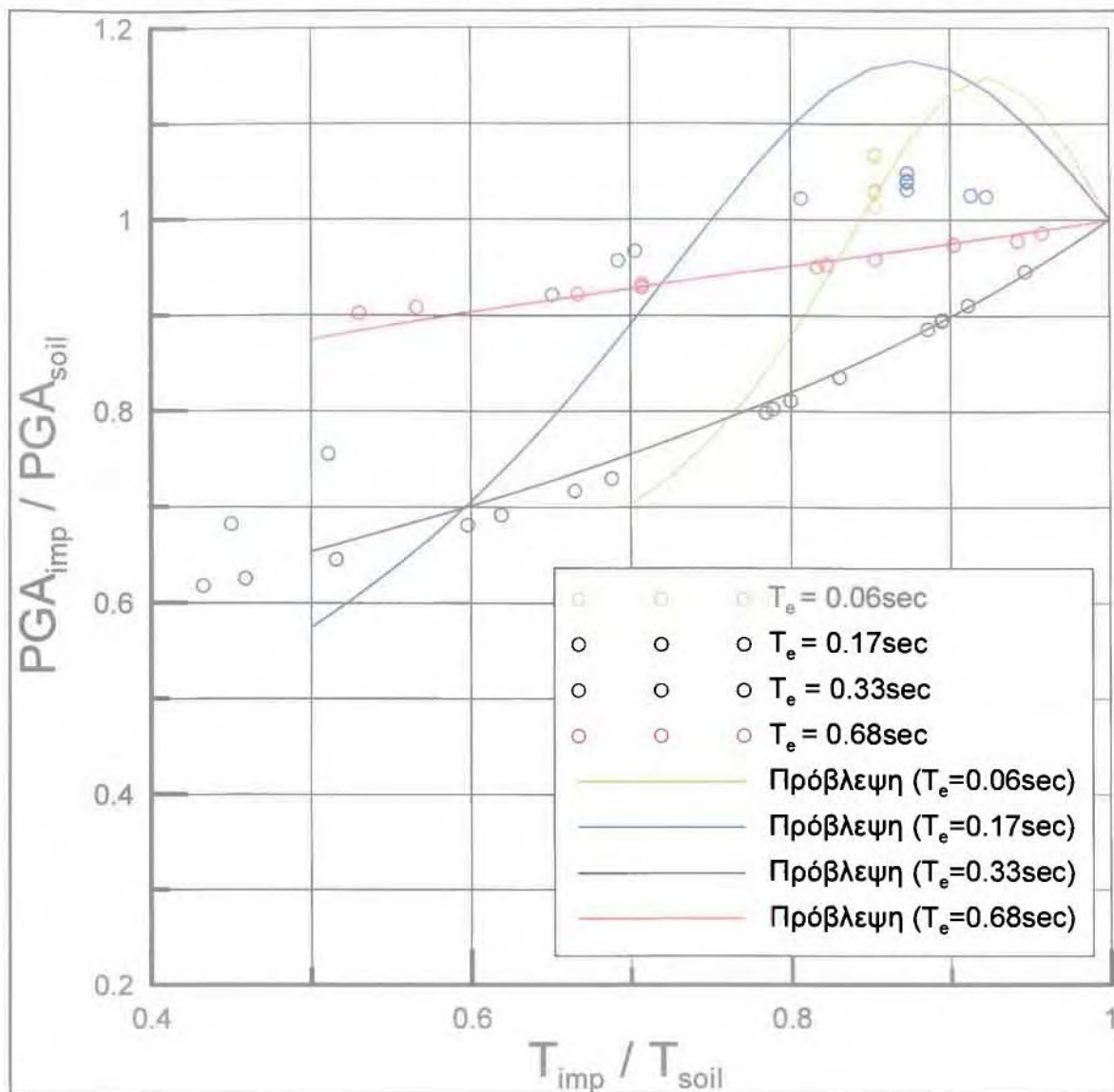
Σχήμα 5.17: Συγκεντρωτικό διάγραμμα ενίσχυσης μέγιστης σεισμικής επιτάχυνσης λόγω βελτίωσης ως συνάρτηση της εκτιμηθείσας (επαναληπτικά) ιδιοπεριόδου ταλάντωσης T_{imp} του ισοδύναμα-ομοιόμορφου βελτιωμένου εδάφους, με βάση τα αποτελέσματα αναλύσεων για στρώση $H=H_{imp}=10\text{m}$ υπό διέγερση με $T_e=0.33\text{sec}$



