

# Ισοδυναμία 2Δ και 3Δ Αριθμητικών Αναλύσεων Σεισμικής Απόκρισης Βελτιωμένων Εδαφών

## Equivalence between 2D and 3D Numerical Analyses of the Seismic Response of Improved Sites

ΠΑΠΑΔΗΜΗΤΡΙΟΥ, Α. Γ. Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, Ε.Μ.Π  
ΒΥΤΙΝΙΩΤΗΣ, Α. Πολιτικός Μηχανικός Ε.Μ.Π., Υποψ. Διδάκτωρ Μ.Ι.Τ.  
ΜΠΟΥΚΟΒΑΛΑΣ, Γ. Δ. Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, Καθηγητής, Ε.Μ.Π  
ΜΠΑΚΑΣ, Γ. Δρ. Πολιτικός Μηχανικός Ε.Μ.Π., Έδραση – Χ. Ψαλλίδας Α.Τ.Ε

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ:** Στο παρόν άρθρο μελετάται ο τρόπος χρήσης 2Δ αριθμητικών αναλύσεων (επίπεδης παραμόρφωσης) για την επακριβή προσομοίωση της 3Δ σεισμικής απόκρισης βελτιωμένων εδαφών. Συγκεκριμένα, συγκρίνεται η σεισμική απόκριση της επιφάνειας του βελτιωμένου εδάφους σε παραμετρικές 3Δ και 2Δ αναλύσεις και προτείνεται μια διαδικασία μετασχηματισμού της 3Δ γεωμετρίας βελτίωσης σε μια «ισοδύναμη» γεωμετρία προς χρήση σε «ισοδύναμες» 2Δ αναλύσεις (επίπεδης παραμόρφωσης) που αναπαράγουν τα αποτελέσματα των χρονοβόρων 3Δ αναλύσεων. Η έμφαση δίνεται σε μεθόδους αντικατάστασης και σταθεροποίησης μαλακών (συνεκτικών) εδαφών και σε τρεις (3) γεωμετρίες βελτίωσης: α) μια σειρά πασσάλων, β) ένα κάρναβο πασσάλων και γ) ένα κάρναβο κλειστών κυψελών.

**ABSTRACT:** This paper explores how 2D (plane strain) numerical analyses may be accurately used for simulating the 3D seismic response of improved sites. Specifically, the seismic response of the ground surface of improved sites is compared from parametric 3D and 2D analyses and a methodology is proposed for transforming the 3D improvement geometry into an “equivalent” geometry for use in “equivalent” 2D (plane strain) analyses, closely simulating the results of the time-consuming 3D analyses. Emphasis is put on replacement and stabilization methods of soft (cohesive) soils and on three (3) improvement geometries: a) an embedded soldier pile wall, b) a grid of piles and c) a grid of closed cells.

### 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

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 άρθρο διερευνάται ο ορθός τρόπος χρήσης 2Δ αριθμητικών αναλύσεων για την επακριβή προσομοίωση του 3Δ προβλήματος της σεισμικής απόκρισης βελτιωμένων εδαφών. Η έμφαση δίνεται σε τρεις (3) γεωμετρίες βελτίωσης: α) μια σειρά πασσάλων, β) ένα κάρναβο πασσάλων και γ) ένα κάρναβο κλειστών κυψελών. Η τελευταία γεωμετρία συνήθως υλοποιείται με μεθόδους σταθεροποίησης (π.χ. βαθιά εδαφική ανάμιξη, DSM), ενώ οι δύο (2) πρώτες με μεθόδους είτε σταθεροποίησης ή αντικατάστασης (π.χ. δονητική αντικατάσταση). Χρήση των αποτελεσμάτων του παρόντος άρθρου έχει ως αποτέλεσμα

ρεαλιστικό σχεδιασμό έργων Πολιτικού Μηχανικού σε βελτιωμένα εδάφη, καθώς λαμβάνεται ορθά υπόψη η αλλαγή της σεισμικής απόκρισης του εδάφους λόγω της βελτίωσης.

## 2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Για την επίτευξη του ανωτέρω στόχου, συγκρίνονται αποτελέσματα 3Δ και 2Δ αναλύσεων σεισμικής απόκρισης βελτιωμένων εδαφών και προτείνεται 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, η οποία αν υποβληθεί στην ίδια σεισμική διέγερση οδηγεί στην ίδια απόκριση της επιφάνειας του εδάφους.

