

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ  
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε.

**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**“ Προστασία κατασκευών από επιφανειακές  
εδαφικές ταλαντώσεις με τη χρήση  
ορυγμάτων”**

Σπουδαστής:  
**Ντέντια Αλμπάνο**

ΕΠΟΠΤΕΥΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ:  
**Τσινόπουλος Στέφανος**

**Πάτρα, Νοέμβριος 2014**

**© 2014 – All rights reserved**

**© 2014, copyright υπό Αλμπάν Ντέντια**

Πτυχιακή εργασία για τη λήψη πτυχίου στη Μηχανολογία από το Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Τ.Ε. της Σχολής Τεχνολογικών Εφαρμογών του Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Δυτικής Ελλάδας.



***“ Παιδεία ευτυχούσι μεν εστί κόσμος, ατυχούσι δε καταφύγιον” .***

**Ισοκράτης**

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

*Με την περαίωση της πτυχιακής μου εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τους σημαντικούς κατ' εμέ ανθρώπους, που με στήριξαν και με βοήθησαν το διάστημα, που εργαζόμουν.*

*Ειδικότερα, τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Τσινόπουλο Στέφανο, Επίκουρο καθηγητή ΤΕΙ Δυτικής Ελλάδας, για το αξιοθαύμαστο ενδιαφέρον του και την πολύτιμη βοήθειά του.*

*Και ευχαριστώ από τα βάθη της καρδιάς μου, την υπέροχη σύντροφό μου για την ακατάπαυστη υποστήριξη και υπομονή της.*

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της παρούσας πτυχιακής εργασίας είναι η επίλυση των προβλημάτων, τα οποία επέρχονται από τις επιφανειακές εδαφικές ταλαντώσεις στις διάφορες κατασκευές, με την μέθοδο των ορυγμάτων. Η πηγή των επιφανειακών εδαφικών ταλαντώσεων μπορεί να είναι διέλευση βαρέων οχημάτων υψηλής ταχύτητας, όπως είναι τα τραίνα και τα φορτηγά και οι διάφορες εργασίες κατασκευών όπως οδήγηση πασάλων, συμπίεση οδοστρώματος, εκρήξεις κ.ά. Αυτές οι δονήσεις μπορούν να προκαλέσουν ασήμαντες ή σημαντικές βλάβες στα κτήρια αλλά και ενόχληση στους κατοίκους.

Η πτυχιακή εργασία αποτελείται από τέσσερα κεφάλαια, όπου στο πρώτο κεφάλαιο αναπτύσσεται το πρόβλημα, που δημιουργούν οι εδαφικές ταλαντώσεις, οι τρόποι αντιμετώπισής του και οι κυριότεροι μέθοδοι αντιμετώπισης. Στο δεύτερο κεφάλαιο, αναλύεται η διάδοση των κυμάτων στον ελαστικό χώρο, η έννοια του ημίχωρου, η έννοια της σκέδασης, και οι ταχύτητες των επιφανειακών κυμάτων. Στο τρίτο κεφάλαιο, γίνεται λόγος για την μέθοδο των συνοριακών στοιχείων, για την εξέλιξη της με το πέρασμα των χρόνων και για τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της μεθόδου. Επίσης, στο ίδιο κεφάλαιο γίνεται ανάλυση και περιγραφή του προγράμματος ISOBEM. Τέλος, στο τέταρτο κεφάλαιο, γίνεται η προσομοίωση του πραγματικού προβλήματος μέσω του προγράμματος ISOBEM, όπου και εξάγονται πίνακες, γραφήματα και αποτελέσματα

**Λέξεις κλειδιά:** Όρυγμα, επιφανειακή ταλάντωση, παθητική προστασία, ενεργητική προστασία, σκέδαση, επιφανειακό κύμα, μέθοδος συνοριακών στοιχείων, ISOBEM.

## OVERVIEW

The present paper aims to solve the problems created by the soil surface oscillations in the several constructions, with the trenching method. The source of soil surface oscillations may be, high speed passing heavy vehicles, such as trains and trucks and various construction works, such as pile driving, roadbed compaction, blasting and similar things. These vibrations can cause minor or major damage to buildings and nuisance to residents.

As such, the present paper is composed of four chapters, where in the first chapter expands on the problem that creates the territorial oscillations, ways of their confrontation and the mainer methods of confrontation. The second chapter analyzes the wave propagation in elastic space, the concept of half-spaces, the concept of scattering, and the velocities of surface waves. The chapter then focuses on the method of boundary elements, her development by passing the years and the advantages and the disadvantages of this method. Also, in this chapter become analysis and description of program ISOBEM. Lastly, the fourth chapter carries out the simulation of real problem via program ISOBEM and is exported the tables, the graphs and the results.

## Πίνακας περιεχομένων

ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	iv
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	v
OVERVIEW .....	vi
ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ.....	ix
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	x
Κεφάλαιο 1: Απομόνωση κατασκευών από τα επιφανειακά κύματα .....	12
1.1. Το πρόβλημα που δημιουργούν τα επιφανειακά κύματα .....	12
1.2. Μέθοδοι αντιμετώπισης του προβλήματος.....	13
1.2.1. Ενεργητική & Παθητική προστασία .....	13
1.2.2. Οι κυριότερες μέθοδοι αντιμετώπισης.....	14
Κεφάλαιο 2 : Διάδοση κυμάτων σε ελαστικό χώρο .....	13
2.1. Δημιουργία και διάδοση επιφανειακών κυμάτων σε ελαστικό χώρο .....	13
2.1.1. Είδη κυμάτων .....	13
2.1.2. Τι είναι ημίχωρος.....	14
2.2. Σκέδαση των επιφανειακών κυμάτων .....	15
2.2.1. Τι είναι σκέδαση ή διασπορά.....	15
2.2.2. Ταχύτητες επιφανειακών κυμάτων Rayleigh.....	15
Κεφάλαιο 3: Η Μέθοδος των Συνοριακών Στοιχείων .....	16
3.1. Ιστορική εξέλιξη της Μεθόδου των Συνοριακών Στοιχείων (ΜΣΣ).....	16
3.1.1. Πλεονεκτήματα της ΜΣΣ .....	17
3.1.2. Μειονεκτήματα της ΜΣΣ.....	17
3.1.3. ΜΣΣ και ορύγματα .....	18
3.2. Περιγραφή του προγράμματος Integrated Software on the Boundary Element Method (ISOBEM).....	18
Κεφάλαιο 4: Πειραματική διαδικασία και αποτελέσματα .....	19
4.1. Τοποθέτηση του προβλήματος.....	19
4.2. Προσομοίωση μέσω προγράμματος ISOBEM.....	20
4.3. Επίλυση του προβλήματος με το πρόγραμμα ISOBEM για συχνότητα αρμονικής δύναμης 25Hz.....	21
4.3.1. Αποτελέσματα για συχνότητα αρμονικής δύναμης $f = 25\text{Hz}$ με διαφορετικά βάθη ορύγματος και με πλάτος ορύγματος $c = 0,5\text{m}$ .....	21
4.3.2. Αποτελέσματα για συχνότητα αρμονικής δύναμης $f = 25\text{Hz}$ με διαφορετικά βάθη ορύγματος και με πλάτος ορύγματος $c = 0,75\text{m}$ .....	29
4.3.3. Αποτελέσματα για συχνότητα αρμονικής δύναμης $f = 25\text{Hz}$ με διαφορετικά βάθη ορύγματος επικαλυμμένου με σκυρόδεμα και με πλάτος ορύγματος $c = 0,5\text{m}$ .....	36

4.4. Επίλυση του προβλήματος με το πρόγραμμα ISOBEM για συχνότητα αρμονικής δύναμης 50Hz.....	44
4.4.1. Αποτελέσματα για συχνότητα αρμονικής δύναμης $f = 50\text{Hz}$ με διαφορετικά βάθη ορύγματος και με πλάτος ορύγματος $c = 0,5\text{m}$ .....	44
4.4.2. Αποτελέσματα για συχνότητα αρμονικής δύναμης $f = 50\text{Hz}$ με διαφορετικά βάθη ορύγματος και με πλάτος ορύγματος $c = 0,75\text{m}$ .....	51
4.4.3. Αποτελέσματα για συχνότητα αρμονικής δύναμης $f = 50\text{Hz}$ με διαφορετικά βάθη ορύγματος επικαλυμμένου με σκυρόδεμα και με πλάτος ορύγματος $c = 0,5\text{m}$ .....	57
4.5. Επίλυση του προβλήματος με το πρόγραμμα ISOBEM για συχνότητα αρμονικής δύναμης 75Hz .....	64
4.5.1. Αποτελέσματα για συχνότητα αρμονικής δύναμης $f = 75\text{Hz}$ με διαφορετικά βάθη ορύγματος και με πλάτος ορύγματος $c = 0,5\text{m}$ .....	64
4.5.2. Αποτελέσματα για συχνότητα αρμονικής δύναμης $f = 75\text{Hz}$ με διαφορετικά βάθη ορύγματος και με πλάτος ορύγματος $c = 0,75\text{m}$ .....	70
4.5.3. Αποτελέσματα για συχνότητα αρμονικής δύναμης $f = 75\text{Hz}$ με διαφορετικά βάθη ορύγματος επικαλυμμένου με σκυρόδεμα και με πλάτος ορύγματος $c = 0,5\text{m}$ .....	76
4.6. Επίλυση του προβλήματος με το πρόγραμμα ISOBEM για συχνότητα αρμονικής δύναμης 100Hz.....	83
4.6.1. Αποτελέσματα για συχνότητα αρμονικής δύναμης $f = 100\text{Hz}$ με διαφορετικά βάθη ορύγματος με πλάτος ορύγματος $c = 0,5\text{m}$ και με μήκος στοιχείων $L = 0,1\text{m}$ .....	83
4.6.2. Αποτελέσματα για συχνότητα αρμονικής δύναμης $f = 100\text{Hz}$ με διαφορετικά βάθη ορύγματος με πλάτος ορύγματος $c = 0,5\text{m}$ και με μήκος στοιχείων $L = 0,7\text{m}$ .....	90
4.6.3. Αποτελέσματα για συχνότητα αρμονικής δύναμης $f = 100\text{Hz}$ με διαφορετικά βάθη ορύγματος, με πλάτος ορύγματος $c = 0,75\text{m}$ και με μήκος στοιχείων $L = 0,1\text{m}$ .....	97
4.6.4. Αποτελέσματα για συχνότητα αρμονικής δύναμης $f = 100\text{Hz}$ με διαφορετικά βάθη ορύγματος επικαλυμμένου με σκυρόδεμα και με πλάτος ορύγματος $c = 0,5\text{m}$ .....	103
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	110
BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	111
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ .....	113



## ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ

M.Σ.Σ.	Μέθοδος Συνοριακών Στοιχείων
I.S.O.B.E.M.	Integrated Software on the Boundary Element Method
W.I.B.	Wave Impedance Block/Μέθοδος Τεχνητού Υπόβαθρου
D.R.M.	Dual Reciprocity Method
A.E.M.	Analog Equation Method

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στον σύγχρονο τρόπο ζωής οι κατασκευές καινούριων κτιρίων, οι επισκευές των δρόμων, η διέλευση αυτοκινήτων κοντά σε κατοικημένα κτίρια είναι ένα συχνό φαινόμενο. Τα προαναφερθέντα, όμως, ακολουθούνται από έντονες εδαφικές επιφανειακές ταλαντώσεις, που δύνανται να προκαλέσουν δυσλειτουργίες ή και ζημιές σε οικίες, νοσοκομεία, εργαστήρια κατασκευής ευαίσθητων μηχανημάτων κ.ά. Ως εκ τούτου, για την ομαλή λειτουργία τους θα πρέπει να απομονωθούν από τις εδαφικές αυτές ταλαντώσεις.

Κατά την τελευταία δεκαετία, απασχολεί ολοένα και περισσότερους μελετητές το πρόβλημα των επιφανειακών ταλαντώσεων, οι οποίοι έχουν χρησιμοποιήσει διάφορες αριθμητικές και πειραματικές μεθόδους για την επίλυσή. Οι αριθμητικές μέθοδοι, που έχουν χρησιμοποιηθεί είναι κυρίως η Μέθοδος των Πεπερασμένων στοιχείων και η Μέθοδος των Συνοριακών στοιχείων (Mehrab Jesmani et al.,2011).

Η παρούσα πτυχιακή εργασία εξετάζει και αναλύει το πρόβλημα, που δημιουργούν οι εδαφικές επιφανειακές ταλαντώσεις σε διάφορες κατασκευές. Ως αριθμητική μέθοδος χρησιμοποιείτε η Μέθοδος των Συνοριακών Στοιχείων (ΜΣΣ), η οποία επιτυγχάνεται μέσω ενός υπολογιστικού προγράμματος με την ονομασία ISOBEM. Η λύση, που προτείνεται, είναι η απομόνωση των επιφανειακών εδαφικών ταλαντώσεων μέσω κενών και γεμάτων ορυγμάτων. Βάσει των προαναφερθέντων στο πρώτο κεφάλαιο αναλύεται το πρόβλημα, που δημιουργούν οι επιφανειακές εδαφικές ταλαντώσεις, τις οποίες ο άνθρωπος τις αντιλαμβάνεται ως δονήσεις του εδάφους. Οι δονήσεις αυτές, μπορούν να προκαλέσουν ασήμαντες ή και σημαντικές βλάβες στα επιμέρους κτίρια, τα οποία βρίσκονται σε μια κοντινή απόσταση στη πηγή δονήσεως. Διάφοροι μελετητές από διάφορες χώρες έχουν προτείνει ποικίλα όρια για το τι μπορούν να προκαλέσουν οι δονήσεις αυτές. Για να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα των δονήσεων υπάρχουν δύο γενικοί τρόποι, ο πρώτος είναι η ενεργητική προστασία όπου η απομόνωση γίνεται κοντά στη πηγή, και ο δεύτερος είναι η παθητική προστασία όπου η απομόνωση γίνεται κοντά στην προστατευόμενη περιοχή. Στη συνέχεια του κεφαλαίου, αναφέρονται οι κυριότερες μέθοδοι αντιμετώπισης των εδαφικών δονήσεων, οι οποίες είναι τα προστατευτικά ορύγματα, η βαθιά τεχνολογία μίξης, η μέθοδος του τεχνικού υπόβαθρου και οι προστατευτικές πασσαλοστοιχίες.

Οι εδαφικές επιφανειακές ταλαντώσεις μεταδίδονται μέσω κυμάτων, και για αυτόν τον λόγο στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται ανάπτυξη γύρω από την διάδοση των κυμάτων στον ελαστικό χώρο. Σε γενικότερο πλαίσιο, τα κύματα υποδιαιρούνται σε δύο ομάδες, τα κύματα ανάκλασης, που ταξιδεύουν προς τα κάτω και προς την πηγή που εκπέμπει τα κύματα, και τα μεταδιδόμενα κύματα, τα οποία ταξιδεύουν μακριά από την πηγή. Συνεπώς, τα κύματα χωρίζονται σε διαμήκη κύματα, εγκάρσια κύματα και τα επιφανειακά κύματα, όπου μέσα σε άλλα περιλαμβάνει και τα κύματα Rayleigh. Στη συνέχεια αναλύεται η έννοια του ημίχωρου και η έννοια της σκέδασης.

Στο τρίτο κεφάλαιο, η πτυχιακή ασχολείται με την Μέθοδο των Συνοριακών Στοιχείων και το πρόγραμμα ηλεκτρονικού υπολογιστή ISOBEM. Η Μέθοδος των συνοριακών στοιχείων (ΜΣΣ), μέχρι τις αρχές της δεκαετίας του '80, λεγόταν Μέθοδος Συνοριακών Ολοκληρωτικών Εξισώσεων. Η εν λόγω μέθοδος αποσκοπούσε στην επίλυση των προβλημάτων της μαθηματικής φυσικής και βασίστηκε στο έργο του G. Green, ο οποίος το 1828 εισήγαγε για τα προβλήματα αυτά την έννοια της συναρτήσεως Green στην ολοκληρωτική παράσταση της λύσεως των προβλημάτων Dirichlet και Neumann, που διέπονται από την εξίσωση Laplace. Επιπλέον, αναφέρονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της μεθόδου, ενώ γίνεται και η περιγραφή του προγράμματος ISOBEM. Το εν λόγω πρόγραμμα είναι ένα φιλικό προς τον χρήστη γραφικό περιβάλλον, που του επιτρέπει την κατασκευή και επίλυση πολύπλοκων προβλημάτων, ενώ παράλληλα προσφέρει τη δυνατότητα κάλυψης ενός ευρύ φάσματος προβλημάτων από πολλά επιστημονικά πεδία.

Κατά το τέταρτο κεφάλαιο τοποθετείται το πρόβλημα, του οποίου γίνεται η προσομοίωση μέσω του προγράμματος ISOBEM. Ως εκ τούτου, περιγράφονται αναλυτικά τα βήματα υλοποίησης της προσομοίωσης, και κατόπιν εξάγονται τα αποτελέσματα υπό μορφή

γραφημάτων, πινάκων και διαγραμμάτων, συναρτήσει διαφορετικών συχνοτήτων αρμονικής δύναμης και διαφορετικών (ως προς το βάθος & το πλάτος) ορυγμάτων. Ακόμα να σημειωθεί πως η προσομοίωση του προβλήματος γίνεται μια φορά για κενά ορύγματα και μία φορά για ορύγματα, τα οποία είναι γεμάτα με σκυρόδεμα. Τέλος, από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων διεξάγονται και παρουσιάζονται τα συμπεράσματα.

## Κεφάλαιο 1: Απομόνωση κατασκευών από τα επιφανειακά κύματα

### 1.1. Το πρόβλημα που δημιουργούν τα επιφανειακά κύματα

Ο άνθρωπος αντιλαμβάνεται τα επιφανειακά κύματα ως εδαφικές δονήσεις, τα οποία προκαλούνται κυρίως από την διέλευση βαρέων οχημάτων υψηλής ταχύτητας, όπως είναι τα τραίνα και τα φορτηγά και από διάφορες εργασίες κατασκευών όπως οδήγηση πασάλων, συμπίεση οδοστρώματος, εκρήξεις κτλ. (Boo Hyun Nam et al., 2013, Adam & Estorff, 2004, Guang Yun et al, 2007). Οι δονήσεις αυτές μπορούν να προκαλέσουν ασήμαντες ή και σημαντικές βλάβες στα επιμέρους κτίρια, τα οποία βρίσκονται σε μια κοντινή απόσταση στη πηγή δονήσεως. Γενικότερα οι δονήσεις, που προκαλούνται από την διέλευση οχημάτων, δεν είναι αρκετά μεγάλες ώστε να προκαλέσουν κάποια βλάβη στα κτήρια, όμως δύναται να προκαλέσουν ενόχληση στους κατοίκους (πίνακας 1) και πιθανές βλάβες σε ευαίσθητα μηχανήματα εργαστήριων όπως νοσοκομείων, εργαστήριων κατασκευών ευαίσθητων μηχανημάτων κ.λπ.) (Boo Hyun Nam et al, 2013, Καττής, 1997, Adam & Estorff, 2004, Guang Yun et al, 2007).

**Πίνακας 1** Η αντίδραση των ανθρώπων και της ζημίας στα κτήρια από τις συνεχείς δονήσεις (Whiffen και Leonard, 1971) στο (Boo Hyun Nam et al, 2013:100).