Σχήμα 5.18: Συγκεντρωτικό διάγραμμα ενίσχυσης μέγιστης σεισμικής επιτάχυνσης λόγω βελτίωσης ως συνάρτηση της εκτιμηθείσας (επαναληπτικά) ιδιοπεριόδου ταλάντωσης T_{imp} του ισοδύναμα-ομοιόμορφου βελτιωμένου εδάφους, με βάση τα αποτελέσματα αναλύσεων για στρώση $H=H_{imp}=10m$ υπό διέγερση με $T_e=0.68sec$



Σχήμα 5.19: Σχηματικό διάγραμμα «μοντέλου» 1Δ μετάδοσης σεισμικών κυμάτων από το σεισμικό υπόβαθρο (B) στην επιφάνεια του εδάφους (A), με το υπόβαθρο να αναδύεται «μακριά» από τα σημεία A και B.



Σχήμα 5.20: Σύγκριση αριθμητικών προβλέψεων ενίσχυσης της μέγιστης σεισμικής επιτάχυνσης λόγω βελτίωσης ως συνάρτησης της κανονικοποιημένης (ως προς T_{soil}) ιδιοπεριόδου ταλάντωσης T_{imp} του ισοδύναμα-ομοιόμορφου βελτιωμένου εδάφους, με αντίστοιχες αναλυτικές προβλέψεις με βάση την κυματική θεωρία (περιπτώσεις βελτίωσης εδάφους πάχους $H=H_{imp}=10m$ υπό διάφορες σεισμικές διεγέρσεις).

Κεφάλαιο 6

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ-ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

6.1 Συμπεράσματα

Από την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας προέκυψαν τα κάτωθι συμπεράσματα:

1. Το αν η βελτίωση προκαλεί ενίσχυση ή απομείωση της μέγιστης σεισμικής επιτάχυνσης στην επιφάνεια του βελτιωμένου εδάφους (σε σχέση με το φυσικό έδαφος), εξαρτάται από την ιδιοπερίοδο του φυσικού εδάφους T_{soil} , την δεσπόζουσα περίοδο T_e της σεισμικής διέγερσης, το λόγο δυστημσιών $K_o = G_{i,o}/G_{s,o}$ (όπου $G_{i,o}$ το μέτρο διάτμησης του χαλικοπασσάλου και $G_{s,o}$ το μέτρο διάτμησης του φυσικού εδάφους) και το πραγματοποιούμενο ποσοστό αντικατάστασης $a_r(\%)$.
2. Πιο συγκεκριμένα, απομείωση προκύπτει, εν γένει, όταν ο λόγος $T_{soil}/T_e < 1$ (χαμηλόσυχνες διεγέρσεις) και ενίσχυση όταν ο λόγος $T_{soil}/T_e > 1$ (υψίσυχνες διεγέρσεις). Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι η δεσπόζουσα περίοδος του βελτιωμένου εδάφους είναι πάντα μικρότερη από αυτή του φυσικού εδάφους (δηλ. $T_{imp} < T_{soil}$), και συνεπώς, στην πρώτη περίπτωση η βελτίωση «απομακρύνει» το έδαφος από τις συνθήκες συντονισμού ($T_{imp} \rightarrow T_e$), ενώ στη δεύτερη η βελτίωση «φέρει» το έδαφος εγγύτερα σε αυτές.
3. Η 2Δ σεισμική απόκριση ενός απειρομήκους βελτιωμένου εδάφους είναι πρακτικώς ομοιόμορφη, και συνεπώς μπορεί να προσομοιωθεί από 1Δ ανάλυση σεισμικής απόκρισης ενός ισοδύναμου ομοιογενούς (βελτιωμένου) εδάφους.