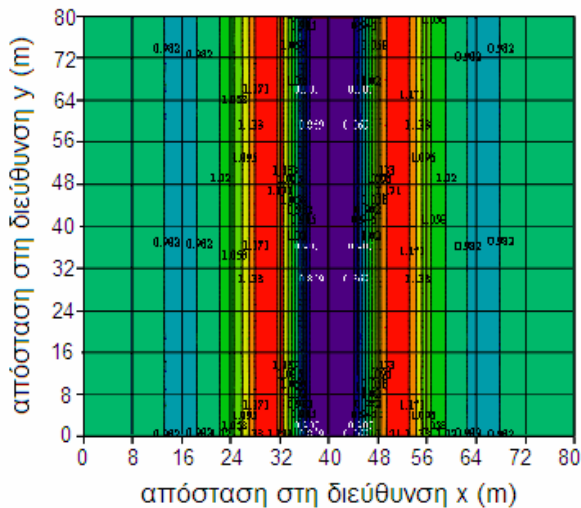
Οι 3Δ και 2Δ αναλύσεις εκτελέστηκαν αντίστοιχα με τα λογισμικά H/Y *FLAC3D* (Itasca Inc 1997) και *FLAC* (Itasca Inc 1993), δύο (2) εμπορικούς κώδικες που χρησιμοποιούν τη μέθοδο πεπερασμένων διαφορών για την εκτέλεση ολοκλήρωσης εν χρόνω. Πριν από τη χρήση τους για την ανάλυση βελτιωμένων εδαφών επαληθεύθηκε ότι δίνουν ταυτόσημα αποτελέσματα για την περίπτωση αναφοράς της 1Δ κατακόρυφης διάδοσης κυμάτων μέσω ομοιόμορφης οριζόντιας εδαφικής στρώσης επί άκαμπτου υπόβαθρου. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε κάρναβος 1x10x1 κυβικών στοιχείων (στις διευθύνσεις x, z και y) στο *FLAC3D* και τοποθετήθηκαν σύνορα ελευθέρου πεδίου στις τέσσερις πλευρές του. Επισημαίνεται ότι η διεύθυνση z είναι η κατακόρυφη και οι x και y είναι οι δύο οριζόντιες διευθύνσεις του χώρου. Αντίστοιχα, στο *FLAC* χρησιμοποιήθηκε κάρναβος 1x10 τετραγωνικών στοιχείων (στις διευθύνσεις x και z, αντίστοιχα) με σύνορα ελευθέρου πεδίου στις δύο πλευρές του. Χάριν σύγκρισης, έγινε και 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 (3) αναλύσεων.

Περαιτέρω, πριν από την χρήση του *FLAC3D* για αναλύσεις 3Δ γεωμετριών βελτίωσης, θεωρήθηκε αναγκαία η διακρίβωση της αξιοπιστίας του λογισμικού για μια περι-

πτωση αναφοράς που αντιστοιχεί σε 2Δ γεωμετρία βελτίωσης. Για το σκοπό αυτό, επελέγη η γεωμετρία ενός κατακόρυφου διαφραγματικού τοίχου (στο επίπεδο yz), με πάχος  $d=1\text{m}$ , ύψος  $H=10\text{m}$  και δυστημσία  $G_i=540\text{MPa}$  που βρίσκεται εντός 10m μαλακού εδάφους με  $G_s=18\text{MPa}$ , τα οποία υπέρκεινται άκαμπτου υπόβαθρου. Η σεισμική απόκριση του τοίχου αυτού αναλύθηκε αρχικώς με τη χρήση καννάβου 80x10 τετραγωνικών στοιχείων, πλάτους 1m στο επίπεδο xz και συνόρων ελευθέρου πεδίου στις δύο πλευρές του. Στην ανάλυση αυτή, ο κατακόρυφος τοίχος προσομοιώθηκε από την κεντρική στήλη 10 στοιχείων με διαφορετική τιμή δυστημσίας ( $K = G_i/G_s = 30$ ). Η χρήση του *FLAC3D* για το ίδιο φυσικό πρόβλημα συνεπάγεται τη χρήση κυβικών στοιχείων πλάτους 1m σε κάρναβο που έχει σύνορα ελευθέρου πεδίου στις τέσσερις πλευρές του. Ο κάρναβος αυτός αποτελείται από 80x10xY στοιχεία, με τη σωστή τιμή του Y να είναι εκείνη που οδηγεί σε ταυτόσημα αποτελέσματα με τη 2Δ ανάλυση. Για την εύρεση του Y εκτελέστηκαν παραμετρικές 3Δ αναλύσεις για  $Y=1, 6, 10, 20$  και 80.

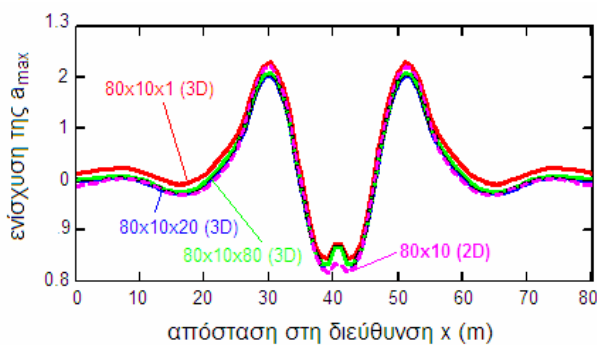
Σε όλες τις 3Δ και 2Δ αναλύσεις, η σεισμική διέγερση ήταν ένας παλμός Chang με δεσπόζουσα περίοδο  $T_e=0.1\text{sec}$ , η οποία επιβλήθηκε ως χρονοϊστορία επιτάχυνσης στους κόμβους της βάσης των καννάβων και στη διεύθυνση x. Ως κριτήριο σύγκρισης μεταξύ 3Δ και 2Δ αναλύσεων θεωρήθηκε η ενίσχυση της μέγιστης 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). Έτσι, στο Σχήμα 1 παρουσιάζονται οι ισοκαμπύλες της ενίσχυσης της  $a_{\max}$  από την 3Δ ανάλυση με  $Y = 80\text{m}$ . Οι λεπτομέρειες των ισοκαμπυλών (δηλ. οι αριθμητικές τιμές) δεν έχουν σημασία στο παρόν άρθρο. Το ουσιώδες είναι ότι οι ισοκαμπύλες υποδεικνύουν ότι η απόκριση της επιφάνειας μεταβάλλεται μόνο κατά μήκος της διεύθυνσης x και δεν είναι συνάρτηση της διεύθυνσης y, γεγονός που υπογραμμίζει το 2Δ χαρακτήρα του προβλήματος.