PPV, in./sec	Ανθρώπινη αντίδραση	Επίδραση των κτηρίων
0.006-0.019	ευαισθησία της αντίληψης δυνατότητα της παρείσφρησης	Απίθανος να προκαλέσει τη ζημία οποιουδήποτε τύπου
0.08	Εύκολα αντιληπτός	Ουσιαστικά κανένας κίνδυνος "αρχιτεκτονικής" ζημίας
0.1	Κατώτερο όριο της ενόχλησης	Συνιστώμενο ανώτερο επίπεδο για τα "ερείπια και τα αρχαία μνημεία"
0.20	Ενοχλητικό για τους ανθρώπους σε κτίρια	Κίνδυνος ευαισθησιών αρχιτεκτονικής ζημίας στις κανονικές κατοικίες (επικοινωνιασμένοι τοίχοι, κ.λπ.)
0.4-0.6	Θεωρημένος δυσάρεστος	Προκαλεί "αρχιτεκτονική" ζημία και τις πιθανές μικρές υλικές ζημιές

Ειδικότερα, για τα όρια των επιφανειακών κυμάτων υπάρχουν διάφορα πρότυπα τα οποία έχουν προταθεί από πολλές χώρες και καθορίζουν το τι είναι ικανά να προκαλέσουν ανάλογα με την συχνότητα και την απόσταση τους από τις δομές. Τέτοιου είδους πρότυπα έχουν υποδείξει το αμερικανικό γραφείο ορυχείων, η Ελβετική Ένωση, το Ηνωμένο Βασίλειο, η Αυστραλία και η Γερμανία, όπου εξ αυτών παρουσιάζονται παρακάτω συνοπτικά τα Ελβετικά πρότυπα ορίων(πίνακας 2) (Boo Hyun Nam et al, 2013).

**Πίνακας 2** Ελβετικά πρότυπα για τη δόνηση στα κτήρια (SN 640 312, ελβετική ένωση για την τυποποίηση, 1978) (Boo Hyun Nam et al, 2013:100).

Κλάση οικοδόμησης	Πηγή δόνησης	Φάσμα συχνότητας, Hz	PPV, in./sec
I.	Μηχανές, Κυκλοφορία	10 -30	0.5
		30-60	0.5-0.7
	Ανατίναξη	10-60	1.2
		60-90	1.2-1.6
II.	Μηχανές, Κυκλοφορία	10 -30	0.6
		30-60	0.3-0.5
	Ανατίναξη	10-60	0.7
		60-90	0.1-1.0
III.	Μηχανές, Κυκλοφορία	10 -30	0.2
		30-60	0.2-0.3
	Ανατίναξη	10-60	0.54
		60-90	0.5-0.7
IV.	Μηχανές, Κυκλοφορία	10 -30	0.12
		30-60	0.12-0.2
	Ανατίναξη	10-60	0.3
		60-90	0.3-0.5

(Σημείωση: I - Κτίρια από χάλυβα ή οπλισμένο σκυρόδεμα, όπως εργοστάσια, τοίχων αντιστήριξης, γέφυρες, πύργους χάλυβα, ανοιχτά κανάλια, υπόγειους θαλάμους και σήραγγες με και χωρίς συγκεκριμένη επένδυση? II - Ίδρυμα τοίχοι και δάπεδα από σκυρόδεμα, τοίχους από σκυρόδεμα ή τοιχοποιία, λιθοδομή τοίχων αντιστήριξης? III - Κτίρια όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, αλλά με ξύλινες οροφές και τοίχους σε τοιχοποιία, IV - Κατασκευή πολύ ευαίσθητα σε κραδασμούς, τα αντικείμενα ιστορικού ενδιαφέροντος) (Boo Hyun Nam et al 2013:100).

## 1.2. Μέθοδοι αντιμετώπισης του προβλήματος

### 1.2.1. Ενεργητική & Παθητική προστασία

Οι μέθοδοι αντιμετώπισης του προβλήματος, δηλαδή η απομόνωση κραδασμών για τα συστήματα, που αλληλεπιδρούν μεταξύ εδάφους και κατασκευής, μπορεί να ταξινομηθούν σε δύο κατηγορίες, σε ενεργή και σε παθητική προστασία (Rahman και Orr, 2006).

Η ενεργητική προστασία ή απομόνωση, ονομάζεται όταν το εμπόδιο, όπου ως εμπόδιο θεωρείται το οποιοδήποτε μέσω που τοποθετείται, εγκαθίσταται κοντά στη πηγή δόνησης ή γύρο από αυτή με αποτέλεσμα τα διαδιδόμενα κύματα να παρεμποδίζονται απευθείας, π.χ. για την απομόνωση των κραδασμών στα τρένα για ενεργή προστασία τοποθετούνται τα ελαστομερές μαξιλάρια σιδηροδρομικών και τα στρώματα απομόνωσης από λάστιχο μεταξύ του αμμοχάλικου και υπεδάφους. Σε γενικά πλαίσια ως ενεργή προστασία χρησιμοποιούνται διάφορες μηχανικές διατάξεις με χαρακτηριστικό παράδειγμα τα βισκοελαστικά στηρίγματα σε μηχανές (Rahman και Orr, 2006, Αθανασόπουλος & Ιωάννου, 2006, Καττής, 1997).

Από την άλλη η παθητική προστασία σχετίζεται με την τοποθέτηση κατάλληλου εμποδίου πριν ή γύρο από τη δομή – κατασκευή η οποία δέχεται τα κύματα.

Πιο επεξηγηματικά η ενεργή προστασία απομονώνει αποτελεσματικά μόνο πηγές οι οποίες είναι σταθερές, ενώ η παθητική προστασία απομονώνει αποτελεσματικά ένα ευρύ φάσμα πηγών, συμπεριλαμβάνοντας και τις κινούμενες πηγές, κυρίως όμως απομονώνει τα κύματα Rayleigh, τα οποία μεταφέρουν το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας (Rahman και Orr, 2006, Αθανασόπουλος και Ιωάννου, 2006, Καττής, 1997).

Έτσι λοιπόν τα ορύγματα, είτε κενά είτε γεμάτα με κάποιο υλικό, μπορούν να τοποθετηθούν ενεργητικά και παθητικά, όπου στη πρώτη περίπτωση ο στόχος τους είναι η απομόνωση της πηγής και στη δεύτερη είναι η απομόνωση της κατασκευής (Καπτής, 1997).

Τέλος, υπάρχουν πολλές εφαρμογές, που μπορούν να θεωρηθούν ως συστήματα διαλογής κραδασμών. Η μείωση των κραδασμών μπορεί να επιτευχτεί:

- ρυθμίζοντας την περιεχόμενη συχνότητα της διέγερσης,
- αλλάζοντας την θέση και την κατεύθυνση της πηγής δόνησης,
- τροποποιώντας τα χαρακτηριστικά σκέδασης κυμάτων της εδαφολογικής κατάθεσης, και
- διακόπτοντας μερικώς τη διάδοση των κυμάτων στη δομή ή παρέχοντας στη δομή περισσότερη απόσβεση εγκαταστάινοντας κάποιες συσκευές όπως οι πρόσθετες διατάξεις απόσβεσης ή άλλο σύστημα απομόνωσης βάσεων (Oreghon et al, 2012).

Ωστόσο, τέτοιες λύσεις δεν έχουν μεγάλο πεδίο εφαρμογής, καθώς είναι δαπανηρές και ακατάλληλες για μεγάλες κατασκευές ή εγκαταστάσεις (Καπτής, 1997).

### 1.2.2. Οι κυριότερες μέθοδοι αντιμετώπισης

Κατά τη διάρκεια των τελευταίων δεκαετιών έχουν αναπτυχθεί ποικίλοι μέθοδοι προκειμένου να απομονωθούν οι δονήσεις του εδάφους, όπου εξ αυτών οι πιο συχνές μέθοδοι είναι οι εξής

- *Βαθιά Τεχνολογία Μίξης*

Η βαθιά τεχνολογία μίξης είναι μια τεχνολογία επίγειας τροποποίησης, που αναμιγνύει το κανονικό χώμα με ένα τσιμεντένιο υλικό όπως ο ασβέστης, (lime) το τσιμέντο, κ.λπ.

Τα πλεονεκτήματα αυτής της μεθόδου είναι:

- η γρήγορη διαδικασία κατασκευής,
- το ευρύ φάσμα των ολοκληρωμένων προϊόντων(από άποψη ελέγξιμη δύναμη, ακαμψία, φιλική διάθεση κ.λπ.),
- και τα περιβαλλοντικά, από άποψη θορύβου και δόνησης για την κατασκευή στις αστικές περιοχές (Porbaha και Kim, 2003: 3)

- *Η Μέθοδος του Τεχνητού Υπόβαθρου ( Wave Impedance Block -WIB)*

Η αρχή της μεθόδου του τεχνικού υπόβαθρου (WIB) στηρίζεται «στην αξιοποίηση των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών της δυναμικής συμπεριφοράς εδαφικής στρώσης υπερκείμενης βραχώδους υποβάθρου» (Chouw et al., 1991 στο Αθανασόπουλος και Ιωάννου, 2006:3). Ως εκ τούτου «όταν η συχνότητα μιας επιφανειακής πηγής παραγωγής ταλαντώσεων είναι μικρότερη από τη θεμελιώδη ιδιοσυχνότητα της εδαφικής στρώσης (που εξαρτάται από το πάχος της, τη σιφρότητα του εδάφους και το είδος των κυμάτων), δεν είναι δυνατή η διάδοση κραδασμών στο περιβάλλον» (Αθανασόπουλος και Ιωάννου, 2006:3).

- *Προστατευτικά ορύγματα*

Τα προστατευτικά ορύγματα αναφέρονται στα κενά και γεμάτα τα οποία αποτελούν τις πιο κοινή σε πρακτικές εφαρμογές (Rahman και Orr, 2006). Έχουν χρησιμοποιηθεί ως

συστήματα απομόνωσης κραδασμών από τη δεκαετία του 1960 (Richart et al., 1970 στο Αθανασόπουλος και Ιωάννου, 2006). Το ανοιχτό όρυγμα αντανakλά ένα μέρος των επιφανειακών κυμάτων Rayleigh και παράλληλα ενισχύει τα άλλα κύματα να ταξιδέψουν κατακόρυφα προς τα κάτω στο εσωτερικό του εδάφους, όπου το κενό οδηγεί τα κύματα σε ένα μεγαλύτερο μονοπάτι με αποτέλεσμα την εξασθένηση των κυμάτων πριν από τη δομή (Adam και Estorff, 2003).

Η μέθοδος των κενών ορυγμάτων είναι η πλέον αποτελεσματικότερη και με το κόστος της εγκατάστασής της να είναι ιδιαίτερα χαμηλό συγκριτικά με τις λοιπές μεθόδους (Rahman και Orr, 2006). Ωστόσο, στη περίπτωση που η πηγή εκπέμπει μεγάλου μήκους κύματα, τα κενά ορύγματα πρέπει να έχουν μεγάλο βάθος ώστε να είναι αποτελεσματικά, για να επιτευχθεί και να διατηρηθεί αυτό το βάθος στη πράξη πρέπει να χρησιμοποιηθούν πασσαλοσανίδες ή διαφράγματα τοιχωμάτων και στις δύο πλευρές των κενών ορυγμάτων (Καπτής, 1997, Orehon et al, 2012).

Έτσι λοιπόν αναγεννάτε η ανάγκη για την κατασκευή γεμάτων ορυγμάτων με σκυρόδεμα, μπετονίτη, κ.λπ. Τα γεμάτα ορύγματα έχουν την δυνατότητα να μεταβαίνουν την επίδραση (μετάδοση) των κυμάτων στο υλικό του ορύγματος και μετά τη ζώνη διαλογής, με αποτέλεσμα να έχει απολύτως διαφορετικά ποσά αντανάκλασης κυμάτων (Jain και Soni, 2007). Για τον λόγο αυτό τα κενά ορύγματα είναι αποτελεσματικότερα από τα ορύγματα τα οποία είναι γεμάτα με κάποιο υλικό (Al-Hussaini and Ahmad, 1996a, 1996b, Beskos et al., 1986, 1990, Beskow et al., 1990) στο (Αθανασόπουλος και Ιωάννου, 2006) .

Ωστόσο, βέβαια αν το υλικό του γεμάτου ορύγματος αποτελείται «από πάνελ γεμάτες με αέριο (μαξιλάρια αερίου), τα οποία σχηματίζουν σταθερά κάθετη υπόγεια οθόνη “vibrisol”» (Jain και Soni, 2007:167) έχει μια επίδραση απομόνωσης κραδασμών σχεδόν ίδια με ενός ανοικτού ορύγματος (Jain και Soni, 2007).

- *Προστατευτικές Πασσαλοστοιχίες*

Όταν το βάθος των ανοικτών ορυγμάτων είναι μεγάλο, δυσχεραίνεται όπως προαναφέρθηκε η εγκατάστασή τους, οπότε καθίσταται πρακτικότερη η εγκατάσταση προστατευτικών πασσάλων. Βάσει αποτελεσμάτων έχει αποδειχτεί ότι «στην περίπτωση χρήσης σωληνωτών πασσάλων θα πρέπει η διάμετρος τους να είναι  $D/L_R > 0.17$  και επιπλέον να τοποθετούνται σε καθαρή απόσταση ο ένας από τον άλλο,  $S_n/L_R < 0.25$ » (Αθανασόπουλος και Ιωάννου, 2006:2), όπου  $L_R$  = μήκος κύματος Rayleigh, ώστε να επιτυγχάνεται αποτελεσματική απομόνωση κραδασμών (Woods et al., 1974, Kattis et al., 1999 στο Αθανασόπουλος και Ιωάννου, 2006).

## Κεφάλαιο 2 : Διάδοση κυμάτων σε ελαστικό χώρο

### 2.1. Δημιουργία και διάδοση επιφανειακών κυμάτων σε ελαστικό χώρο

#### 2.1.1. Είδη κυμάτων

Σε γενικότερο πλαίσιο, τα κύματα υποδιαιρούνται σε δύο ομάδες, τα κύματα ανάκλασης, που ταξιδεύουν προς τα κάτω και προς την πηγή που εκπέμπει τα κύματα, και τα μεταδιδόμενα κύματα, τα οποία ταξιδεύουν μακριά από την πηγή (Κρητικάκης, 2010, Jain και Soni, 2007). Επιπροσθέτως, τα κύματα διαχωρίζονται σε:

- *Διαμήκη κύματα*

Τα διαμήκη (P) είναι γρήγορα κύματα, και διαδίδονται ακτινικά, προκαλώντας πυκνώματα και αραιώματα της ύλης κατά το μήκος της διεύθυνσης διάδοσης (Hamdan ,2004).

- *Διατμητικά κύματα*

Τα διατμητικά κύματα (S), διαδίδονται εγκάρσια στη διεύθυνση, κατά την οποία γίνετε η διάδοσή τους, δημιουργώντας διατμητική κίνηση στη δομή του υλικού.

Τα διατμητικά κύματα είναι πολωμένα, διότι έχουν δύο βαθμούς ελευθερίας, τα οποία κινούνται αντίστοιχα σε δύο διαφορετικά επίπεδα. Όταν η διεύθυνση, κατά την οποία τα κύματα διαδίδονται, και η κίνηση, που προκαλούν στα υλικά των σωματιδίων, βρίσκονται σε κατακόρυφο επίπεδο, τότε τα κύματα είναι κατακόρυφα πολωμένα (SV). Αντιθέτως, όταν η κίνηση των σωματιδίων έχει διεύθυνση κάθετη στο κατακόρυφο επίπεδο, τότε αποτελεί οριζόντιο πολωμένο κύμα (SH). Όταν παρουσιάζετε ένα από τα δύο, είτε SH είτε SV, τότε τα κύματα είναι επίπεδα πολωμένα (Hamdan , 2004, Wu, 1997).

- *Επιφανειακά κύματα*

Τα κύματα Stoneley, Scholte, Love, σωληνοκύματα (tube waves), Lamb και Rayleigh συνδέονται με την χωροχρονική ταλάντωση των σωματιδίων του εδάφους και είναι επιφανειακά κύματα, καθώς βρίσκονται “κοντά” σε κάποια επιφάνεια. Ως εκ τούτου, λοιπόν, τα κύματα Stoneley, «διαδίδονται στην διαχωριστική επιφάνεια δύο εδαφικών ημιχώρων», (Sheriff & Geldart, 1995 στο Κρητικάκης, 2010:25). Τα κύματα Scholte μεταδίδονται παράλληλα τόσο στην επιφάνεια του στερεού όσο και στην διεπιφάνεια του υγρού ημιχώρου (Bohlen et al., 2004 στο Κρητικάκης, 2010). Τα κύματα Love, «αποτελούνται από SH κύματα, που διαδίδονται παράλληλα σε ελεύθερη επιφάνεια (κενό ή αέρας) και δημιουργούνται υπό την προϋπόθεση ότι ένα στρώμα πεπερασμένου πάχους υπέρκειται ενός ημιχώρου» (Sheriff and Geldart, 1995 στο Κρητικάκης, 2010:25). Τα σωληνοκύματα (tube waves), διαδίδονται παράλληλα με την διεύθυνση του άξονα γεώτρησης (Sheriff and Geldart, 1995 στο Κρητικάκης, 2010). Τα κύματα Lamb δημιουργούνται όταν ένα ομοιογενές μέσο περικλείεται ανάμεσα σε δύο ελεύθερες επιφάνειες. Τέλος, τα κύματα Rayleigh διαδίδονται παράλληλα στην ελεύθερη επιφάνεια του ημιχώρου (ομοιογενούς ή όχι), για την δημιουργία τους βασική προϋπόθεση αποτελεί η ύπαρξη ελεύθερης επιφάνειας (Κρητικάκης, 2010).



- *Κύματα Rayleigh*

Τα κύματα Rayleigh δημιουργούνται από την ύπαρξη αποσβενόμενων διαμήκων (P) και εγκάρσιων (SV) κυμάτων και διαδίδονται παράλληλα με την ελεύθερη επιφάνεια (Lay and Wallace, 1995 στο Κρητικάκης, 2010) .

Όταν μια ακτίνα κύματος SV προσπέσει υπό γωνία σε μια ελεύθερη επιφάνεια, ένα μέρος της ενέργειας θα ανακλαστεί ως κύμα SV, και το άλλο μέρος θα μετατραπεί σε διάμηκες (P) κύμα (Aki and Richards, 1980 στο Κρητικάκης, 2010) .

Εξαρτώμενα από την ταχύτητα, που διαδίδονται τα διαμήκη και τα εγκάρσια κύματα στον ημίχωρο, υφίσταται μια κρίσιμη γωνία πρόσπτωσης των εγκάρσιων (SV) κυμάτων στην ελεύθερη επιφάνεια, η οποία είναι  $90^\circ$ , όπου το ανακλώμενο διαμήκη (P) κύμα διαδίδεται παράλληλα με την επιφάνεια αυτή (Κρητικάκης, 2010, Καττής, 1997).

Τα διαμήκη και τα εγκάρσια κύματα (P) και (SV) εξασθενούν εκθετικά με το βάθος (Κρητικάκης, 2010). Τα εξασθενημένα διαμήκη (P) και εγκάρσια (SV) κύματα που δημιουργούνται έχουν ίδια συχνότητα, αλλά διαφορετική φάση (Βαφείδης, 1993 στο Κρητικάκης, 2010), έχοντας ως αποτέλεσμα η ταλάντωση του υλικού σημείου, που βρίσκεται πάνω στην ελεύθερη επιφάνεια να διαγράφει ελλειπτική τροχιά με φορά κίνησης αντίθετη της φοράς των δεικτών του ωρολογίου (Κρητικάκης, 2010, Hamdan, 2004, Καττής, 1997).

Όσο μεγαλώνει το βάθος η ελλειπτική κίνηση των σωματιδίων αλλάζει βαθμιαία, μέχρι να γίνει κατακόρυφη και μετέπειτα γίνεται ξανά ελλειπτική με ορθή, όμως, φορά. Το πλάτος ταλάντωσης εξασθενεί ταχύτατα όσο μεγαλώνει το βάθος. Οπότε, όταν το βάθος γίνεται περίπου 1.5 φορά του μήκος κύματος, η κατακόρυφη συνιστώσα του πλάτους ανέρχεται ίση με το 10 % του αρχικού πλάτους, που είχε στην ελεύθερη επιφάνεια (Κρητικάκης, 2010).