4. Δεδομένου του συμπεράσματος #3, πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις σεισμικής απόκρισης για 58 διαφορετικούς συνδυασμούς εδάφους-βελτίωσης-διέγερσης από τις οποίες προκύπτει ότι η δυσστησία $G_{eq,0}$ του ισοδύναμου ομοιογενούς βελτιωμένου εδάφους προσεγγίζεται με επαρκή ακρίβεια θεωρώντας ισοδυναμία διατμητικών τάσεων τ στο φυσικό έδαφος και τον πάσσαλο βελτίωσης, επιβεβαιώνοντας παλαιότερη ενδεικτική πρόταση των Bouckovalas et al (2006). Αντιθέτως, η θεώρηση ισοδυναμίας διατμητικών παραμορφώσεων γ στο φυσικό έδαφος και τον πάσσαλο βελτίωσης (σύμφωνα με τους Baez & Martin (1993) που είναι η κρατούσα άποψη στη βιβλιογραφία) οδηγεί σε υπερεκτίμηση της δυσστησίας $G_{eq,0}$.
5. Με βάση το συμπέρασμα #4, προκύπτει ότι η σχέση υπολογισμού της $G_{eq,0}$ είναι συνάρτηση του μέτρου δυσστησίας $G_{s,0}$ του φυσικού εδάφους, του λόγου δυσστησιών $K_0 = G_{i,0}/G_{s,0}$ και του ποσοστού αντικατάστασης $a_r(\%)$, ενώ προκύπτει ανεξάρτητη της δεσπόζουσας περιόδου T_e της σεισμικής διέγερσης και του πάχους H_{imp} της βελτίωσης σε σχέση με το πάχος H της στρώσης του φυσικού εδάφους.
6. Έχοντας εκτιμήσει το ισοδύναμο μέτρο δυσστησίας $G_{eq,0}$, η σεισμική απόκριση απειρομήκους βελτιωμένου εδάφους μπορεί να εκτιμηθεί με βάση 1Δ αναλύσεις σεισμικής απόκρισης. Ειδικότερα, και μόνο αν η βελτίωση φθάνει μέχρι το σεισμικό υπόβαθρο ($H_{imp}=H$), τότε η εκτίμηση της ενίσχυση ή απομείωσης της μέγιστης σεισμικής επιτάχυνσης λόγω βελτίωσης μπορεί να εκτιμηθεί και με βάση την κυματική θεωρία για ομοιόμορφη οριζόντια στρώση εδάφους επί βραχώδους υποβάθρου με ικανοποιητική ακρίβεια.

6.2 Περιορισμοί - Προτάσεις

Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την παρούσα εργασία υπόκεινται στους περιορισμούς των αναλύσεων στις οποίες βασίστηκαν. Πιο συγκεκριμένα:

- Η αναλυτική σχέση εκτίμησης της δυσστησίας $G_{eq,0}$ του ισοδύναμου ομοιογενούς βελτιωμένου εδάφους βασίζεται σε ισοδυναμία διατμητικών τάσεων τ στο έδαφος και τον πάσσαλο βελτίωσης και επιβεβαιώθηκε από

ιξωδο-ελαστικές αναλύσεις. Συνεπώς, η χρήση της περιορίζεται για μικρής έντασης σεισμικές διεγέρσεις για τις οποίες ισχύουν με ακρίβεια οι ιξωδο-ελαστικές αναλύσεις

- Η χρήση 1Δ αναλύσεων σεισμικής απόκρισης βελτιωμένου εδάφους είναι κατάλληλη μόνο για απειρομήκειες γεωμετρίες βελτίωσης. Σε περιπτώσεις (οριζοντίως) τοπικής βελτίωσης οι 2Δ αναλύσεις είναι μονόδρομος

Ως μελλοντική έρευνα στο ίδιο αντικείμενο προτείνεται η αναίρεση των ανωτέρω περιορισμών με μελέτη της σεισμικής απόκρισης (οριζοντίως) τοπικής βελτίωσης μέσω 2Δ αναλύσεων και με τη χρήση μη-γραμμικών αναλύσεων πρώτα για απειρομήκειες και μετά για τοπικές βελτιώσεις για τη διερεύνηση της αξιοπιστίας των ανωτέρω συμπερασμάτων, αλλά και πιθανής επέκτασής τους για χρήση σε περιπτώσεις ισχυρών διεγέρσεων.