Αυτό παρουσιάζεται ευκρινέστερα στο Σχήμα 2, στο οποίο η μεταβολή της ενίσχυσης της  $a_{\max}$  κατά μήκος της διεύθυνσης x από την 3Δ ανάλυση του Σχήματος 1 συμφωνεί απολύτως με την αντίστοιχη μεταβολή από τη 2Δ ανάλυση. Το ερώτημα που προκύπτει είναι κατά πόσο απαιτείται μια χρονοβόρα 3Δ ανάλυση με 64000 (= 80x10x80) στοιχεία για την προσομοίωση μιας 2Δ γεωμετρίας βελτίωσης.



Σχήμα 1. Ισοκαμπύλες ενίσχυσης της  $a_{max}$  από 3D ανάλυση (κάνναβο  $80 \times 10 \times 80$ ) ενός διαφραγματικού τοίχου πάχους ( $d=1m$ )

Figure 1. Contours of amplification of  $a_{max}$  from a 3D analysis ( $80 \times 10 \times 80$  mesh) of a diaphragm wall ( $d=1m$ )



Σχήμα 2. Μεταβολή της ενίσχυσης της  $a_{max}$  από τη 2D και παραμετρικές 3D αναλύσεις ενός διαφραγματικού τοίχου πάχους ( $d=1m$ )

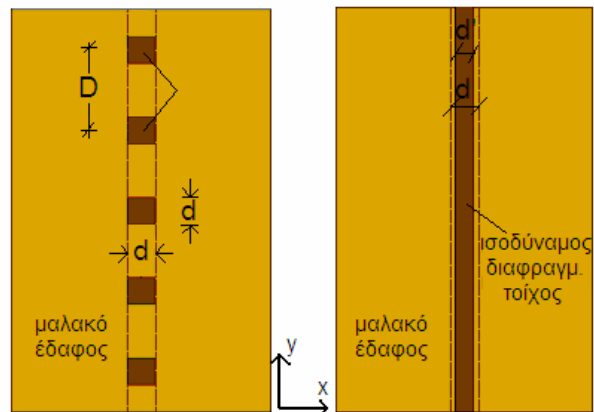
Η απάντηση δίνεται στο Σχήμα 2, στο οποίο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για δύο (2) πρόσθετες 3D αναλύσεις, με  $Y=20$  και  $Y=1$  αντίστοιχα. Παρατηρείται ότι για  $Y=20$  τα αποτελέσματα είναι ταυτόσημα, και ότι ακόμη και για  $Y=1$  οι διαφοροποιήσεις είναι ελάχιστες. Συνεπώς, για 2D γεωμετρίες βελτίωσης (στο επίπεδο  $yz$ ), αρκεί μια 3D ανάλυση με κάνναβο πάχους ενός στοιχείου στη διεύθυνση  $y$  και σύνορα ελευθέρου πεδίου.

### 3. 2D ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΕΙΡΑΣ ΠΑΣΣΑΛΩΝ

Στο Σχήμα 3α παρουσιάζεται η κάτοψη μιας σειράς πασσάλων στη διεύθυνση  $y$ , που έχουν διάμετρο  $d$  και βρίσκονται σε απόσταση  $D$

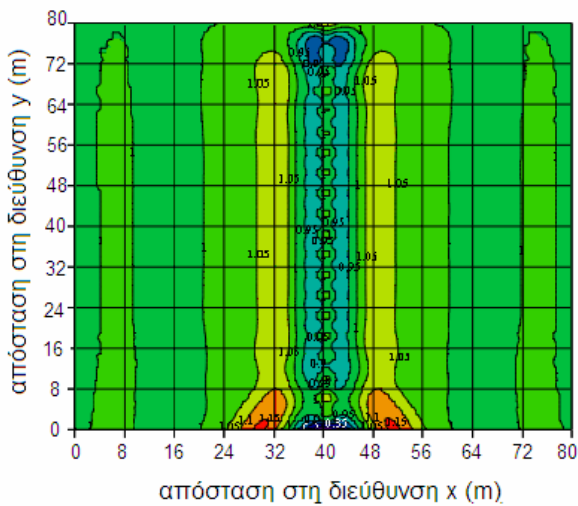
(από κέντρο σε κέντρο). Προφανώς, όταν  $D=d$ , η σειρά πασσάλων μετατρέπεται σε διαφραγματικό τοίχο, δηλαδή αποκτά αμιγώς 2D γεωμετρία. Γενικότερα όμως, μια σειρά πασσάλων στη διεύθυνση  $y$  με επιβαλλόμενη σεισμική διέγερση στη διεύθυνση  $x$  αποτελεί ένα 3D πρόβλημα.