Τέλος, όταν έχουμε διάδοση κυμάτων Rayleigh σε ομοιογενή ημίχωρο, και οι συνοριακές συνθήκες, κατά την οποία διαδίδονται, δηλαδή όταν έχουμε μηδενισμό των τάσεων  $\sigma_{xz}$  και  $\sigma_{zz}$ , στην ελεύθερη επιφάνεια η ταχύτητα των κυμάτων Rayleigh ( $V_R$ ) είναι σταθερή σε όλες τις συχνότητες (Κρητικάκης, 2010).

### 2.1.2. Τι είναι ημίχωρος

Ημίχωρος ονομάζεται, όταν το έδαφος θεωρείται ότι επεκτείνεται άπειρα σε όλες τις κατευθύνσεις, συμπεριλαμβανομένου και του βάθους, με την άνω επιφάνεια ως όριο. Στη θεώρηση αυτή, ένα άκαμπτο σώμα γνωστής μάζας στηρίζεται πάνω στην επιφάνεια ενός ιδανικού εδάφους δηλαδή, ελαστικού, ομοιογενούς και ισότροπου υλικού. Για να αναπτυχθεί αυτή η θεωρία χρησιμοποιούνται τρεις βασικές παράμετροι, το μέτρο διάτμησης (G) , η πυκνότητα μάζας ( $\rho$ ) , και η αναλογία του Poisson ( $\nu$ ).

Στη θεωρία ελαστικού ημίχωρου με μια μόνο δοκιμή πεδίου δόνησης, μπορεί να προβλεφτεί η συχνότητα συντονισμού και το μέγιστο πλάτος της κίνησης του συστήματος. Τα πλάτη που διεξάγονται είναι πεπερασμένα ως αποτέλεσμα η επίδραση να εξετάζεται έμμεσα, στην πραγματικότητα η φύση της απόσβεσης μπορεί σε αυτήν την περίπτωση να είναι σκέδαση (Venkatramaiah, 2006).

## **2.2. Σκέδαση των επιφανειακών κυμάτων**

### **2.2.1. Τι είναι σκέδαση ή διασπορά**

Το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό των επιφανειακών κυμάτων Rayleigh, είναι το φαινόμενο της σκέδασης ή ,όπως συναντάτε σε άλλες βιβλιογραφίες, της διασποράς. Ωστόσο, σκέδαση – διασπορά υπάρχει και στα κύματα χώρου, όπου σε αυτά θεωρητικά είναι συνέπεια της απόσβεσης δηλαδή της μετατροπής της κινητικής ενέργειας σε άλλου είδους ενέργεια, όπως θερμική, και ο βαθμός της σκέδασης θεωρείται ασήμαντος. Ενώ, στη σκέδαση – διασπορά των κυμάτων Rayleigh, η ταχύτητα διάδοσής τους μεταβάλλεται σε συνάρτηση με τη συχνότητα (Sheriff and Geldart, 1995 στο Κρητικάκης, 2010, Hamdan , 2004).

Τέλος, υπάρχουν δύο κατηγορίες σκέδασης – διασποράς των επιφανειακών κυμάτων Rayleigh. Μία είναι η υλική σκέδαση – διασπορά, η οποία δημιουργείται από την εξασθένηση των κυμάτων ανάλογα με τη σύσταση του γεωυλικού και θεωρείται αμελητέα και η δεύτερη είναι η γεωμετρική σκέδαση, που δημιουργείται από τις γεωμετρικές μεταβολές των ιδιοτήτων των γεωλογικών σχηματισμών (Ραπτάκης, 1995 στο Κρητικάκης, 2010, Hamdan , 2004).

### **2.2.2. Ταχύτητες επιφανειακών κυμάτων Rayleigh**

Στη περίπτωση, όπου το μέσο είναι κατακόρυφα ανομοιογενές, η ιδιότητα που έχουν τα επιφανειακά κύματα Rayleigh με συγκεκριμένο μήκος κύματος, να διεισδύουν μέχρι το βάθος να είναι ίσο με 1.5 φορά του μήκους κύματός του, έχει ως αποτέλεσμα την διάδοση επιφανειακών κυμάτων διαφορετικού μήκους κύματος με διαφορετική ταχύτητα (Socco & Strobbia, 2004 στο Κρητικάκης, 2010). Για αυτόν τον λόγο δημιουργείται η σκέδαση – διασπορά, η οποία οφείλεται στις γεωμετρικές μεταβολές των ιδιοτήτων των γεωλογικών σχηματισμών.

Η ταχύτητα με την οποία τα κύματα Rayleigh διαδίδονται χωρίζονται σε ταχύτητα φάσης και ταχύτητα ομάδας.

Εκ των προαναφερθέντων, η ταχύτητα φάσης έχει να κάνει με την ταχύτητα, κατά την οποία γίνεται η διάδοση κάθε συγκεκριμένης αρμονικής συχνότητας των κυμάτων και ορίζεται ως η γωνιακή συχνότητα προς τον κυματαριθμό.

Ενώ η ταχύτητα ομάδας ισοδυναμεί με την ταχύτητα διάδοσης της ενέργειας του κύματος και μπορεί να υπολογιστεί “από το λόγο της απόστασης, που διανύθηκε από το κύμα, προς το χρόνο διαδρομής του μέγιστου πλάτους της περιβάλλουσας ενός αριθμού αρμονικών (κυματοσυρμού). Ως ταχύτητα ομάδας ορίζεται ο ρυθμός μεταβολής της γωνιακής συχνότητας συναρτήσει του κυματάριθμου” (Lay & Wallace, 1995, Sheriff & Geldart, 1995, Misiek, 1996 στο Κρητικάκης, 2010: 32).

## Κεφάλαιο 3: Η Μέθοδος των Συνοριακών Στοιχείων

### 3.1. Ιστορική εξέλιξη της Μεθόδου των Συνοριακών Στοιχείων (ΜΣΣ)

Η Μέθοδος των συνοριακών στοιχείων (ΜΣΣ), μέχρι τις αρχές της δεκαετίας του '80, λεγόταν Μέθοδος Συνοριακών Ολοκληρωτικών Εξισώσεων. Η εν λόγω μέθοδος αποσκοπούσε στην επίλυση των προβλημάτων της μαθηματικής φυσικής και βασίστηκε στο έργο του G. Green (Κατσικαδέλης, 2012, Παναγιωτόπουλος, 2009), ο οποίος το 1828 εισήγαγε για τα προβλήματα αυτά την έννοια της συναρτήσεως Green στην ολοκληρωτική παράσταση της λύσεως των προβλημάτων Dirichlet και Neumann, που διέπονται από την εξίσωση Laplace.

Το 1872 ο Betti διατύπωσε «τη γενική μέθοδο ολοκληρώσεως των εξισώσεων ελαστικότητας, όπου η λύση λαμβάνεται υπό μορφή ολοκληρωτικής παραστάσεως» (Κατσικαδέλης, 2012:6). Κατόπιν δεκατριών ετών ο Somigliana με βάση το θεώρημα του Betti, διατύπωσε ολοκληρωτική παράσταση της λύσεως του προβλήματος ελαστικότητας, όπου εμφανίζονται οι μαζικές δυνάμεις και οι συνοριακές μετατοπίσεις και τάσεις. Έπειτα ο Fredholm κατά τις αρχές του 20<sup>ου</sup> αιώνα, χρησιμοποίησε ιδιόμορφες συνοριακές ολοκληρωτικές εξισώσεις, προκειμένου να προσδιορίσει τα άγνωστα συνοριακά μεγέθη σε προβλήματα της θεωρίας του δυναμικού.

Η μέθοδος, αρχικά δεν χρησιμοποιήθηκε ώστε να λύσει το πρόβλημα, αλλά ως μαθηματικό εργαλείο ευρέσεως των απαραίτητων συνοριακών συνθηκών σε ένα καλά διατυπωμένο πρόβλημα της μαθηματικής φυσικής (Κατσικαδέλης, 2012, Παναγιωτόπουλος, 2009)

Οι Sherman, Mikhlin και Muskhelishvili για την επίλυση προβλημάτων επίπεδης ελαστικότητας, έχουν διατυπώσει μεθόδους συνοριακών ολοκληρωτικών εξισώσεων χρησιμοποιώντας μιγαδικές συναρτήσεις, επίσης στις περιπτώσεις χωρίων με απλή γεωμετρία συνόρου έχουν επιτευχθεί κλειστές λύσεις των ολοκληρωτικών εξισώσεων. Με αποτέλεσμα η μέθοδος των συνοριακών ολοκληρωτικών εξισώσεων μέχρι το τέλος της δεκαετίας του '50 να έχει ξεχαστεί.

Ως αποτελεσματική αριθμητική μέθοδος επίλυσε προβλημάτων του μηχανικού, εμφανίστηκε την ίδια περίοδο που εμφανίστηκε και ο υπολογιστής, δηλαδή στις αρχές της δεκαετίας του '60, όπου οι Jaswon και Symm χρησιμοποίησαν τις εξισώσεις του Fredholm και έλυσαν ορισμένα προβλήματα δύο διαστάσεων ροής δυναμικού. Επίσης, ο Rizzo εφάρμοσε τη μέθοδο σε προβλήματα ελαστικότητας δύο διαστάσεων και από τη άλλη ο Cruse σε προβλήματα ελαστικότητας τριών διαστάσεων. Η μέθοδος επεκτάθηκε στην ανισότροπη ελαστικότητα από τους Rizzo και Shippy και η λύση του ελαστοδυναμικού προβλήματος δόθηκε από τους Cruse και Rizzo. Η διατύπωση των ολοκληρωτικών εξισώσεων στη θερμοελαστικότητα δόθηκε από τους Ignaczak και Nowacki, ενώ ο Mendelson ασχολήθηκε με την επίλυση προβλημάτων ελαστοπλαστικής στρέψεως (Κατσικαδέλης, 2012, Παναγιωτόπουλος, 2009).

Στα τέλη του 1980, η μέθοδος των συνοριακών στοιχείων εφαρμόζεται για την επίλυση ευρείας κατηγορίας προβλημάτων μηχανικής, όπως είναι τα ελαστικά και ανελαστικά προβλήματα, τα προβλήματα ελαστοδυναμικής και αντισεισμικής μηχανικής, γεωμηχανικής και θεμελιώσεων, αλληλεπιδράσεως εδάφους κατασκευής, αλληλεπιδράσεως ρευστών και κατασκευής, δυναμικής των ρευστών, μονόπλευρης επαφής, θραυστομηχανικής (Κατσικαδέλης, 2012, Rahman & Orr, 2006, Adam & Estorff, 2004).

Τέλος, στις ημέρες μας, η μέθοδος των συνοριακών στοιχείων θεωρείται μία ώριμη μέθοδος αναλύσεων και επίλυσεων προβλημάτων του μηχανικού. Επιπροσθέτως, εφόσον οι αναλύσεις γίνονται ως επί των πλείστων με ηλεκτρονικούς υπολογιστές, υπάρχει ανάπτυξη λογισμικού απλής και παράλληλης αρχιτεκτονικής και ανάπτυξη σε προγράμματα μεγάλων δυνατοτήτων (Κατσικαδέλης, 2012).

### 3.1.1. Πλεονεκτήματα της ΜΣΣ

Το πρώτο πλεονέκτημα της ΜΣΣ οφείλεται στο ότι καθιστά την αριθμητική προσομοίωση εύκολη, ενώ παράλληλα μειώνει το πλήθος των αγνώστων κατά μία τάξη. Αυτό συμβαίνει, διότι η διακριτοποίηση περιορίζεται στο σύνορο του χωρικού μέσου και όχι σε ολόκληρο το χώρο (Κατσικαδέλης, 2012, Παναγιωτόπουλος, 2009).

Το δεύτερο πλεονέκτημα είναι ότι για χωρία, τα οποία επεκτείνονται στο άπειρο, το πρόβλημα διατυπώνεται εύκολα ως εξωτερικό, όπου σαφώς η θεμελιώδης λύση πρέπει να ικανοποιεί ορισμένες συνθήκες στο άπειρο. Με αυτό τον τρόπο, τα προγράμματα υπολογιστή με μικρή προσαρμογή, που είναι φτιαγμένα για πεπερασμένα στοιχεία, λύνουν προβλήματα σε χωρία, τα οποία επεκτείνονται άπειρα.

Ένα άλλο πλεονέκτημα, είναι η αποτελεσματική και η αυξημένη ακρίβεια στον υπολογισμό των παραγώγων της συναρτήσεως πεδίου, όπως τον υπολογισμό τάσεων και ροπών, όπου οι συγκεντρωμένες δυνάμεις και οι ροπές υπολογίζονται εύκολα και στο εσωτερικό, αλλά παράλληλα και στο σύνορο του χωρίου (Κατσικαδέλης, 2012, Παναγιωτόπουλος, 2009).

Επίσης, πλεονέκτημα της μεθόδου αποτελεί και η επίλυση προβλημάτων σε χωρία με γεωμετρικές ανωμαλίες, όπως είναι οι ρωγμές (Κατσικαδέλης, 2012).

### 3.1.2. Μειονεκτήματα της ΜΣΣ

Ένα κύριο μειονέκτημα της ΜΣΣ είναι ότι η θεμελιώδης λύση θα πρέπει να είναι γνωστή, οπότε η μέθοδος της ΜΣΣ δεν μπορεί να εφαρμοστεί όταν το πρόβλημα έχει άγνωστη ή απροσδιόριστη θεμελιώδη λύση χωρίου (Κατσικαδέλης, 2012, Παναγιωτόπουλος, 2009).

Ένα άλλο μειονέκτημα της μεθόδου αποτελεί η δυσκολία εύρεσης θεμελιώδους λύσεως για μεγάλη ομάδα προβλημάτων. Το παρόν δύναται να μπορεί να ξεπεραστεί εφαρμόζοντας προσεγγιστικές μεθόδους τις θεμελιώδους λύσεως, με αυτό τον τρόπο, όμως, προκύπτουν πολλές φορές ανεπαρκή αριθμητικά σχήματα (Παναγιωτόπουλος, 2009).

Ακόμη η μέθοδος της ΜΣΣ παρουσιάζει μειονέκτημα όταν τα προβλήματα χρειάζονται πεδιακή ολοκλήρωση, σε αυτή την περίπτωση η διακριτοποίηση του συνόρου αναιρείται (Κατσικαδέλης, 2012, Παναγιωτόπουλος, 2009).

Επιπλέον, μειονέκτημα της ΜΣΣ είναι η ανεπάρκεια, που εκδηλώνει σε περιπτώσεις δυναμικής ανάλυσης στο χρόνο, το γεγονός αυτό οφείλεται στη δημιουργία αλγόριθμων με έντονα φαινόμενα αστάθειας.

Επίσης ένα άλλο μειονέκτημα της ΜΣΣ είναι τα συστήματα αλγεβρικών εξισώσεων, που έχουν πλήρη και συμμετρικά μητρώα των αγνώστων. Ωστόσο τα μητρώα της ΜΣΣ έχουν μικρές διαστάσεις ώστε να ξεπεραστεί αυτό το μειονέκτημα (Κατσικαδέλης, 2012, Παναγιωτόπουλος, 2009).

Τέλος, μειονέκτημα της ΜΣΣ αποτελεί και η ανεπαρκής ανάπτυξη υπολογιστικών προγραμμάτων για ηλεκτρονικούς υπολογιστές. Αυτό οφείλετε στο ότι η μέθοδος αυτή δεν ήταν ευρέως διαδεδομένη (Παναγιωτόπουλος, 2009).

Τα μειονεκτήματα της ΜΣΣ ολοένα επιλύονται και προσπερνιούνται με τις συνεχείς εξελίξεις της μεθόδου. Οι μέθοδοι, που αντιμετωπίζουν τα προβλήματα της ΜΣΣ και την καθιστούν αμιγώς συνοριακή είναι η Μέθοδος της Δυαδικής Αμοιβαιότητας / Dual Reciprocity Method (DRM) και η Μέθοδος της Αναλογικής Εξισώσεως / Analog Equation Method (AEM). Η πρώτη μέθοδος έχει ορισμένους περιορισμούς, ενώ η δεύτερη είναι γενική και απαλλαγμένη από περιορισμούς της πρώτης.

### 3.1.3. ΜΣΣ και ορύγματα

Η μέθοδος των συνοριακών στοιχείων «αποτελεί τεχνική ανάλυσης της συμπεριφοράς των μηχανικών συστημάτων, και ειδικότερα των κατασκευών του μηχανικού, που υποβάλλονται σε εξωτερική φόρτιση» (Κατσιαδέλης, 2012).

Η ΜΣΣ είναι κατάλληλη για τη μελέτη και επίλυση προβλημάτων διάδοσης κυμάτων σε εδάφη, που περιλαμβάνουν ένα ημι-άπειρο τομέα. Πολλοί μελετητές έχουν διεξάγει αριθμητικές αναλύσεις δύο και τριών διαστάσεων χρησιμοποιώντας την ΜΣΣ, ώστε να γίνει διαλογή των δονήσεων μέσω κενών και γεμάτων ορυγμάτων (Rahman & Orr, 2006, Adam & Estorff, 2004, Celebia & Schmidb, 2005).

Στις ημέρες μας, η μελέτη της συμπεριφοράς των κατασκευών διεξάγεται μέσω των ηλεκτρονικών υπολογιστών, διότι το κόστος της αριθμητικής είναι μικρότερο σε σχέση με την πειραματική προσομοίωση, η οποία είναι δαπανηρή (Κατσιαδέλης, 2012).

## 3.2. Περιγραφή του προγράμματος Integrated Software on the Boundary Element Method (ISOBEM)

Το πρόγραμμα Integrated Software on the Boundary Element Method (ISOBEM) δραστηριοποιείται ερευνητικά, ως προς την μηχανική, στα προβλήματα άμεσης και αντίστροφης σκέδασης κυμάτων και ακτινοβολίας, στην ακουστική, στον ηλεκτρομαγνητισμό, στην ελαστικότητα και στην θερμοελαστικότητα. Επίσης, υλοποιείται σε περιπτώσεις διάδοσης κυμάτων σε κυματοδηγούς, μη ομοιογενή υλικά και βιοϋλικά, σε μη καταστροφικές δοκιμές με φαινόμενα διάδοσης κυμάτων, όπως είναι η Ακουστική Εκπομπή, οι Υπέρηχοι κ.ά. Ακόμη, εφαρμόζεται σε μηχανική θραύση, τεχνικές ομογενοποίησης, μηχανικές δονήσεις και την απομόνωση των κραδασμών και σε υλικά και βιοϋλικά με μικροδομή (Polyzos, χ. χ.).

Ως προς την υπολογιστική μηχανική το πρόγραμμα ISOBEM χρησιμοποιεί την αριθμητική ανάλυση με την μέθοδο των συνοριακών στοιχείων (ΜΣΣ), την μέθοδο meshless και αριθμητικές μεθόδους μέσω υβριδικού meshless / ΜΣΣ (Polyzos, χ. χ.).

Το λογισμικό του ISOBEM είναι ένα φιλικό προς τον χρήστη γραφικό περιβάλλον, που του επιτρέπει την κατασκευή και επίλυση πολύπλοκων προβλημάτων, ενώ παράλληλα προσφέρει τη δυνατότητα καλύψει ενός ευρύ φάσματος προβλημάτων από πολλά επιστημονικά πεδία. Ποιο συγκεκριμένα έχει την δυνατότητα να επιλύσει προβλήματα ακουστικής, ελαστικότητας, ελαστικότητας ανωτέρων βαθμίδων, ηλεκτρομαγνητισμού, ρευστομηχανικής και αλληλεπίδρασης ρευστού-κατασκευής. Τα προβλήματα αυτά, επιλύονται τόσο σε δύο διαστάσεις όσο και σε τρεις διαστάσεις, καθώς και ως στατικά, περιοδικά ή πλήρως δυναμικά προβλήματα (Boundary Element Method Software & services).