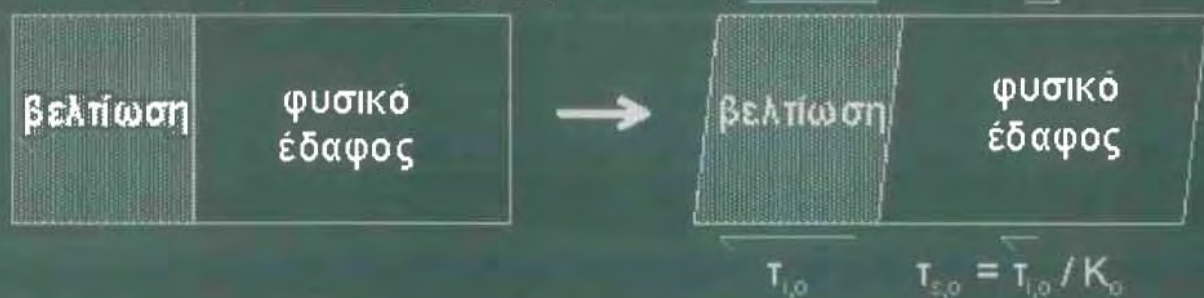
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Adalier, K., Elgamal A., Meneses J., Baez J.I. *Stone columns as liquefaction countermeasure in non-plastic silty soils*, (2003).
- Baez, J.I. *A design model for the reduction of soil liquefaction by vibro-stone columns*, PhD Thesiss, University of Southern California, (1995).
- Baez, J.I. & Martin, G.R. *Seismic Shear Stress Redistribution with Vibro-Stone Columns*, (1993).
- Baez, J.I. & Martin, G.R. Advances in the design of vibro systems for the improvement of liquefaction resistance. *Symposium of Ground Improvement*, Vancouver (1993).
- Bouckovalas, G., Papadimitriou, A., Vytiniotis, A., Bakas, G. (2006). *Equivalence between 2D and 3D numerical simoulations of the seismic response of improved sites*, (2006).
- Fuchila, K., Sun, X. and Akiyoshi T. (1998) : *Seismic response spectra including effects of liquefaction and ground improvement*, 11th European Conference on Earthquake Engineering, Balkema, Rotterdam (1998)
- Idriss, I.M. & Sun, J.I., *Shake91: A computer program for conducting equivalent linear seismic response analysis of horizontally layered soil deposits*. User's Guide, Center for Geotechnical Modeling, Civil Engineering Department, UC Davis (1992)
- Itasca Consulting Group, Inc., *Flac, User's Guide*, (2000)
- Papadimitriou, A., Bouckovalas, G., Kondis, A., Bakas, G, (2006). *Equivalent-uniform soil model for the seismic response analysis of sites improved with inclusions*, (2006).
- Seoul National University, *Numerical Predictions of soft clay consolidation behaviour with vertical drains*, (2002)
- Βυτινιώτη, Α., *Τριδιάστατη ανάλυση σεισμικής απόκρισης βελτιωμένων εδαφών*
- Κόνδη, Α. *Δυναμική Συμπεριφορά Εδάφους Βελτιωμένου με Χαλικοπάσσλους, Διπλωματική Εργασία*, (2003).



$$\alpha_s = d' / s \quad K_0 = G_{i,0} / G_{s,0} \quad G_{eq,\gamma} = G_{s,0} [(1 - \alpha_s) + K_0 \alpha_s] \quad G_{eq,\tau} = G_{s,0} [K_0 / (\alpha_s + (1 - \alpha_s) K_0)]$$

ισοδυναμία
παραμορφώσεων γ $\tau_{i,0}$ $\tau_{e,0} = \tau_{i,0} / K_0$



ισοδυναμία
τάσεων τ $\tau_{i,0} = \tau_{e,0}$