Αυτό φαίνεται καλύτερα στο Σχήμα 4, στο οποίο παρουσιάζονται οι ισοκαμπύλες ενίσχυσης της  $a_{max}$  από μια 3D ανάλυση σεισμικής απόκρισης μιας σειράς πασσάλων με  $d=1m$ ,  $D=4m$  και  $K=30$  μέσα σε 10m μαλακού εδάφους. Η ανάλυση εκτελέστηκε με κάνναβο  $80 \times 10 \times 80$  κυβικών στοιχείων (πάχους 1m) και τις παραμέτρους εδάφους και διέγερσης που αναφέρονται στην παράγραφο 2 του άρθρου. Όπως και στο Σχήμα 1, οι λεπτομέρειες των ισοκαμπυλών του Σχήματος 4 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 3D 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 εν λόγω απόκριση δεν αλλάζει για διαφορετικές τιμές της απόστασης  $y$ . Αυτή ακριβώς η συμμετρία επιτρέπει τη διενέργεια 2D αναλύσεων για έναν «ισοδύναμο» διαφραγματικό τοίχο πάχους  $d'$ , όπως φαίνεται στο Σχήμα 3β.



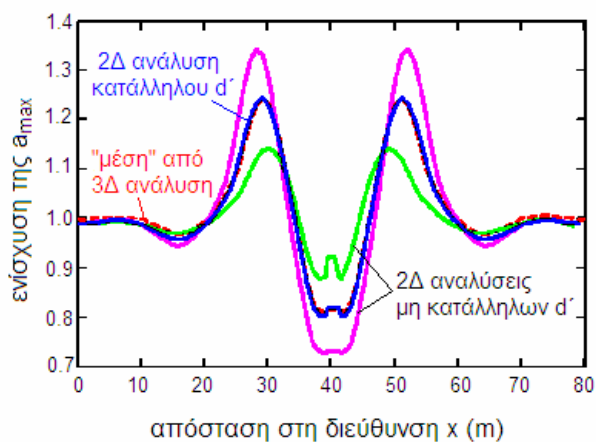
Σχήμα 3. Κατόψεις της πραγματικής 3D και της ισοδύναμης 2D γεωμετρίας μιας σειράς πασσάλων.

Figure 3. Top views of actual 3D and equivalent 2D geometries of an embedded soldier pile wall



Σχήμα 4. Ισοκαμπύλες ενίσχυσης της  $a_{max}$  από 3D ανάλυση (καννάβου  $80 \times 10 \times 80$ ) μιας σειράς πασσάλων ( $d=1m$ ,  $D=4m$ ).

Figure 4. Contours of amplification of  $a_{max}$  from a 3D analysis ( $80 \times 10 \times 80$  mesh) of an embedded soldier pile wall ( $d=1m$ ,  $D=4m$ )



Σχήμα 5. Μεταβολή ενίσχυσης της  $a_{max}$  από μια 3D και παραμετρικές 2D αναλύσεις για μια σειρά πασσάλων ( $d=1m$ ,  $D=4m$ ).

Figure 5. Variation of amplification of  $a_{max}$  from a 3D and parametric 2D analyses of an embedded soldier pile wall ( $d=1m$ ,  $D=4m$ )

Η δυνατότητα διενέργειας «ισοδύναμων» 2D αναλύσεων διερευνάται στο Σχήμα 5. Συγκεκριμένα, στο Σχήμα αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από 2D αναλύσεις για διαφραγματικούς τοίχους με διάφορες τιμές  $d'$  σε σύγκριση με τη «μέση» 3D απόκριση της ανάλυσης που παρουσιάζεται στο Σχήμα 4. 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» 3D απόκριση στο Σχήμα 5 αντικατοπτρίζει το γεγονός ότι η απόκριση μεταξύ διαδοχικών πασσάλων

δεν είναι ταυτόσημη (βλέπε ισοκαμπύλες της 3D ανάλυσης στο Σχήμα 4). Συνεπώς, μόνο η «μέση» 3D απόκριση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για συγκρίσεις με αποτελέσματα 2D αναλύσεων. Με βάση το Σχήμα 5, προκύπτει ότι «ισοδύναμες» 2D 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 άρθρο δίνεται κάνοντας χρήση διαγραμμάτων της μορφής του Σχήματος 5, δηλαδή συγκρίνοντας τα αποτελέσματα οποιασδήποτε 3D ανάλυσης (με δεδομένες τιμές  $d$  και  $D$ ) με αντίστοιχα αποτελέσματα 2D αναλύσεων για διάφορες τιμές του  $d'$ . Έτσι, κάθε ζεύγος τιμών  $d$  και  $D$  συσχετίζεται αμφιμονοσήμαντα με μια τιμή του  $d'$ . Επαναλαμβάνοντας αντίστοιχα αριθμητικά πειράματα, δημιουργήθηκε 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 3D 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 3D γεωμετρία του αλλά και στην «ισοδύναμη» 2D μορφή αυτής. Στην προσπάθεια αυτή, έγινε χρήση της θεωρίας ελαστικής δοκού. Συγκεκριμένα διερευνήθηκε η σχέση τριών (3) διαφορετικών αναλυτικών προσεγγίσεων με τη βάση δεδομένων τιμών ( $d$ ,  $D$ ,  $d'$ ), οι οποίες παρουσιάζονται αναλυτικά στη συνέχεια:

### 3.1 Ισοδυναμία Εμβαδών (A)

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

$$A_{3D} = d^2 \quad ; \quad A_{2D} = d'D \quad (1)$$

Με βάση τη σχέση (1), το  $d'$  δίνεται από:

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

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) υπονοεί ισοδυναμία της αξονικής (κατακόρυφης) δυσστησίας μεταξύ της 3Δ και της «ισοδύναμης» 2Δ γεωμετρίας, τουλάχιστον για τον υπολογισμό καθιζήσεων.