Τέλος, το ISOBEM υποστηρίζει τη δημιουργία παραμετρικών μοντέλων, μέσω ενός ενσωματωμένου κελύφους γλώσσας προγραμματισμού Python και μια συλλογή από προσαρμοσμένες εντολές Python (Boundary Element Method Software & services).

## Κεφάλαιο 4: Πειραματική διαδικασία και αποτελέσματα

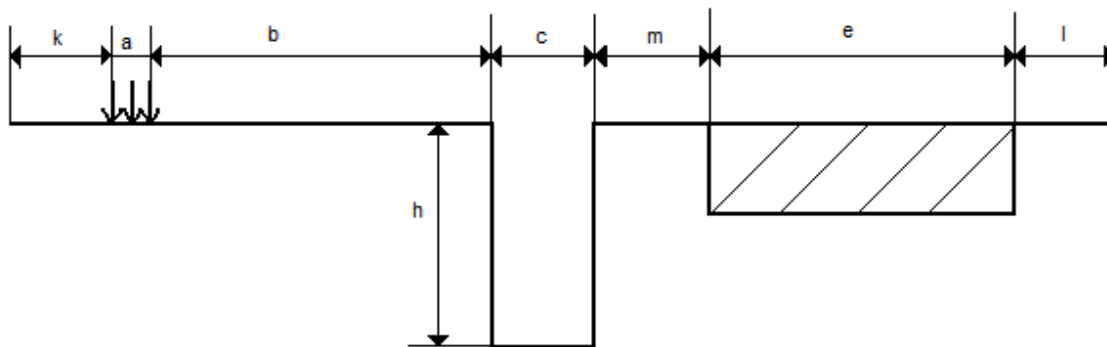
### 4.1. Τοποθέτηση του προβλήματος

Το πρόβλημα, που εξετάζεται αποτελείται από μια πηγή εδαφικών ταλαντώσεων, που μπορεί να είναι οποιοσδήποτε μηχανισμός, κατά τον οποίο ασκείται μια κατακόρυφη αρμονική δύναμη  $F = 10 \text{ KN}$ , από ένα όρυγμα και τα θεμέλια μιας κατασκευής. Το έδαφος θεωρείται γραμμικά βισκοελαστικό και οι ιδιότητές του αντιστοιχούν στο μέσης πυκνότητας αμμώδες έδαφος. Τα χαρακτηριστικά του εδάφους αυτού είναι το μέτρο ελαστικότητας  $E = 330 \cdot 10^6 \text{ (N/m}^2\text{)}$ , ο λόγος Poisson  $\nu_\varepsilon = 0,25$ , η πυκνότητα μάζας  $\rho_\varepsilon = 17,5 \cdot 10^2 \text{ (Kg/m}^3\text{)}$  και ο συντελεστής απόσβεσης  $\beta_\varepsilon = 6\%$ .

Το πρόβλημα εξετάζεται υπό τέσσερις διαφορετικές συχνότητες αρμονικής δύναμης, οι οποίες είναι 25hz, 50hz, 75hz και 100hz. Υπό δύο διαφορετικά πλάτη ορύγματος ( $c$ ), όπου  $c_1 = 0,5\text{m}$ ,  $c_2 = 0,75\text{m}$  και υπό τέσσερα διαφορετικά βάθη ορύγματος ( $h$ ), όπου  $h_1 = 2,5\text{m}$ ,  $h_2 = 5\text{m}$ ,  $h_3 = 7,5\text{m}$  και  $h_4 = 10\text{m}$ .

Επίσης, το συγκεκριμένο πρόβλημα εξετάζεται μια φορά για κενό όρυγμα και μία φορά για γεμάτο όρυγμα, όπου το υλικό επικάλυψής του είναι το σκυρόδεμα.

Στο σχήμα 4.2.1 φαίνεται η απόσταση της πηγής των εδαφικών ταλαντώσεων από τα θεμέλια της προστατευόμενης κατασκευής, καθώς και άλλες σημαντικές αποστάσεις, που χρειάζονται για την επίλυση του προβλήματος. Όπου  $k = 10\text{m}$ ,  $a = 1\text{m}$ ,  $b = 10\text{m}$ ,  $m = 2\text{m}$ ,  $e = 10\text{m}$  και  $l = 10\text{m}$ .



**Σχήμα 4.2.1** Σχέδιο του προβλήματος με κενό όρυγμα

## 4.2. Προσομοίωση μέσω προγράμματος ISOBEM

Το πρόγραμμα ISOBEM, όπως και κάθε πρόγραμμα, για να έχει την δυνατότητα επίλυσης ενός προβλήματος, θα πρέπει να του δοθούν κάποια δεδομένα και κάποιες εντολές. Για την εισχώρηση των δεδομένων, χρησιμοποιήθηκαν εντολές της γλώσσας προγραμματισμού Python.

Προκειμένου να επιλυθεί το πρόβλημα ακολουθούνται κάποια βήματα, είτε η επίλυση γίνεται με πειραματική προσομοίωση είτε μέσω ενός προγράμματος. Η προσομοίωση του παραπάνω προβλήματος έγινε σε δύο διαστάσεις και το πρώτο βήμα, που ακολουθήθηκε είναι ο ορισμός της γεωμετρίας δίνοντας στο πρόγραμμα ορισμένες τιμές, οι οποίες είναι οι αποστάσεις, η συχνότητα, το μέγεθος της δύναμης, οι ιδιότητες του εδάφους και το μήκος των στοιχείων, που θα προκύψει με την διακριτοποίηση. Το δεύτερο βήμα, είναι δημιουργία των σημείων με συντεταγμένες, όπου τα σημεία αυτά αποτελούν τα όρια των γραμμών. Το τρίτο βήμα, είναι η δημιουργία των γραμμών, ενώνοντας τα σημεία. Το τέταρτο βήμα, είναι η δημιουργία των επιφανειών ενώνοντας τις γραμμές. Το πέμπτο βήμα, είναι να θέσουμε το μοντέλο στις δύο διαστάσεις. Το έκτο βήμα, είναι να θέσουμε το υλικό, στο συγκεκριμένο πρόβλημα, ως γραμμικά ελαστικό. Το έβδομο βήμα, είναι η δημιουργία της περιοχής, δηλαδή ποια περιοχή θα έχει το συγκεκριμένο υλικό. Το όγδοο βήμα, είναι η σύνδεση των γραμμών με την περιοχή. Το ένατο βήμα, είναι η σύνδεση των επιφανειών με την περιοχή. Το δέκατο βήμα είναι η διακριτοποίηση των γραμμών. Τα ενδέκατο βήμα, είναι να θέσουμε το είδος της φόρτισης. Το δωδέκατο βήμα, είναι η σύνδεση της φόρτισης με τη περιοχή. Και το τελευταίο βήμα είναι να τρέξουμε το πρόγραμμα, (ολόκληρο το πρόγραμμα παρατίθεται στο παράρτημα).

Η διακριτοποίηση, δηλαδή το μήκος των στοιχείων των γραμμών δεν μπορεί να γίνει τυχαία. Αυτό συμβαίνει διότι το μήκος των στοιχείων ( $L$ ) εξαρτάται από το μήκος του κύματος ( $\lambda$ ), όπου στο συγκεκριμένο πρόβλημα το κύμα είναι επιφανειακό. Όπου το μήκος κύματος εξαρτάται από την ταχύτητα εγκάρσιων κυμάτων ( $c_s$ ) και από την συχνότητα ( $f$ ). Η ταχύτητα εγκάρσιων κυμάτων εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του υλικού, στο συγκεκριμένο πρόβλημα του εδάφους, δηλαδή από το μέτρο ελαστικότητας ( $E$ ), από το λόγο Poisson ( $\nu$ ) και από την πυκνότητα ( $\rho$ ). Οπότε ο υπολογισμός του μήκους των στοιχείων έχει ως εξής:

Υπολογισμός ταχύτητας εγκάρσιων κυμάτων ( $c_s$ )

$$c_s = \sqrt{\frac{E}{2 \cdot (1+\nu) \cdot \rho}} \Rightarrow c_s = \sqrt{\frac{3,3 \cdot 10^8}{2 \cdot (1+0,25) \cdot 1750}} \Rightarrow c_s = 274,6 \text{ m/sec} \quad (1.1)$$

Υπολογισμός του μήκους κύματος ( $\lambda$ )

$$c_s \cdot k_s = \omega \quad (1.2)$$

όπου το  $\omega$  είναι η γωνιακή συχνότητα και  $k_s$  είναι ο κυματικός αριθμός.

Η γωνιακή συχνότητα δίνεται από τον εξής τύπο:

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f \quad (1.3)$$

Ο κυματικός αριθμός δίνεται από τον εξής τύπο:

$$k_s = \frac{2 \cdot \pi}{\lambda} \quad (1.4)$$

Συνεπώς η εξίσωση (1.2) γίνεται:

$$c_s \cdot \frac{2 \cdot \pi}{\lambda} = 2 \cdot \pi \cdot f \Rightarrow \frac{c_s}{\lambda} = f \quad (1.5)$$

Λύνοντας τη εξίσωση (1.5) ως προς το  $\lambda$  βρίσκουμε το μήκος κύματος.

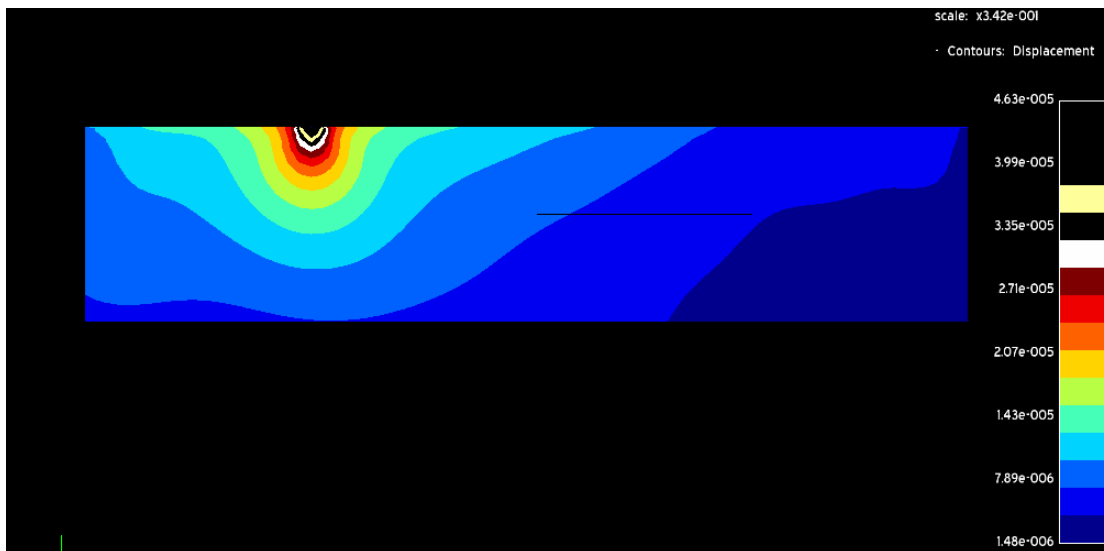
$$\frac{c_s}{\lambda} = f \Rightarrow \lambda = \frac{c_s}{f} \Rightarrow \lambda = \frac{274,6}{100} \Rightarrow \lambda = 2,75 \text{ m} \quad (1.6)$$

Υπολογισμός του μήκους στοιχείων (L)

$$L = \frac{\lambda}{n} \Rightarrow L = \frac{2,75}{4} \Rightarrow L = 0,7 \text{ m} \quad (1.7)$$

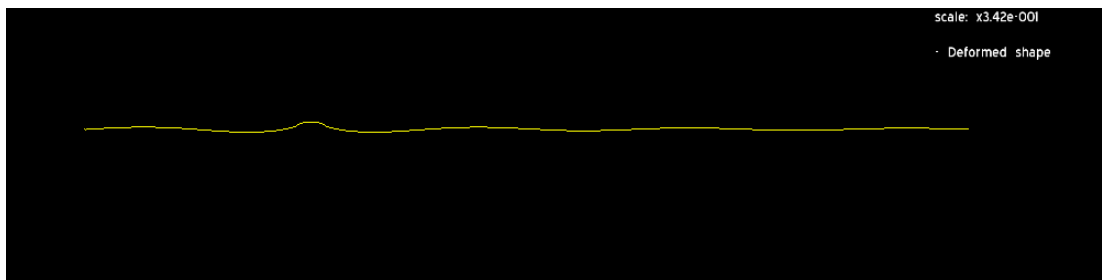
### 4.3. Επίλυση του προβλήματος με το πρόγραμμα ISOBEM για συχνότητα αρμονικής δύναμης 25Hz

#### 4.3.1. Αποτελέσματα για συχνότητα αρμονικής δύναμης $f = 25\text{Hz}$ με διαφορετικά βάθη ορύγματος και με πλάτος ορύγματος $c = 0,5\text{m}$ .

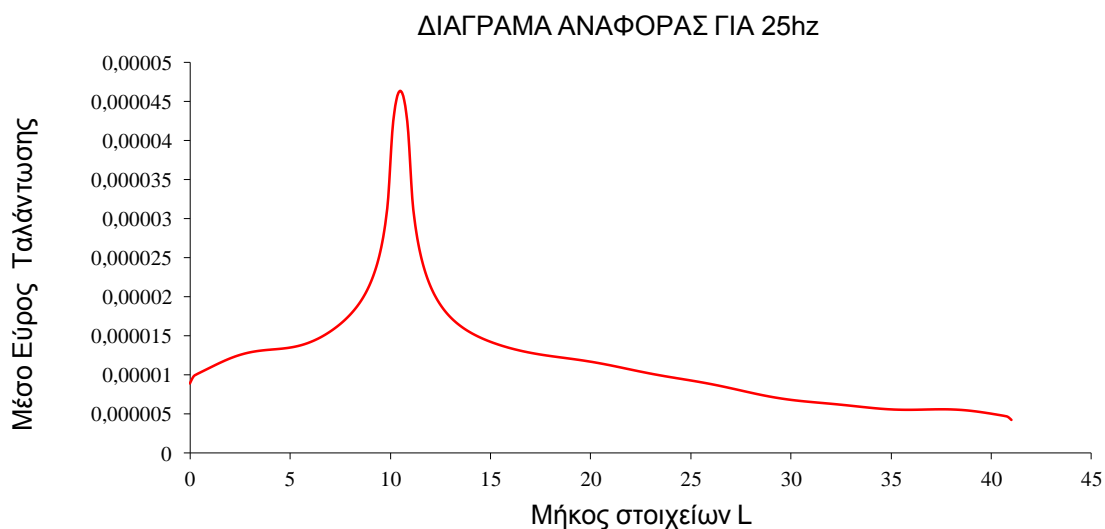


**Εικόνα 4.3.1:** Μέτρο μετατοπίσεων (m) για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 25\text{Hz}$  χωρίς όρυγμα. (Πρόβλημα αναφοράς)

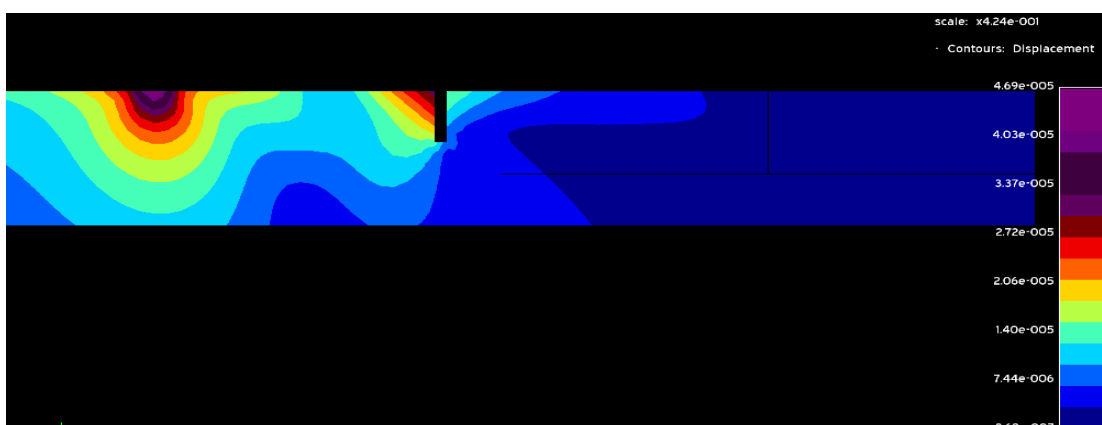




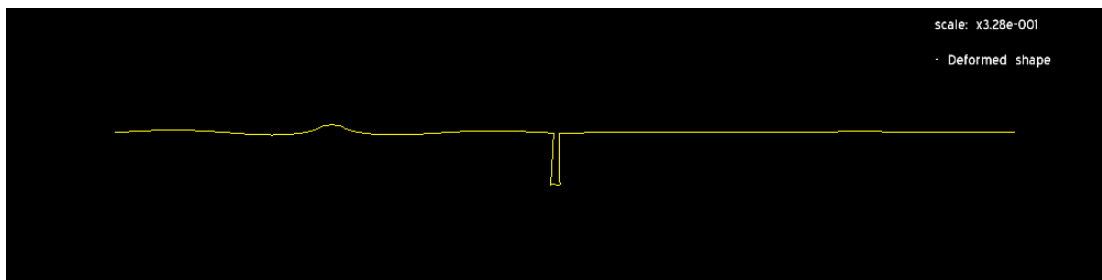
**Εικόνα 4.3.2:** Παραμόρφωση του εδάφους για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 25\text{Hz}$  χωρίς όρυγμα (Πρόβλημα αναφοράς)



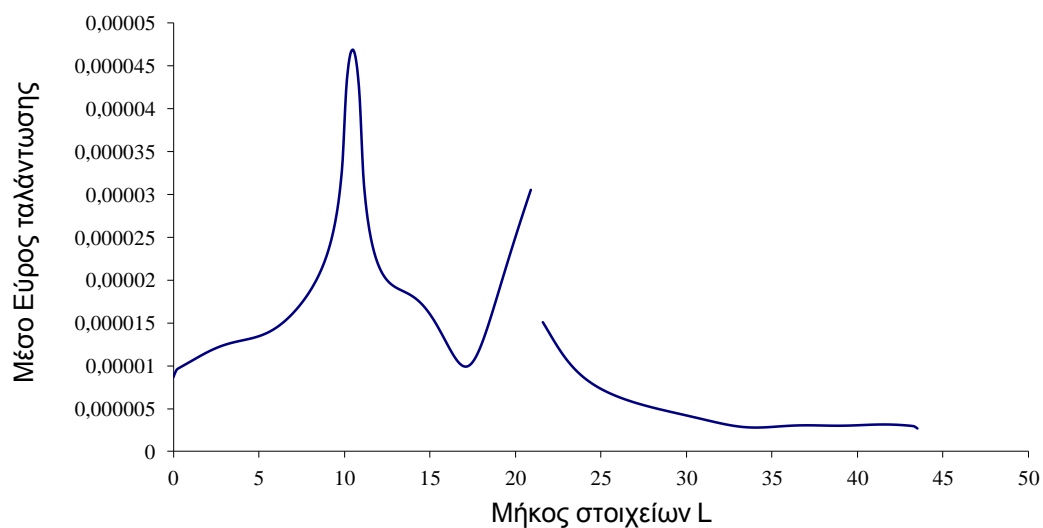
**Διάγραμμα 4.3.1:** Μέτρο μετατοπίσεων (m) για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 25\text{Hz}$  χωρίς όρυγμα (Πρόβλημα αναφοράς) για  $y = 0$  (ελεύθερη επιφάνεια).



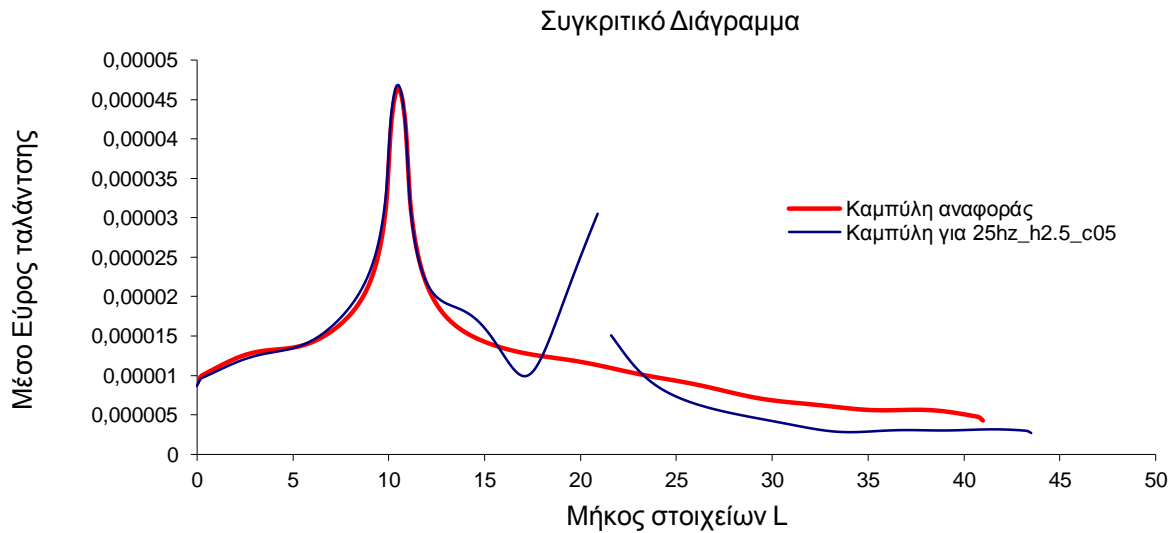
**Εικόνα 4.3.3:** Περίγραμμα μετατοπίσεων για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 25\text{Hz}$  με βάθος ορύγματος  $h = 2,5\text{m}$  και πλάτος ορύγματος  $c = 0,5\text{m}$



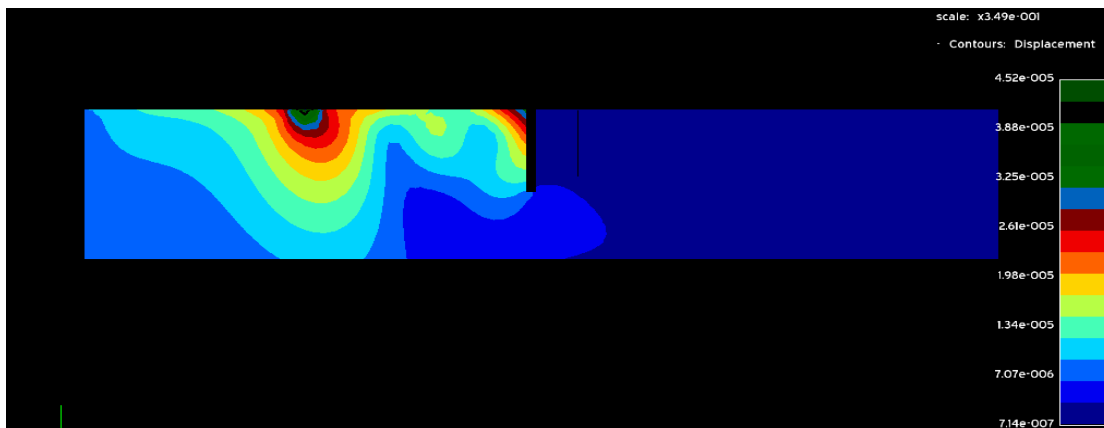
**Εικόνα 4.3.4:** Παραμόρφωση του εδάφους για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 25\text{Hz}$  με βάθος ορύγματος  $h = 2,5\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,5\text{m}$



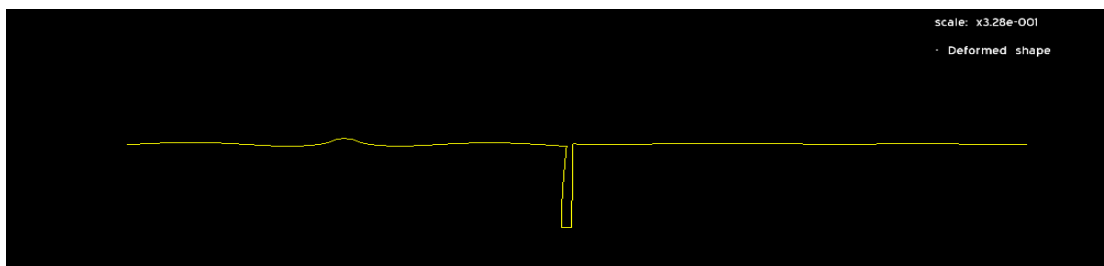
**Διάγραμμα 4.3.2:** Διάγραμμα μεταβολής του συντελεστή μείωσης εύρους σε όλο το μήκος του εδάφους για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 25\text{Hz}$  με βάθος ορύγματος  $h = 2,5\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,5\text{m}$ .



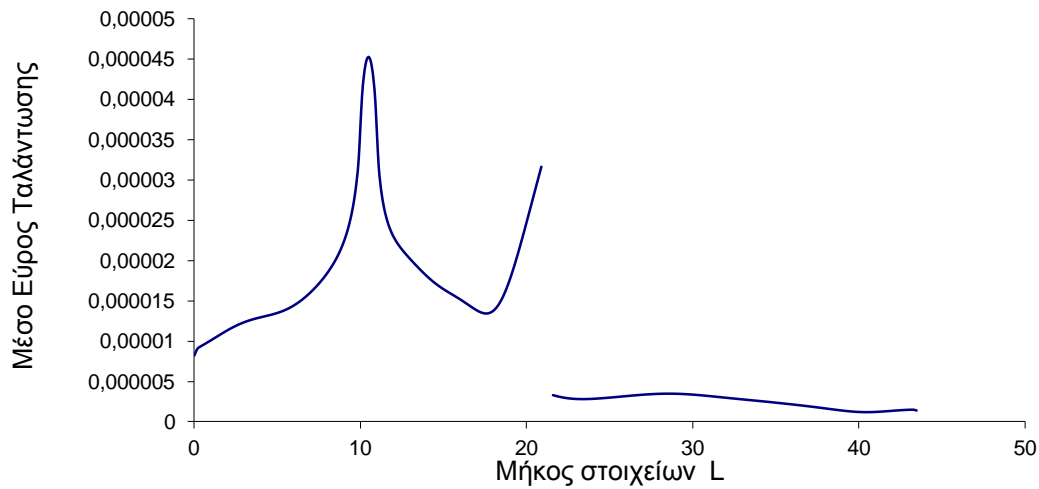
**Διάγραμμα 4.3.3:** Συγκριτικό διάγραμμα για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f=25\text{Hz}$  με βάθος ορύγματος  $h = 2,5\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,5\text{m}$ .



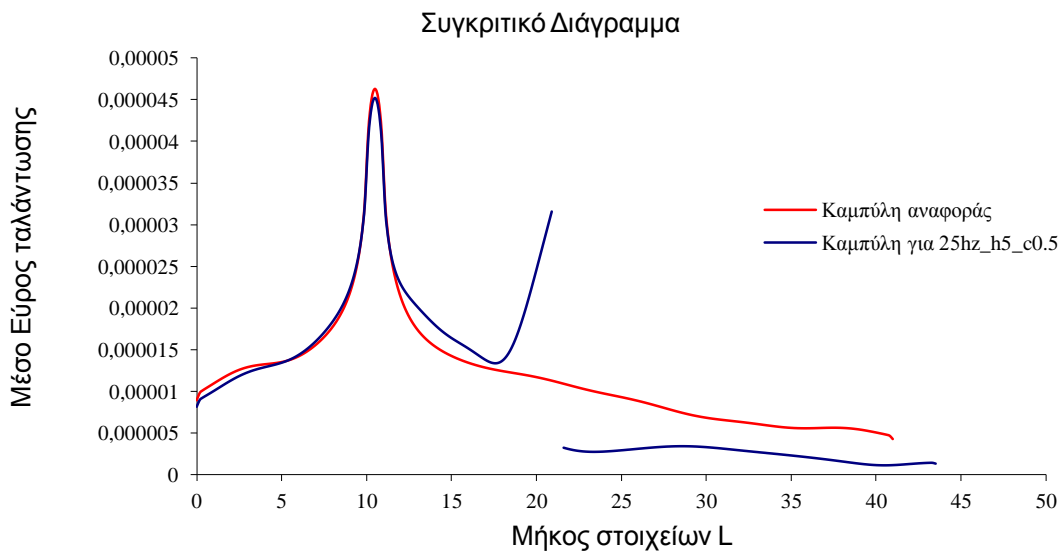
**Εικόνα 4.3.5:** Περίγραμμα μετατοπίσεων για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 25\text{Hz}$  με βάθος ορύγματος  $h = 5\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,5\text{m}$



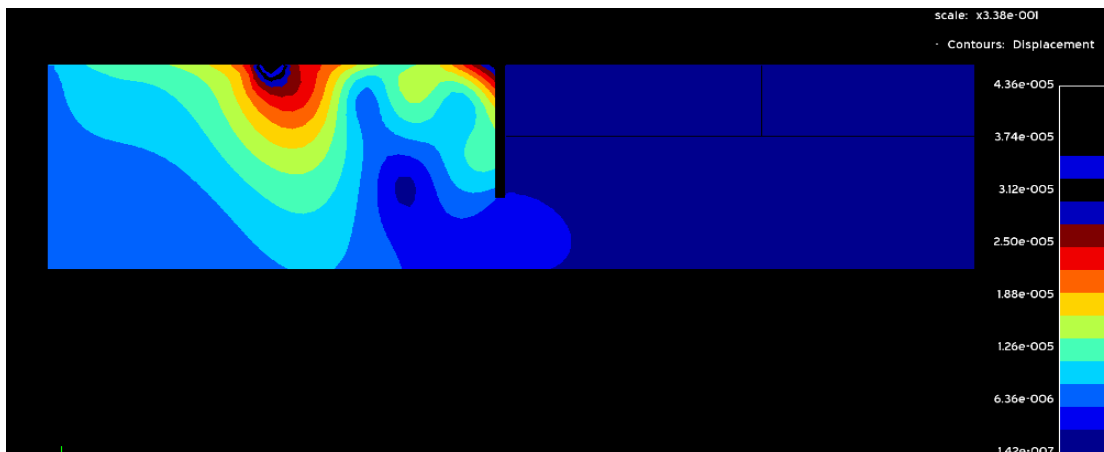
**Εικόνα 4.3.6:** παραμόρφωση του εδάφους για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 25\text{Hz}$  με βάθος ορύγματος  $h = 2,5\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,5\text{m}$



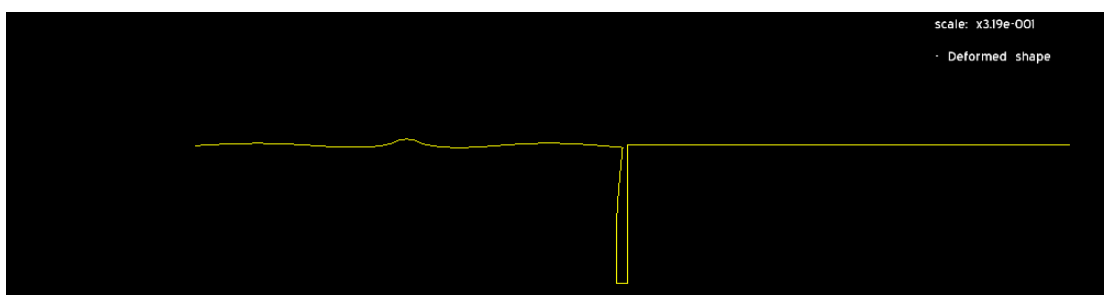
**Διάγραμμα 4.3.4:** Διάγραμμα μεταβολής του συντελεστή μείωσης εύρους σε όλο το μήκος του εδάφους για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 25\text{Hz}$  με βάθος ορύγματος  $h = 5\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,5\text{m}$ .



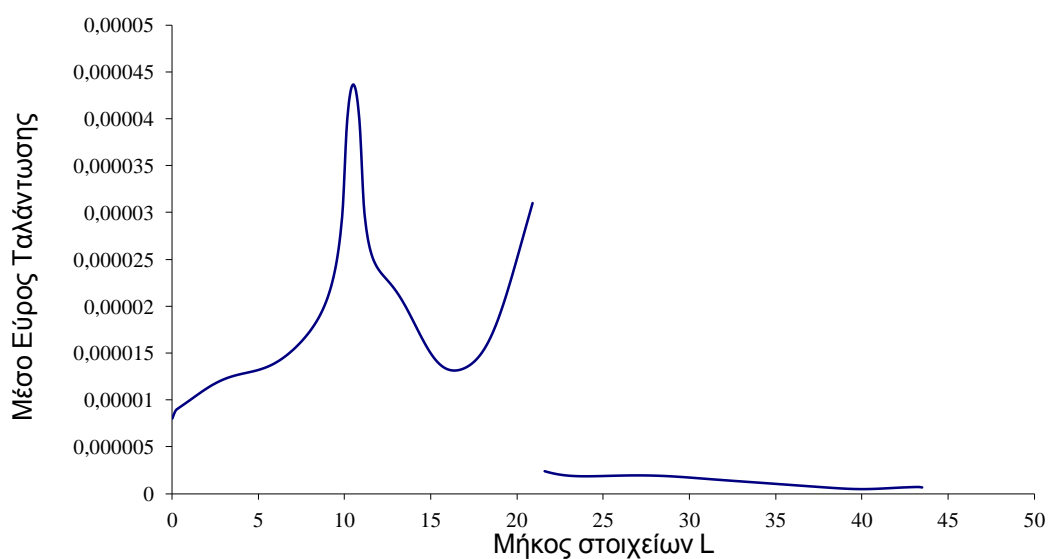
**Διάγραμμα 4.3.5:** Συγκριτικό διάγραμμα για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 25\text{Hz}$  με βάθος ορύγματος  $h = 5\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,5\text{m}$



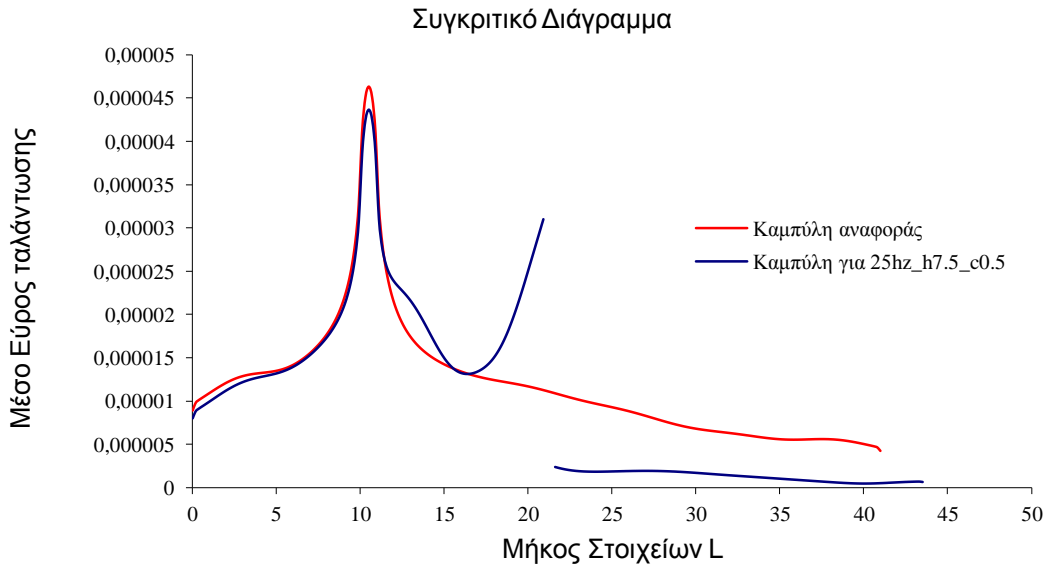
**Εικόνα 4.3.7:** Περίγραμμα μετατοπίσεων για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 25\text{Hz}$  με βάθος ορύγματος  $h = 7,5\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,5\text{m}$



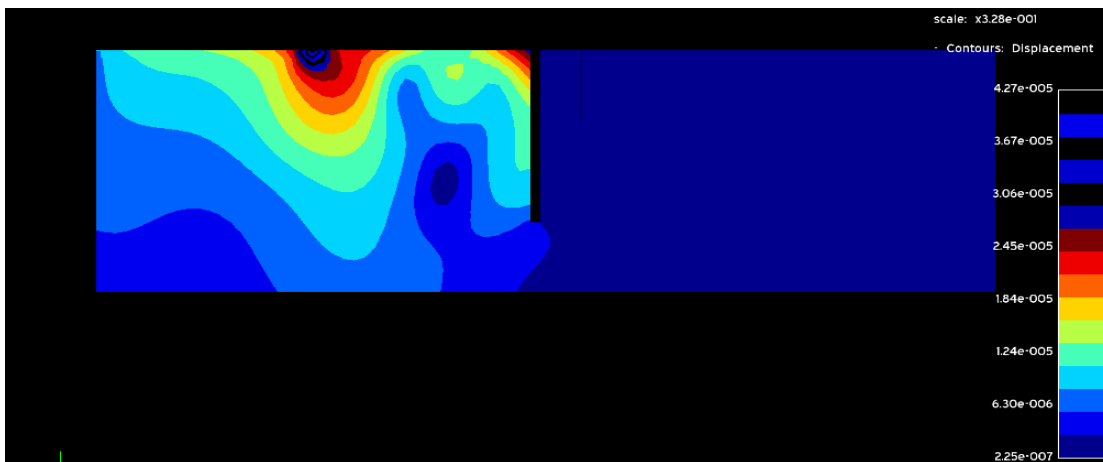
**Εικόνα 4.3.8:** Παραμόρφωση του εδάφους για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 25\text{Hz}$  με βάθος ορύγματος  $h = 7,5\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,5\text{m}$



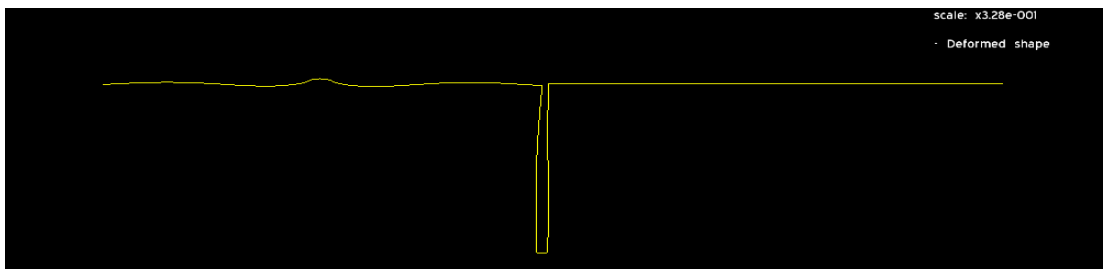
**Διάγραμμα 4.3.6:** Διάγραμμα μεταβολής του συντελεστή μείωσης εύρους σε όλο το μήκος του εδάφους για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 25\text{Hz}$  με βάθος ορύγματος  $h = 7,5\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,5\text{m}$ .