### 3.2 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.  $I_{3Δ}=I_{2Δ}$ . Με βάση το Σχήμα 3, οι ροπές αδρανείας των διατομών του βελτιωμένου εδάφους σε πλάτος D κατά μήκος του y δίνονται από:

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

Με βάση τη σχέση (3), το  $d'$  δίνεται από:

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

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 δυσστησίας μεταξύ της 3Δ και της «ισοδύναμης» 2Δ γεωμετρίας.

### 3.3 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 3, οι ροπές αντίστασης των διατομών του βελτιωμένου εδάφους σε πλάτος D κατά μήκος του y δίνονται από:

$$W_{3Δ} = d^3/6; \quad W_{2Δ} = d'^2 D/6 \quad (5)$$

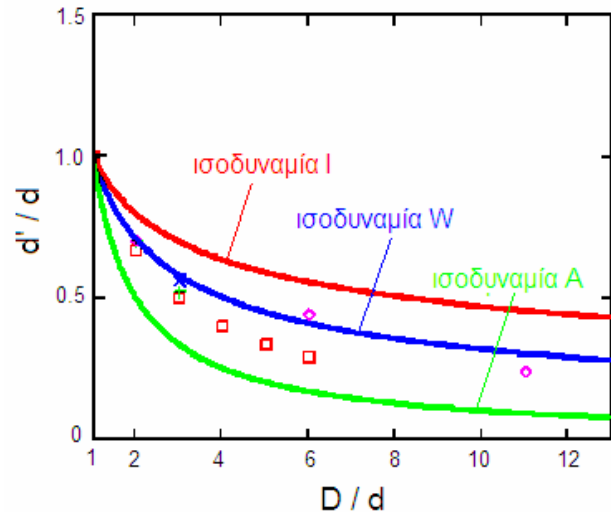
Με βάση τη σχέση (5), το  $d'$  δίνεται από:

$$d' = (d^3 / D)^{1/2} \quad (6)$$

Όπως προκύπτει από τις σχέσεις (2), (4) και (6), 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» δυσστησίας μεταξύ της 3Δ και της «ισοδύναμης» 2Δ γεωμετρίας και δεν αντιστοιχεί σε ισοδυναμία ούτε της αξονικής ούτε της καμπτικής δυσστησίας.

### 3.4 Έμμεση Εκτίμηση του $d'$

Στο Σχήμα 6 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 (6) 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 6 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.

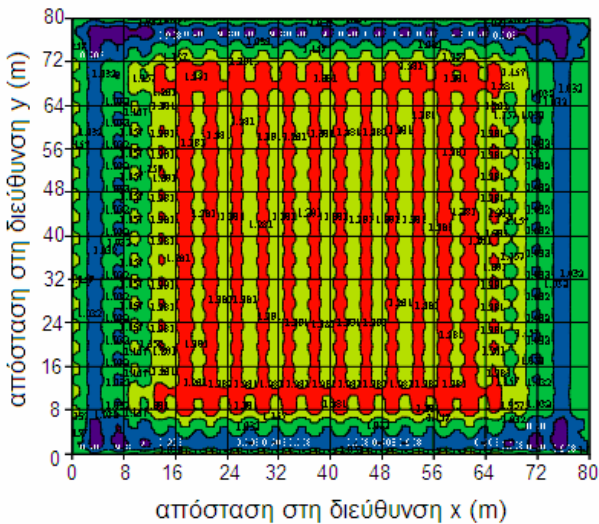


Σχήμα 6. Σύγκριση αναλυτικών προβλέψεων πάχους  $d'$  «ισοδύναμων» διαφραγματικών τοίχων με τις τιμές των αριθμητικών πειραμάτων για σειρά πασσάλων (d, D).

Figure 6. Comparison between analytical predictions of thickness  $d'$  of “equivalent” diaphragm walls and their estimates from numerical experiments for an embedded soldier pile wall (d, D)

#### 4. 2Δ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΝΝΑΒΟΥ ΠΑΣΣΑΛΩΝ

Το Σχήμα 7 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. Η ανάλυση εκτελέστηκε με καννάβο 80x10x80 κυβικών στοιχείων (πάχους 1m) και τις παραμέτρους εδάφους και διέγερσης που αναφέρονται στην παράγραφο 2.