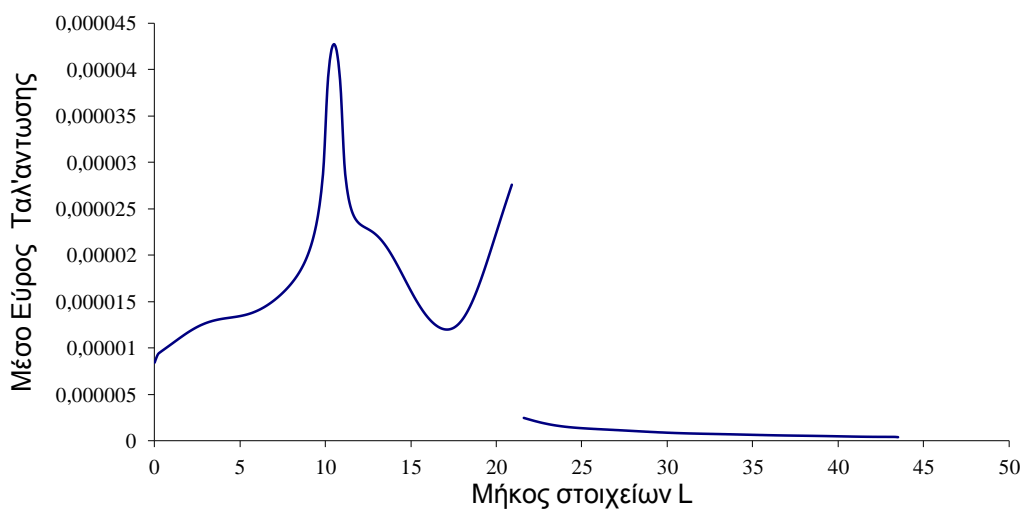
**Διάγραμμα 4.3.7:** Συγκριτικό διάγραμμα για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 25\text{Hz}$  με βάθος ορύγματος  $h = 7,5\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,5\text{m}$ .



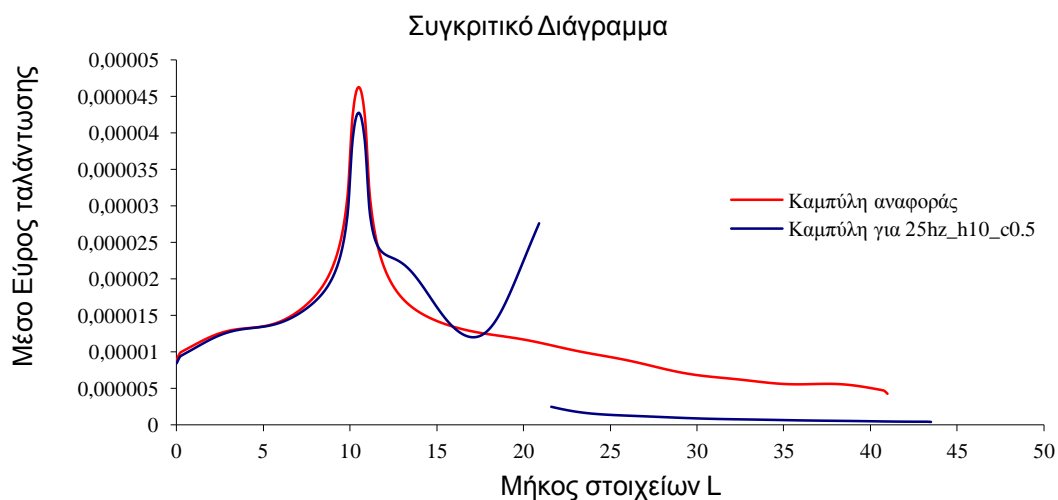
**Εικόνα 4.3.9:** Περίγραμμα μετατοπίσεων για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 25\text{Hz}$  με βάθος ορύγματος  $h = 10\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,5\text{m}$



**Εικόνα 4.3.10:** Παραμόρφωση του εδάφους για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 25\text{Hz}$  με βάθος ορύγματος  $h = 10\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,5\text{m}$



**Διάγραμμα 4.3.8:** Διάγραμμα μεταβολής του συντελεστή μείωσης εύρους σε όλο το μήκος του εδάφους για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 25\text{Hz}$  με βάθος ορύγματος  $h = 10\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,5\text{m}$ .

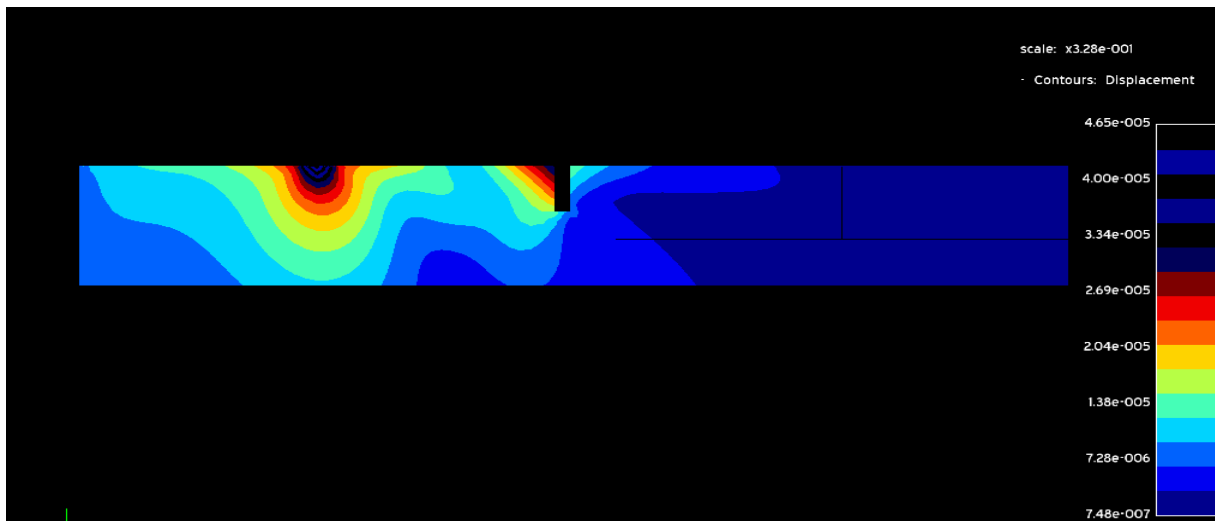


**Διάγραμμα 4.3.9:** Συγκριτικό διάγραμμα για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 25\text{Hz}$  με βάθος ορύγματος  $h = 10\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,5\text{m}$ .

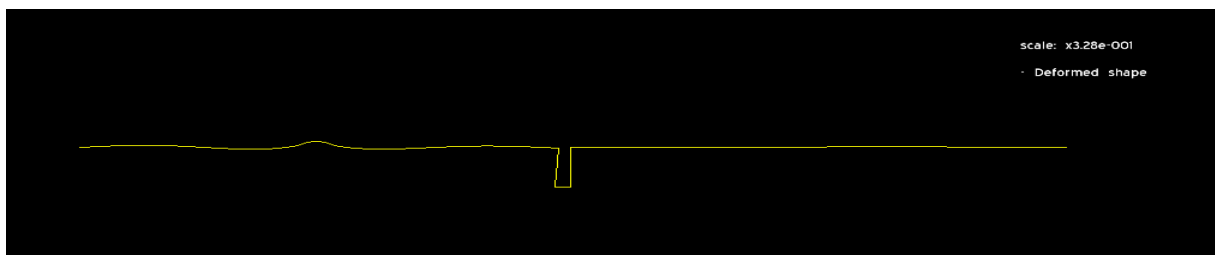
**Πίνακας 4.3.1:** Υπολογισμός του μέσου όρου του εύρους μετατόπισης των διαμήκη κυμάτων με κενό όρυγμα, για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 25\text{Hz}$  με διαφορετικά βάθη ορύγματος ( $h$ ) και με μήκος ορύγματος  $c = 0,5\text{m}$ .

ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ	ΒΑΘΟΣ ΟΡΥΓΜΑΤΟΣ (H)	ΜΗΚΟΣ ΟΡΥΓΜΑΤΟΣ (c)	ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ ΕΥΡΟΥΣ ΠΡΟΣΤΑΤΕΥΜΕΝΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ	ΜΕΙΩΣΗ ΤΟΥ ΜΕΣΟΥ ΟΡΟΥ ΕΥΡΟΥΣ(%)	ΜΕΙΩΣΗ ΤΟΥ ΜΕΣΟΥ ΕΥΡΟΣ
25Hz	2,5m	0,5m	3,62273E-06	49,73	1,989061
25Hz	5,0m	0,5m	2,47063E-06	65,71	2,916597
25Hz	7,5m	0,5m	1,30942E-06	81,83	5,503071
25Hz	10,0m	0,5m	7,82347E-07	89,14	9,210531
25hz (χωρίς όρυγμα)	0,0m	0,0m	7,20583E-06		1

**4.3.2. Αποτελέσματα για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 25\text{Hz}$  με διαφορετικά βάθη ορύγματος και με πλάτος ορύγματος  $c = 0,75\text{m}$ .**

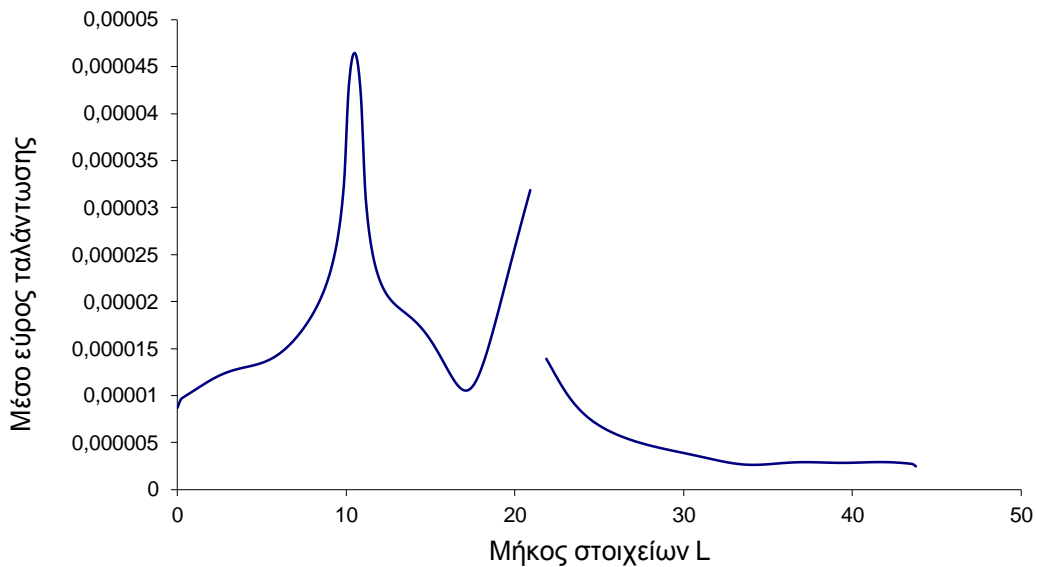


**Εικόνα 4.3.11:** Περίγραμμα μετατοπίσεων για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 25\text{Hz}$  με βάθος ορύγματος  $h = 2,5\text{m}$  και πλάτος ορύγματος  $c = 0,75\text{m}$

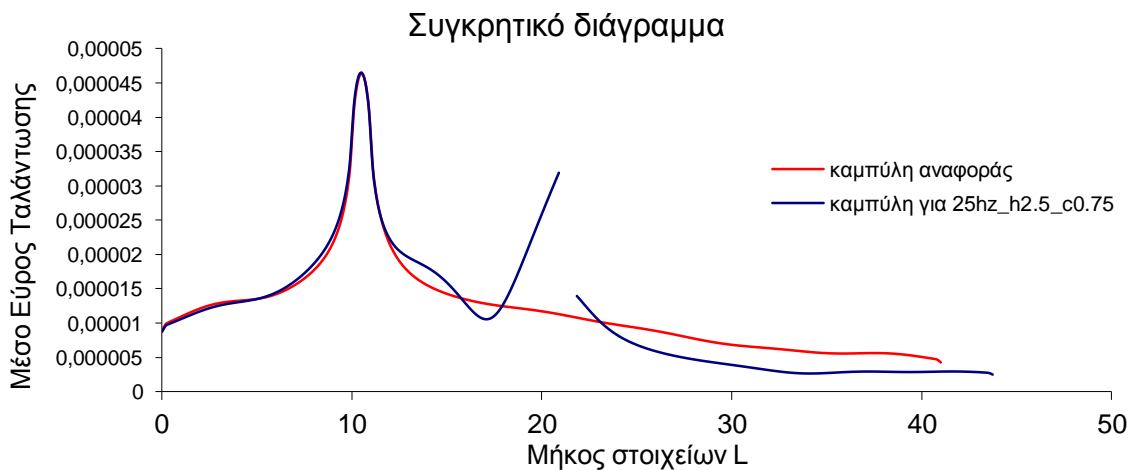


**Εικόνα 4.3.12:** Παραμόρφωση του εδάφους για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 25\text{Hz}$  με βάθος ορύγματος  $h = 2,5\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,75\text{m}$

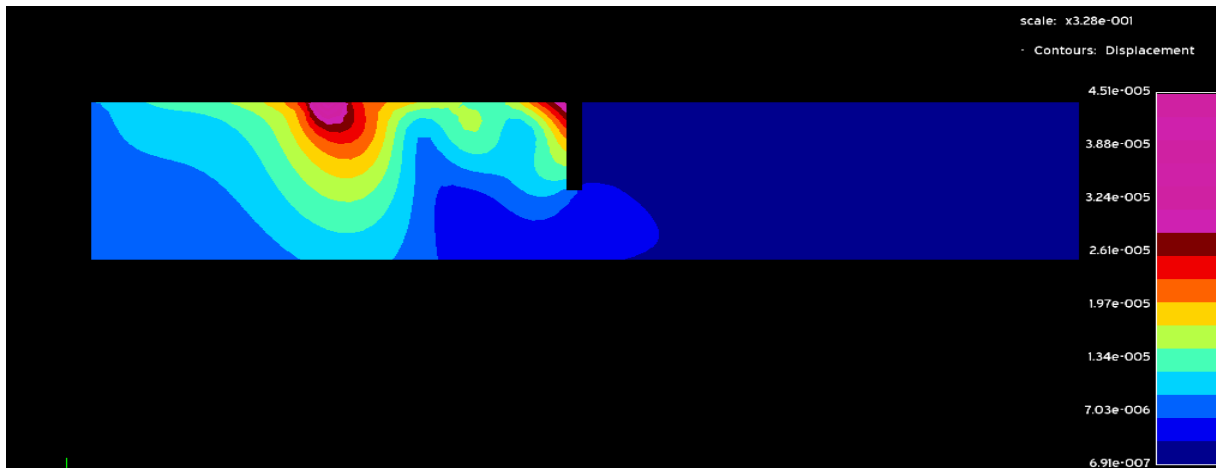




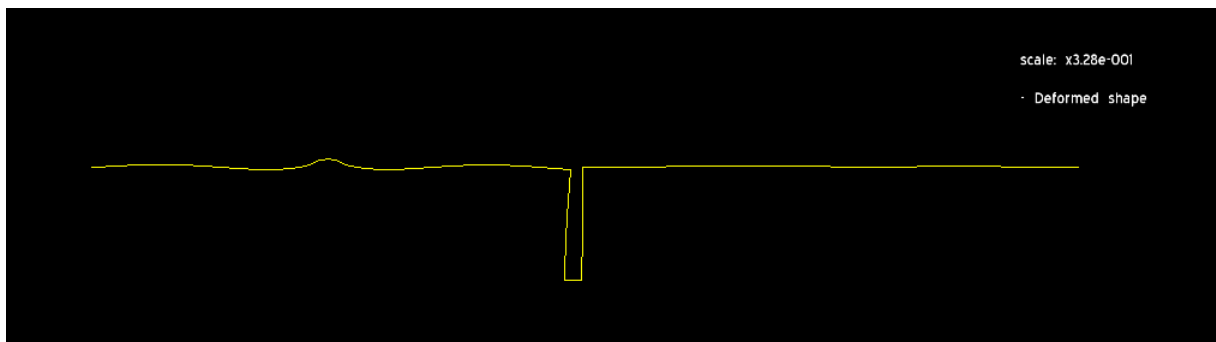
**Διάγραμμα 4.3.10:** Διάγραμμα μεταβολής του συντελεστή μείωσης εύρους σε όλο το μήκος του εδάφους για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 25\text{Hz}$  με βάθος ορύγματος  $h = 2,5\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,75\text{m}$ .



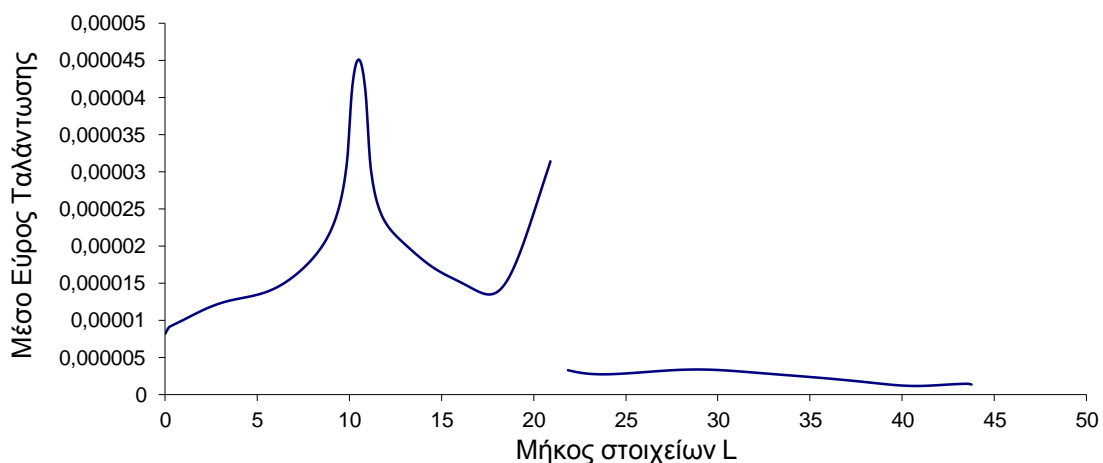
**Διάγραμμα 4.3.11:** Συγκρητικό διάγραμμα για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f=25\text{Hz}$  με βάθος ορύγματος  $h = 2,5\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,75\text{m}$ .