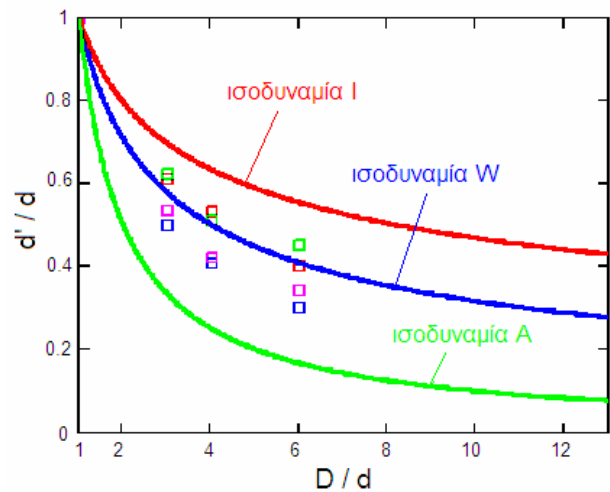


Σχήμα 7. Ισοκαμπύλες ενίσχυσης της  $a_{max}$  από 3Δ ανάλυση (καννάβου 80x10x80) ενός καννάβου 19x19 πασσάλων ( $d=1m$ ,  $D=4m$ ).  
Figure 7. Contours of amplification of  $a_{max}$  from a 3D analysis (80x10x80 mesh) of a 19x19 grid of piles ( $d=1m$ ,  $D=4m$ )

Όπως ανωτέρω, οι αριθμητικές λεπτομέρειες του Σχήματος 7 δε 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 καννάβος πασσάλων (διαμέτρου  $d$  σε απόσταση  $D$  από κέντρο σε κέντρο), μπορεί να θεωρηθεί ως μια σειρά «ισοδύναμων» διαφραγματικών τοίχων πάχους  $d'$  σε μια από-

σταση  $D$  μεταξύ τους, μια γεωμετρία βελτίωσης που προσομοιώνεται επακριβώς με 2Δ ανάλυση.

Ακολουθώντας τη μεθοδολογία της παραγράφου 3, η τιμή του  $d'$  για 2Δ αναλύσεις καννάβου πασσάλων εκτιμήθηκε 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 8 συγκρίνονται τα αποτελέσματα από τα αριθμητικά πειράματα με τις τρεις (3) αναλυτικές εκτιμήσεις της τιμής του  $d'$  των σχέσεων (2), (4) και (6).



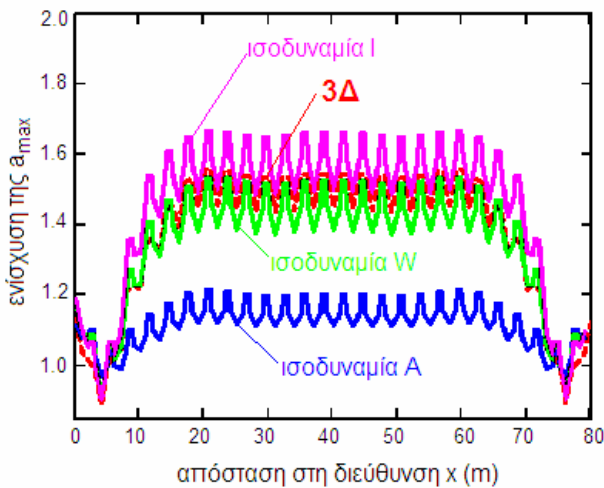
Σχήμα 8. Σύγκριση αναλυτικών προβλέψεων πάχους  $d'$  «ισοδύναμων» διαφραγματικών τοίχων με τις τιμές των αριθμητικών πειραμάτων για καννάβο πασσάλων ( $d$ ,  $D$ ).

Figure 8. Comparison between analytical predictions of thickness  $d'$  of “equivalent” diaphragm walls and their estimates from numerical experiments for a grid of piles ( $d$ ,  $D$ )

Η σύγκριση αυτή υποδεικνύει ότι η χρήση της σχέσης (6), δηλαδή της ισοδυναμίας  $W$ , αποδίδει ξανά τη βέλτιστη προσαρμογή στην 3Δ απόκριση. Επισημαίνεται ότι η χρήση της σχέσης (6) 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 8 αντιστοιχούν σε 3Δ αναλύσεις με τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:  $d = 1$  και  $2m$ ,  $D/d = 3, 4$  και  $6$ ,  $K = 15$  και  $30$ .

Τα Σχήματα 6 και 8 υποδεικνύουν σημαντική διαφορά στις τιμές του  $d'$  από τις σχέσεις (2), (4) και (6). 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 9 συγκρίνεται η «μέση» απόκριση καννάβου 27x27 πασσάλων με  $d=1\text{m}$ ,  $D/d=3$  and  $K=30$  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 9. Τυπικό λάθος στην εκτίμηση της ενίσχυσης της  $a_{\max}$  από 2Δ αναλύσεις (καννάβου 27x27 πασσάλων), βαθμονομημένων επί τη βάση των τριών (3) αναλυτικών προσεγγίσεων.

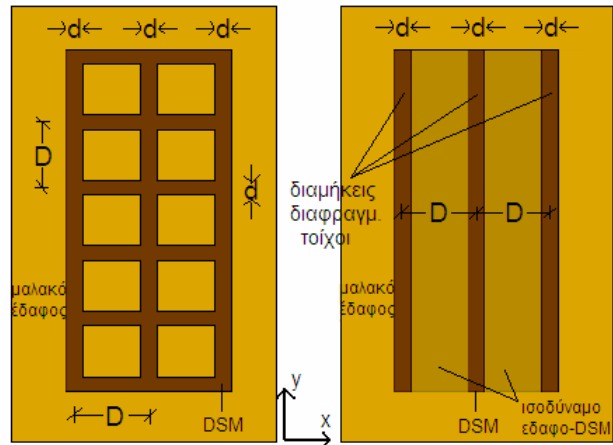
Figure 9. Typical error in the amplification of  $a_{\max}$  from 2D analyses (of a 27x27 grid of piles), calibrated on the basis of the three (3) analytical approaches

## 5. 2Δ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΝΝΑΒΟΥ ΚΥΨΕΛΩΝ

Στο Σχήμα 10α παρουσιάζεται μια τυπική κάτοψη ενός καννάβου κλειστών τετραγωνικών κυψελών, μιας γεωμετρίας βελτίωσης που συνήθως υλοποιείται με μεθόδους σταθεροποίησης (όπως η βαθιά εδαφική ανάμιξη, Deep Soil Mixing ή DSM). Αποτελείται από δύο (2) σειρές διαφραγματικών τοίχων (πάχους  $d$ ), οι οποίες είναι κάθετες μεταξύ τους και σε απόσταση  $D$  (από κέντρο σε κέντρο) κατά τη διεύθυνση  $x$  και κατά τη διεύθυνση  $y$ . Προφανώς, όταν  $D=d$  η σταθεροποίηση αφορά το 100% του φυσικού εδάφους, και μια τέτοια γεωμετρία βελτίωσης προσομοιώνεται επακριβώς με 2Δ ανάλυση.

Γενικότερα όμως, η σεισμική απόκριση μαλακού εδάφους βελτιωμένου με κυψέλες DSM είναι ένα 3Δ πρόβλημα. Αυτό φαίνεται

στο Σχήμα 11 που παρουσιάζει τις ισοκαμπύλες ενίσχυσης της  $a_{\max}$  από 3Δ ανάλυση κυψελών DSM με  $d=1\text{m}$ ,  $D=4\text{m}$  και  $K=78$  εντός 10m μαλακού εδάφους. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 11, η ενίσχυση της  $a_{\max}$  ακριβώς πάνω από τις κυψέλες DSM (από  $x = 43$  έως  $x = 56\text{m}$ ) δεν είναι ομοιόμορφη, γεγονός που υπογραμμίζει τον 3Δ χαρακτήρα του προβλήματος. Ωστόσο, ακριβώς έξω από τις κυψέλες DSM, παρατηρείται συμμετρία στην απόκριση του εδάφους, δηλαδή η απόκριση δεν αλλάζει για διαφορετικές τιμές της απόστασης  $y$ .



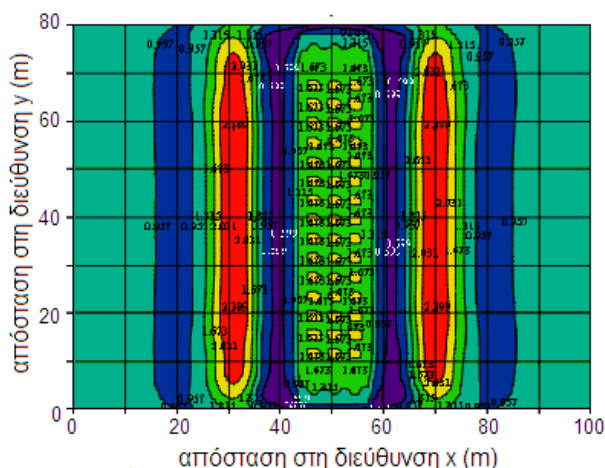
Σχήμα 10. Κατόψεις της πραγματικής 3Δ και της ισοδύναμης 2Δ γεωμετρίας ενός καννάβου κυψελών.

Figure 10. Top views of actual 3D and equivalent 2D geometries of a grid of cells

Αυτή ακριβώς η συμμετρία επιτρέπει τη διενέργεια 2Δ αναλύσεων για τους διαμήκεις διαφραγματικούς τοίχους των κυψελών DSM (πάχους  $d$  σε απόσταση  $D$ ), όπως φαίνεται στο Σχήμα 10β. Παρόλα αυτά, ακριβείς 2Δ αναλύσεις προϋποθέτουν ότι οι παράμετροι του γεω-υλικού μεταξύ των ως άνω διαμήκων τοίχων DSM (το «ισοδύναμο» εδαφο-DSM του Σχήματος 10β) έχουν βαθμονομηθεί κατάλληλα, ώστε να λαμβάνεται υπόψη εμμέσως η ύπαρξη των εγκαρσίων τοίχων DSM. Αυτή η βαθμονόμηση του «ισοδύναμου» εδαφο-DSM γεω-υλικού συνίσταται στον ορισμό μιας ισοδύναμης τιμής του μέτρου διάτμησης  $G_{eq}$  σύμφωνα με τη σχέση:

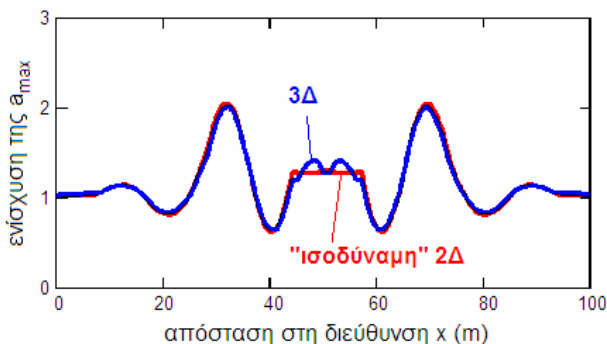
$$G_{eq}/G_s = [1 - (d/D)] + K (d/D) \quad (7)$$

Η σχέση (7) προκύπτει θεωρώντας ισοδυναμία της τιμής του γινομένου  $GI$  για τα γεω-υλικά που βρίσκονται μεταξύ των διαμήκων τοίχων DSM στην 3Δ και την «ισοδύναμη» 2Δ γεωμετρία βελτίωσης.



Σχήμα 11. Ισοκαμπύλες ενίσχυσης της  $a_{max}$  από 3D ανάλυση ενός καννάβου κυψελών DSM ( $d=1m$ ,  $D=4m$ ).

Figure 11. Contours of amplification of  $a_{max}$  from a 3D analysis of a grid of closed DSM cells ( $d=1m$ ,  $D=4m$ )



Σχήμα 12. Τυπικό λάθος στην εκτίμηση της ενίσχυσης της  $a_{max}$  από 2Δ ανάλυση ενός καννάβου κυψελών DSM ( $d=1m$ ,  $D=6m$ ).

Figure 12. Exemplary error in the estimation of amplification of  $a_{max}$  from a 2D analysis of a grid of closed DSM cells ( $d=1m$ ,  $D=6m$ )

Ως παράδειγμα, στο Σχήμα 12 συγκρίνεται (σε όρους ενίσχυσης της  $a_{max}$ ) η «μέση» απόκριση από 3Δ ανάλυση με την «ισοδύναμη» 2Δ ανάλυση που βαθμονομείται με βάση τη Σχέση (7). Οι αναλύσεις αφορούν κυψέλες DSM που συγκροτούνται από τρεις (3) διαμήκεις τοίχους (με  $d=1m$ ,  $D/d=6$  και  $K=78$ ) και βρίσκονται εντός 10m μαλακού εδάφους. Η 3Δ ανάλυση εκτελέστηκε με κάρναβο  $100 \times 10 \times 80$  κυβικών στοιχείων (πάχους 1m) και τις παραμέτρους εδάφους και διέγερσης που αναφέρονται στην παράγραφο 2. Αντίστοιχα, η 2Δ ανάλυση εκτελέστηκε με κάρναβο  $100 \times 10$  τετραγωνικών στοιχείων (πλάτους 1m) και ένα «ισοδύναμο» υλικό εδάφους-DSM, του οποίου η βαθμονόμηση στηρίχθηκε στη σχέση (7). Προκύπτει άριστη συμφωνία στις προβλέψεις από τη

«μέση» 3Δ και την «ισοδύναμη» 2Δ ανάλυση, ειδικά στις περιοχές εκτός των κυψελών DSM. Εντός των κυψελών DSM, η συμφωνία είναι απλώς ικανοποιητική, αλλά η σύγκριση αναμένεται να είναι καλύτερη για πιο συνήθεις γεωμετρίες κυψελών DSM όπου ο λόγος  $D/d$  σπάνια υπερβαίνει το 4 – 5.

## 6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο παρόν άρθρο διακριβώνεται η ορθή μεθοδολογία αντικατάστασης χρονοβόρων 3Δ αναλύσεων σεισμικής απόκρισης βελτιωμένων εδαφών με «ισοδύναμες» 2Δ αναλύσεις. Αυτό επιτυγχάνεται με μετασχηματισμό της 3Δ γεωμετρίας βελτίωσης σε μια «ισοδύναμη» 2Δ γεωμετρία, επί τη βάση της ισοδυναμίας των ροπών αντίστασης  $W$  των διατομών της βελτίωσης στις δύο γεωμετρίες. Ο μετασχηματισμός αφορά την ανάλυση μονής σειράς ή/και καννάβου πασσάλων, και ισχύει ανεξαρτήτως της μεθόδου βελτίωσης και των χαρακτηριστικών της διέγερσης. Για γεωμετρίες κλειστών κυψελών (π.χ. με χρήση DSM), «ισοδύναμες» 2Δ αναλύσεις είναι δυνατές με κατάλληλη βαθμονόμηση του μέτρου δυστημσίας του γεωυλικού εντός των κυψελών ώστε να λαμβάνεται υπόψη η ύπαρξη των εγκαρσίων διαφραγματικών τοίχων.

## 7. ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η έρευνα αυτή χρηματοδοτήθηκε από τη Γενική Γραμματεία Έρευνας και Τεχνολογίας και την Έδραση – Χ. Ψαλλίδας Α.Τ.Ε.

## 8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Barron R. A. (1948), "Consolidation of fine-grained soils by drain wells", Transactions of the American Society of Civil Engineers, 113, pp. 718-742
- Idriss, I. M. and Sun J. I. (1992) "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
- Itasca Consulting Group Inc (1993), "FLAC: Fast Lagrangian Analysis of Continua"
- Itasca Consulting Group Inc (1997), "FLAC3D: Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3D"
- Priebe, H. J. (1976), "Abschatung des Setzungsverhaltens eines durch Stopfverdichtung verbesserten Baugrundes", *Die Bautechnik*, 5