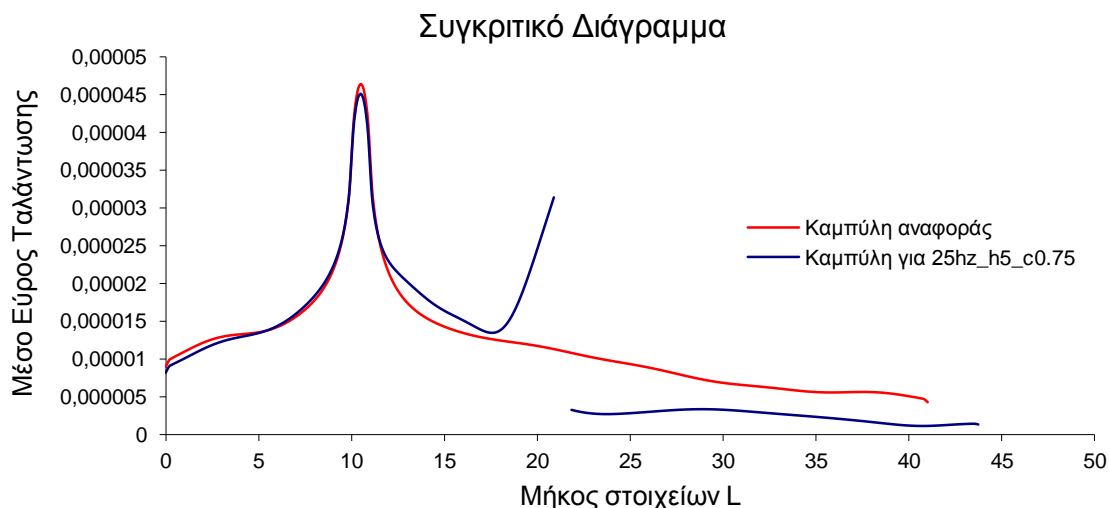
**Εικόνα 4.3.13:** Περίγραμμα μετατοπίσεων για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 25\text{Hz}$  με βάθος ορύγματος  $h = 5\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,75\text{m}$



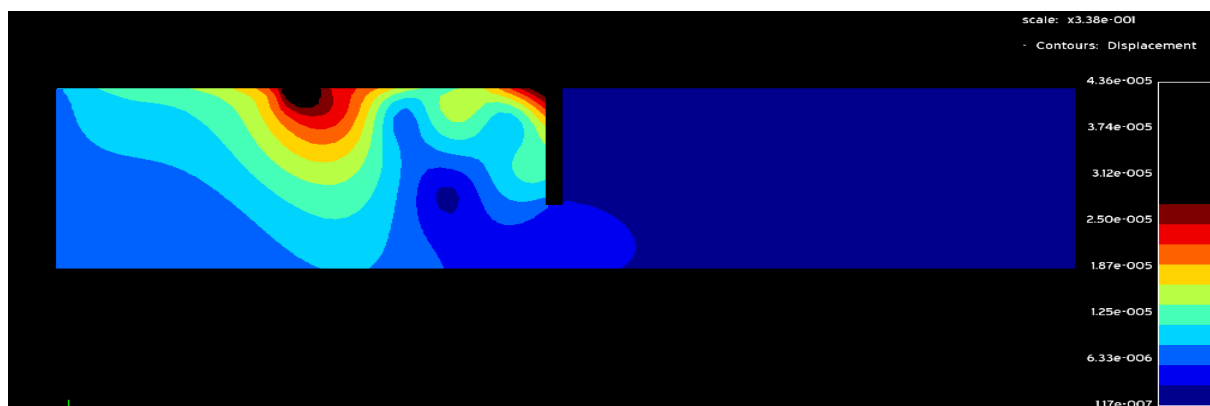
**Εικόνα 4.3.14:** Παραμόρφωση του εδάφους για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 25\text{Hz}$  με βάθος ορύγματος  $h = 5\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,75\text{m}$



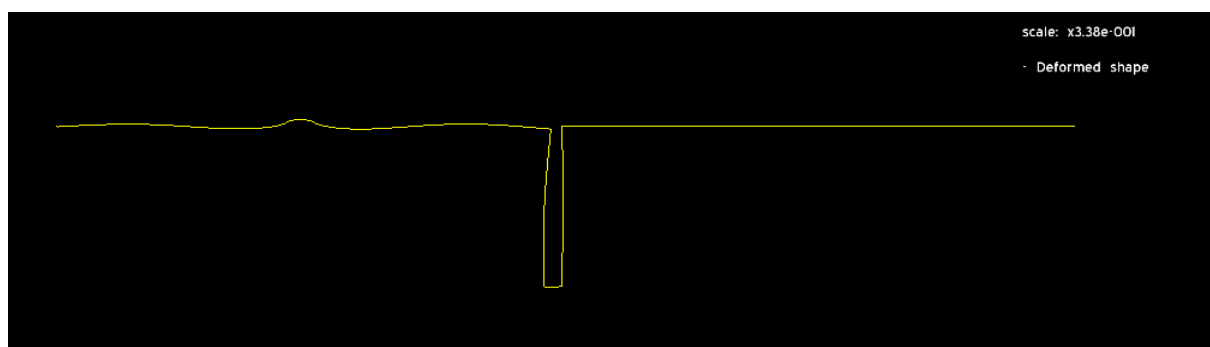
**Διάγραμμα 4.3.12:** Διάγραμμα μεταβολής του συντελεστή μείωσης εύρους σε όλο το μήκος του εδάφους για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 25\text{Hz}$  με βάθος ορύγματος  $h = 5\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,75\text{m}$ .



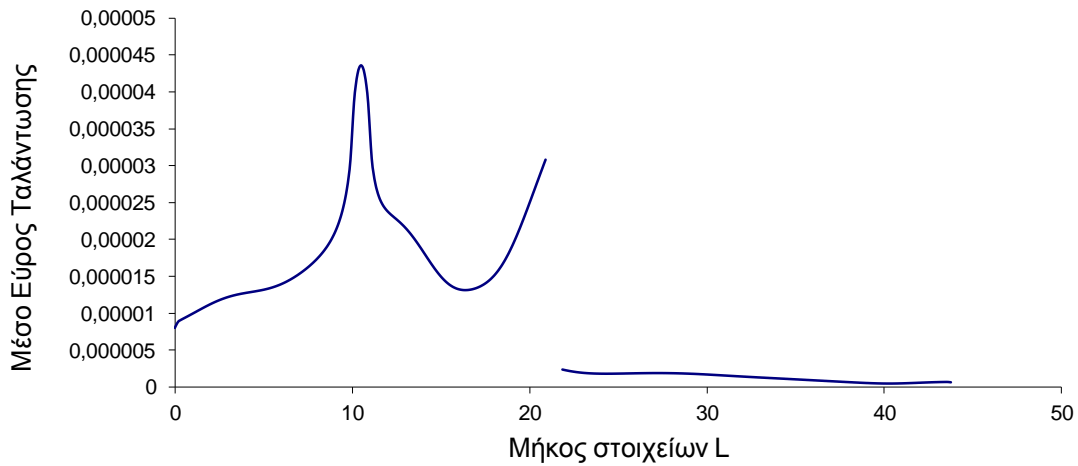
**Διάγραμμα 4.3.13:** Συγκριτικό διάγραμμα για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f=25\text{Hz}$  με βάθος ορύγματος  $h = 5\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,75\text{m}$ .



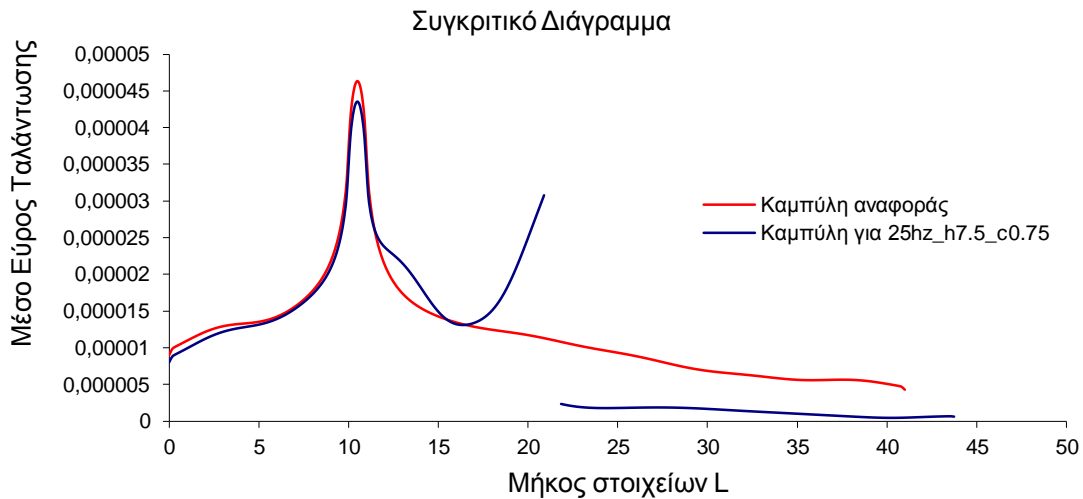
**Εικόνα 4.3.15:** Περίγραμμα μετατοπίσεων για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 25\text{Hz}$  με βάθος ορύγματος  $h = 7,5\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,75\text{m}$



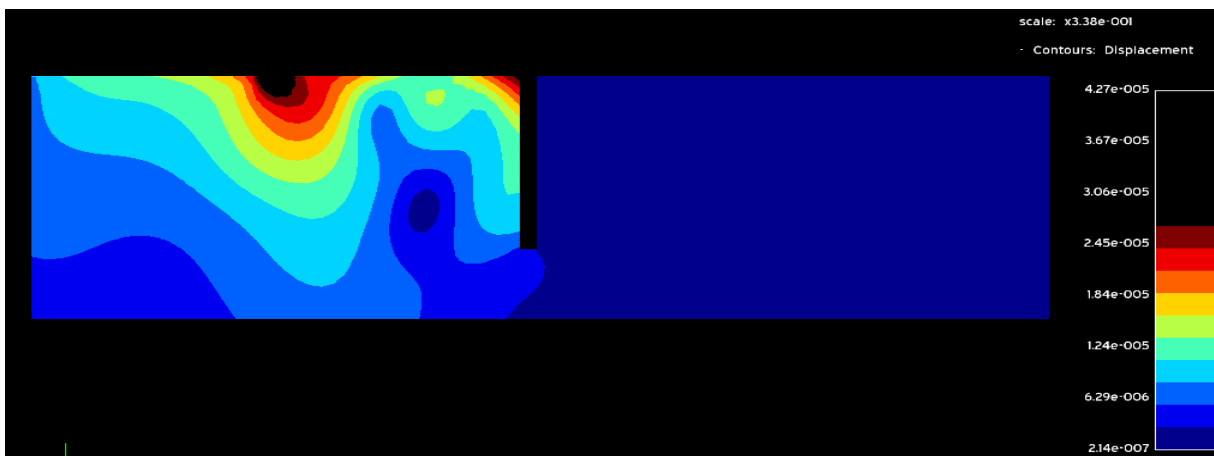
**Εικόνα 4.3.16:** Παραμόρφωση του εδάφους για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 25\text{Hz}$  με βάθος ορύγματος  $h = 7,5\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,75\text{m}$



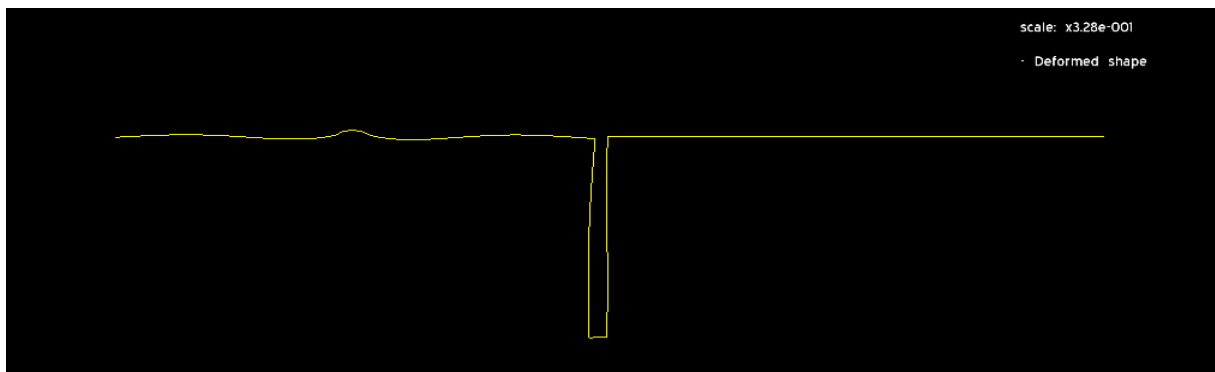
**Διάγραμμα 4.3.14:** Διάγραμμα μεταβολής του συντελεστή μείωσης εύρους σε όλο το μήκος του εδάφους για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 25\text{Hz}$  με βάθος ορύγματος  $h = 7,5\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,75\text{m}$ .



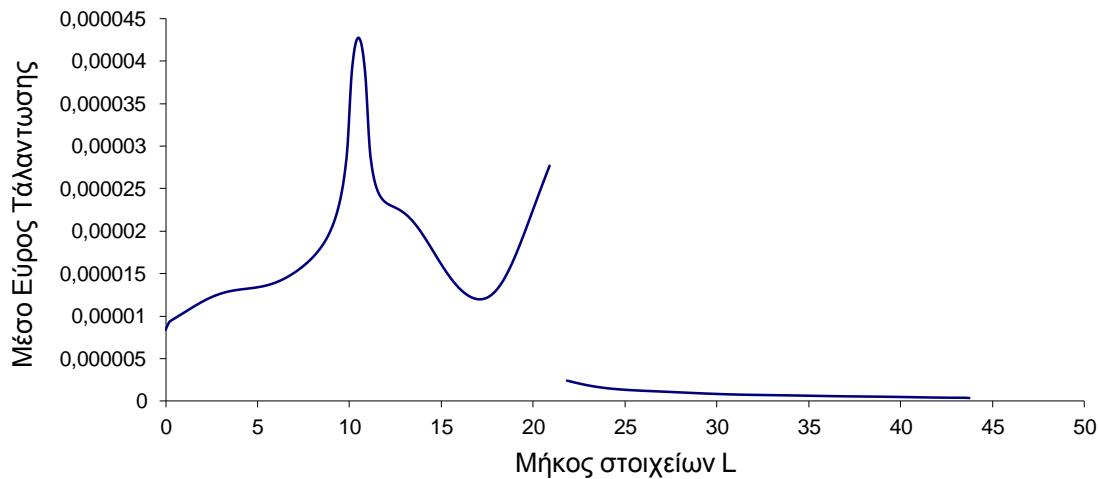
**Διάγραμμα 4.3.15:** Συγκριτικό διάγραμμα για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f=25\text{Hz}$  με βάθος ορύγματος  $h = 7,5\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,75\text{m}$



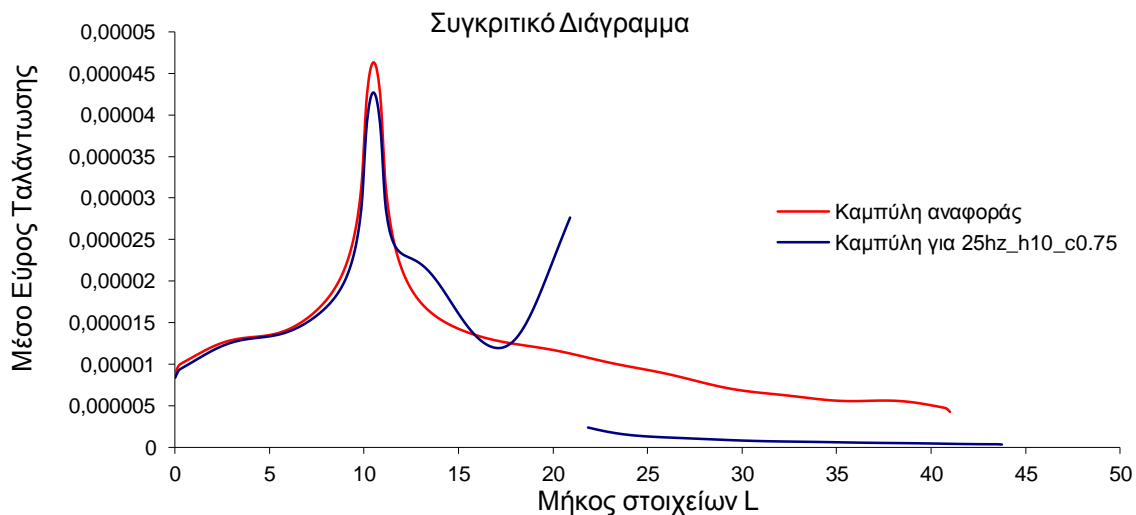
**Εικόνα 4.3.17:** Περίγραμμα μετατοπίσεων για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 25\text{Hz}$  με βάθος ορύγματος  $h = 10\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,75\text{m}$



**Εικόνα 4.3.18:** Παραμόρφωση του εδάφους για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 25\text{Hz}$  με βάθος ορύγματος  $h = 10\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,75\text{m}$



**Διάγραμμα 4.3.17:** Διάγραμμα μεταβολής του συντελεστή μείωσης εύρους σε όλο το μήκος του εδάφους για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 25\text{Hz}$  με βάθος ορύγματος  $h = 10\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,75\text{m}$ .

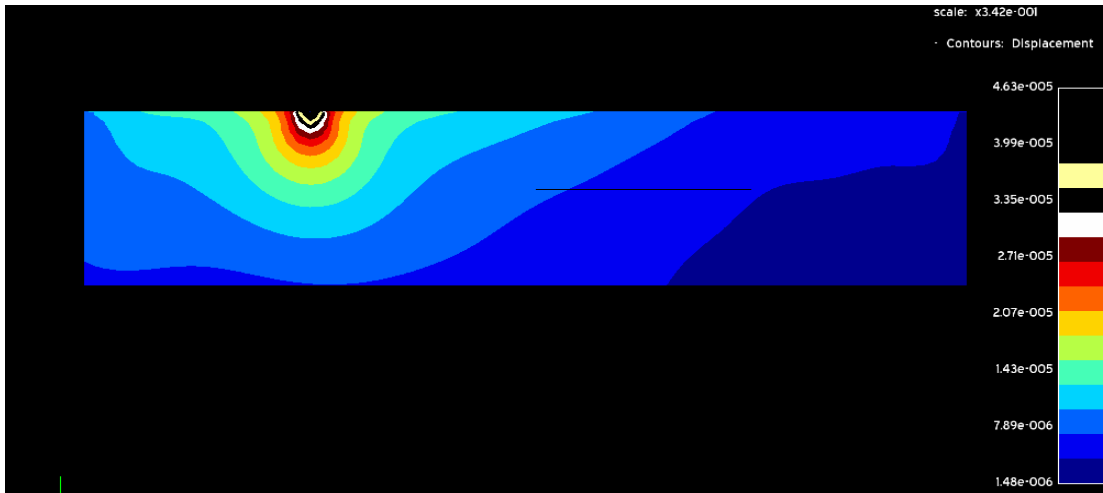


**Διάγραμμα 4.3.18:** Συγκριτικό διάγραμμα για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f=25\text{Hz}$  με βάθος ορύγματος  $h = 10\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,75\text{m}$

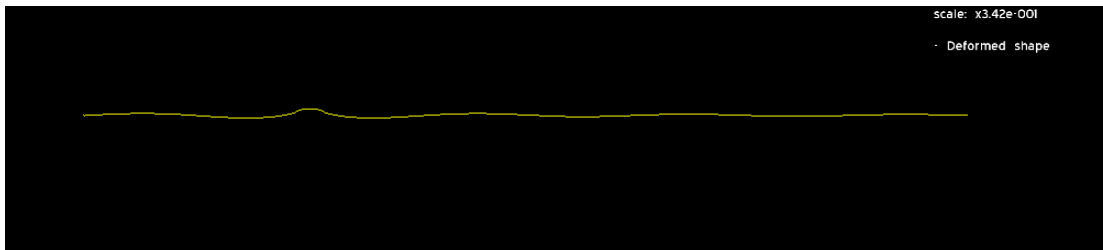
**Πίνακας 4.3.2:** Υπολογισμός του μέσου όρου του εύρους μετατόπισης των διαμήκη κυμάτων με κενό όρυγμα, για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 25\text{Hz}$  με διαφορετικά βάθη ορύγματος ( $h$ ) και με μήκος ορύγματος  $c = 0,75\text{m}$ .

ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ	ΒΑΘΟΣ ΟΡΥΓΜΑΤΟΣ (H)	ΜΗΚΟΣ ΟΡΥΓΜΑΤΟΣ (c)	ΜΕΣΗ ΜΕΤΑΤΟΠΗΣΗ ΚΥΜΑΤΩΝ ΠΡΟΣΤΑΤΕΥΜΕΝΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ	ΜΕΙΩΣΗ ΤΗΣ ΜΕΣΗΣ ΜΕΤΑΤΟΠΗΣΗΣ ΚΥΜΑΤΩΝ(%)	
25Hz	2,5m	0,75m	3,33087E-06	53,78	2,1634
25Hz	5m	0,75m	2,40075E-06	66,68	3,0015
25Hz	7,5m	0,75m	1,27262E-06	82,34	5,6622
25Hz	10m	0,75m	7,57939E-07	89,48	9,5071
25hz (χωρίς όρυγμα)	0m	0m	7,20583E-06		1

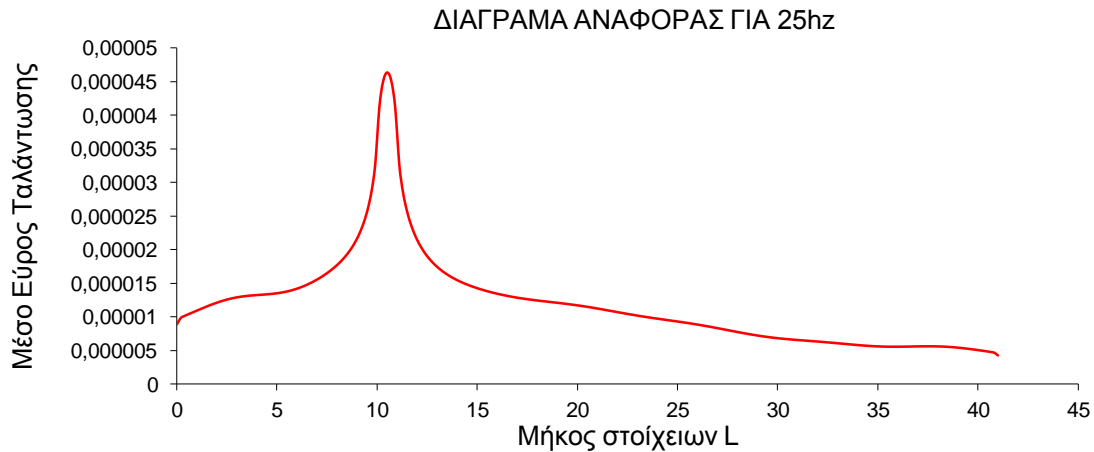
**4.3.3. Αποτελέσματα για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 25\text{Hz}$  με διαφορετικά βάθη ορύγματος επικαλυμμένου με σκυρόδεμα και με πλάτος ορύγματος  $c = 0,5\text{m}$ .**



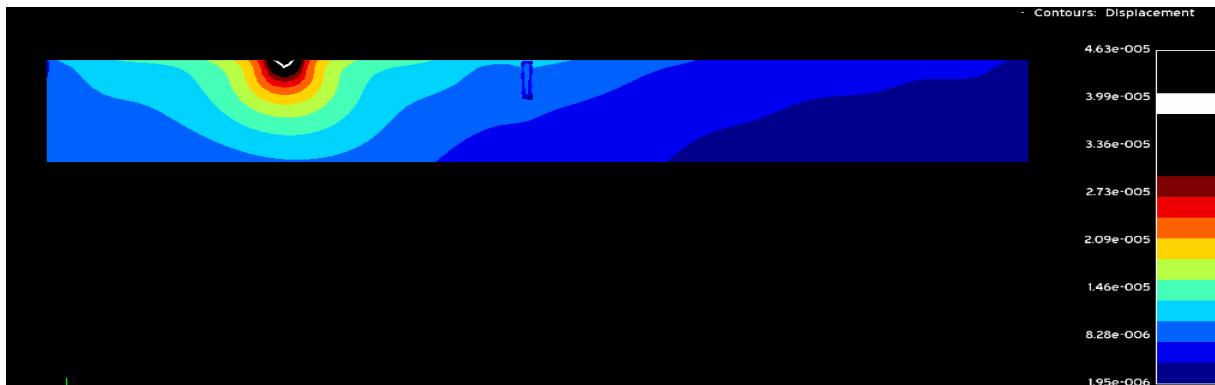
**Εικόνα 4.3.19:** Μέτρο μετατοπίσεων (m) για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 25\text{Hz}$  χωρίς όρυγμα. (Πρόβλημα αναφοράς)



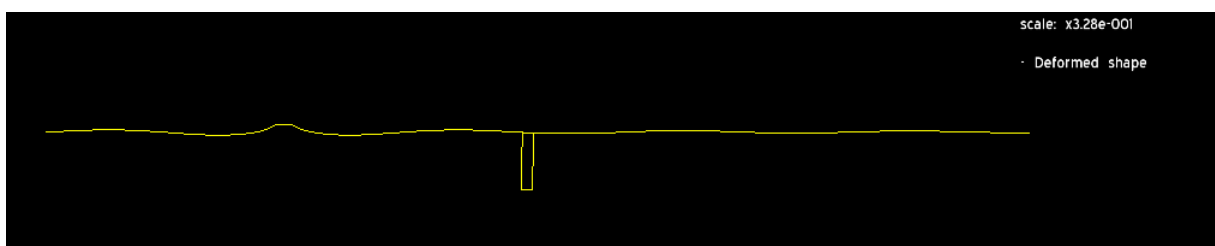
**Εικόνα 4.3.20:** Παραμόρφωση του εδάφους για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 25\text{Hz}$  χωρίς όρυγμα (Πρόβλημα αναφοράς)



**Διάγραμμα 4.3.19:** Μέτρο μετατοπίσεων (m) για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 25\text{Hz}$  χωρίς όρυγμα (Πρόβλημα αναφοράς) για  $y = 0$  (ελεύθερη επιφάνεια).

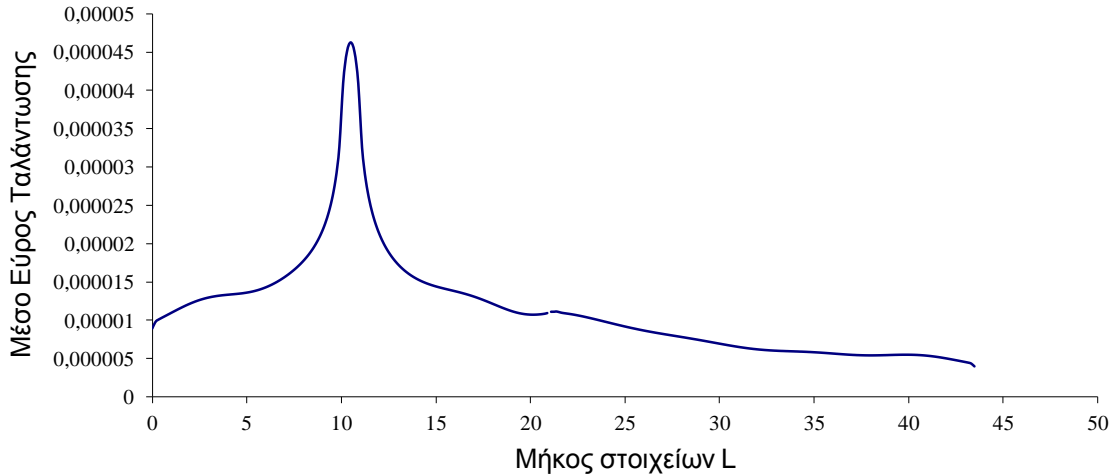


**Εικόνα 4.3.21:** Περίγραμμα μετατοπίσεων για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 25\text{Hz}$  με βάθος επικαλυμμένου με σκυρόδεμα ορύγματος  $h = 2,5\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,5\text{m}$

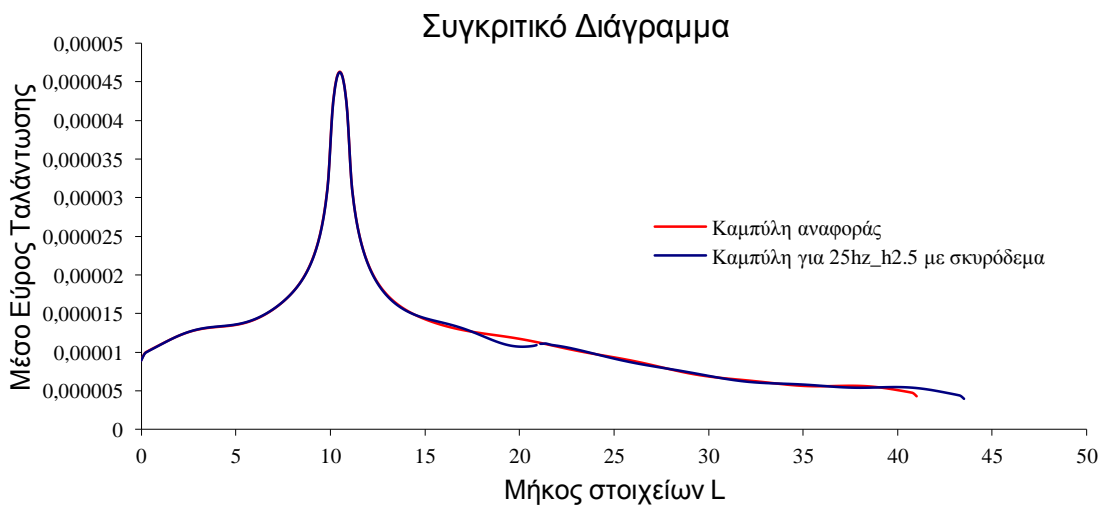


**Εικόνα 4.3.22:** Παραμόρφωση του εδάφους για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 25\text{Hz}$  με βάθος επικαλυμμένου με σκυρόδεμα ορύγματος  $h = 2,5\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,5\text{m}$





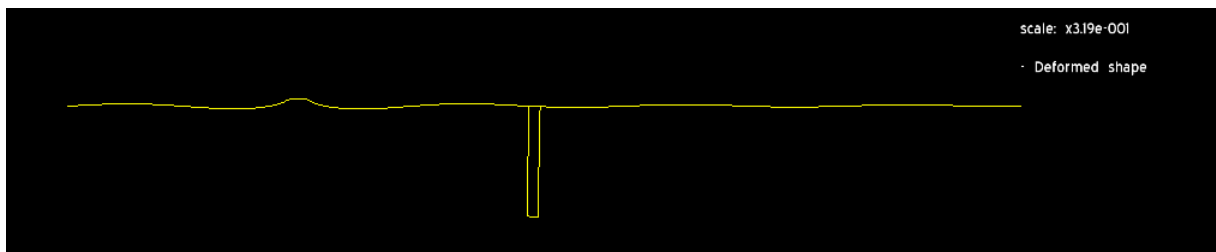
**Διάγραμμα 4.3.20:** Διάγραμμα μεταβολής του συντελεστή μείωσης εύρους σε όλο το μήκος του εδάφους για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 25\text{Hz}$  με βάθος επικαλυμμένου με σκυρόδεμα ορύγματος  $h = 2,5\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,5\text{m}$ .



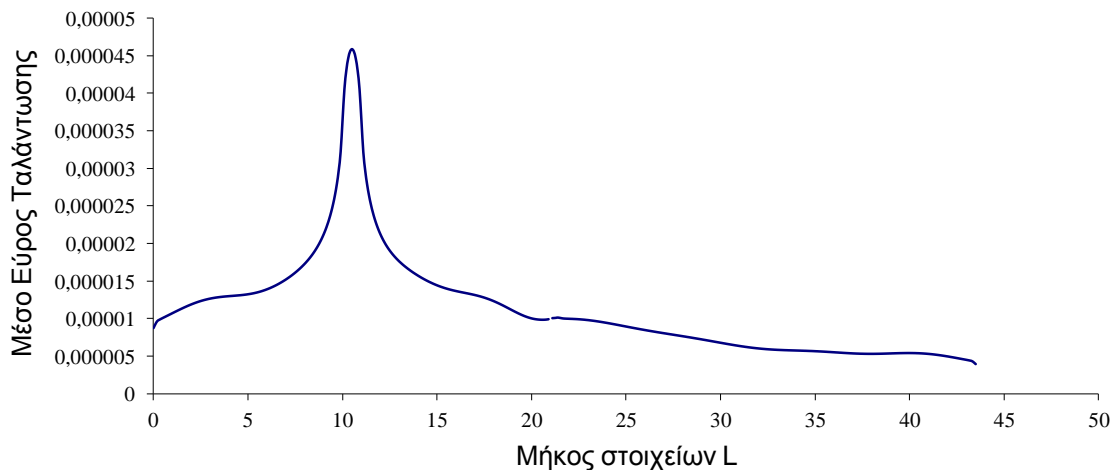
**Διάγραμμα 4.3.21:** Συγκριτικό διάγραμμα για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f=25\text{Hz}$  με βάθος επικαλυμμένου με σκυρόδεμα ορύγματος  $h = 2,5\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,5\text{m}$



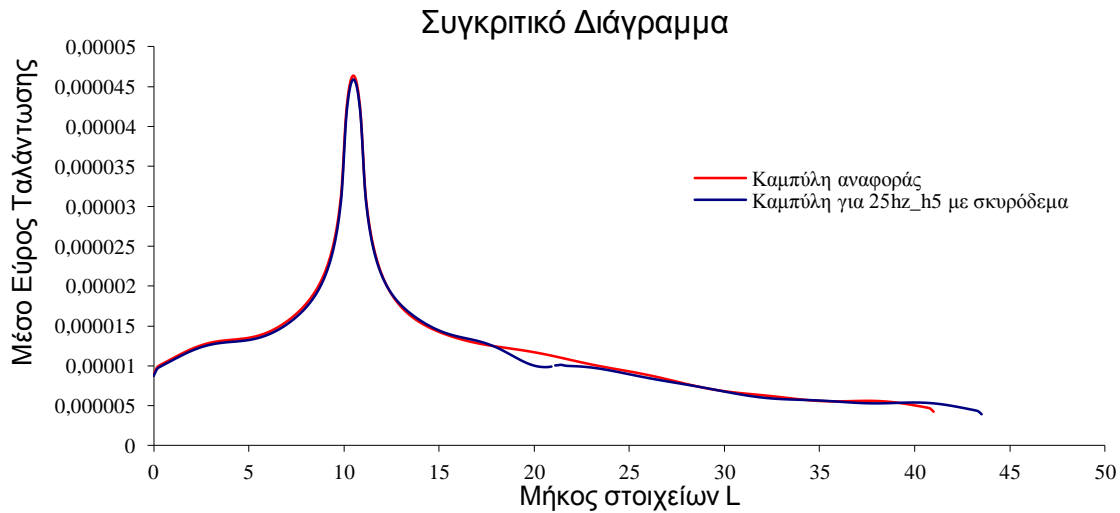
**Σχήμα 4.3.23:** Περίγραμμα μετατοπίσεων για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 25\text{Hz}$  με βάθος επικαλυμμένου με σκυρόδεμα ορύγματος  $h = 5\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,5\text{m}$



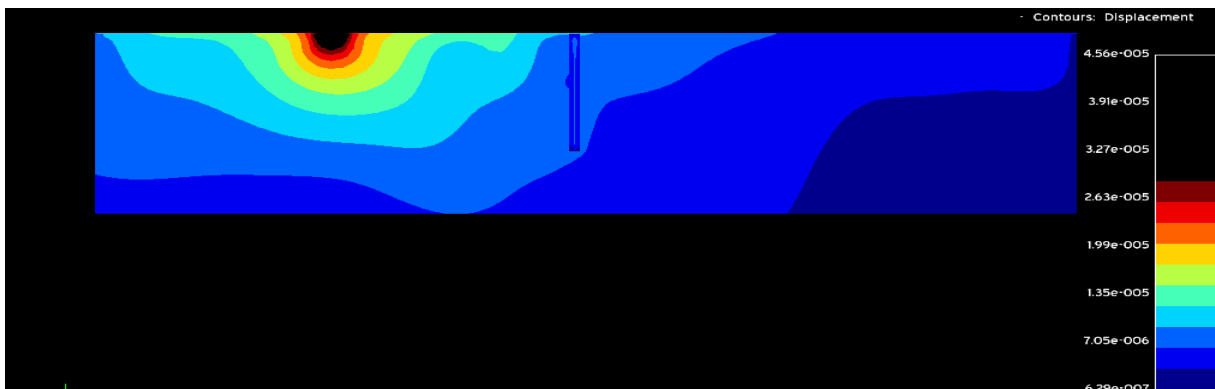
**Σχήμα 4.3.24:** Παραμόρφωση του εδάφους για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 25\text{Hz}$  με βάθος επικαλυμμένου με σκυρόδεμα ορύγματος  $h = 5\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,5\text{m}$



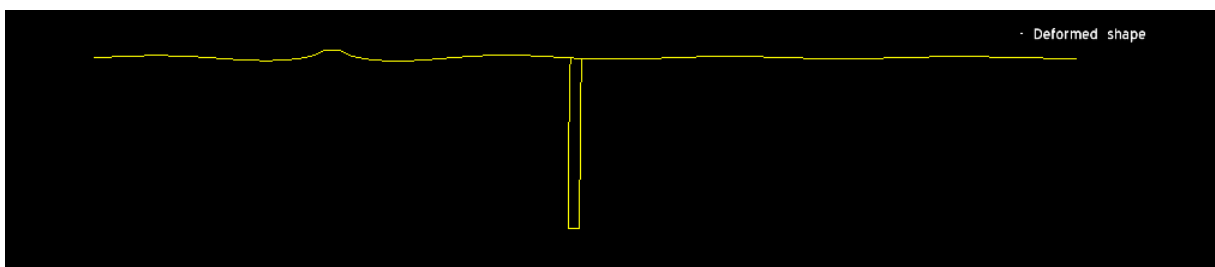
**Σχήμα 4.3.22:** Διάγραμμα μεταβολής του συντελεστή μείωσης εύρους σε όλο το μήκος του εδάφους για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 25\text{Hz}$  με βάθος επικαλυμμένου με σκυρόδεμα ορύγματος  $h = 5\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,5\text{m}$ .



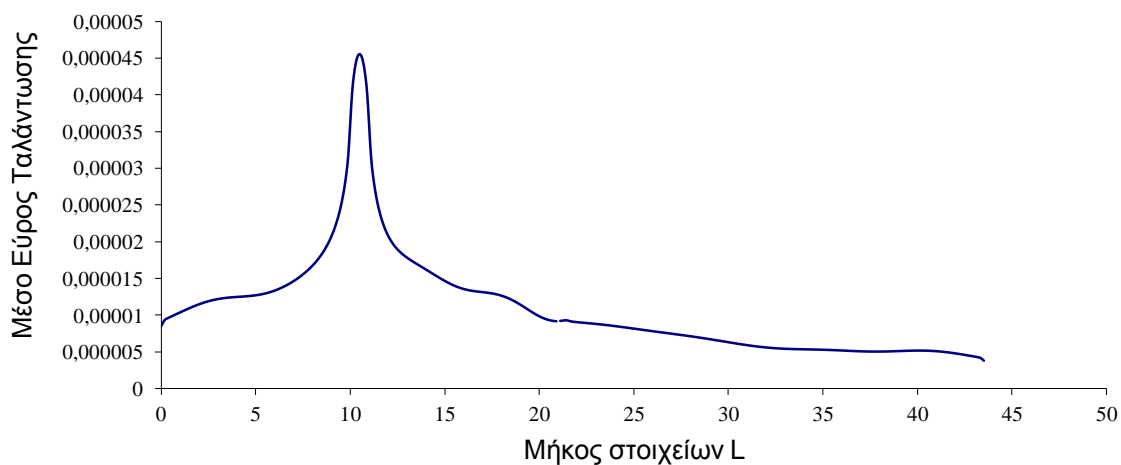
**Διάγραμμα 4.3.23:** Συγκριτικό διάγραμμα για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f=25\text{Hz}$  με βάθος επικαλυμμένου με σκυρόδεμα ορύγματος  $h = 5\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,5\text{m}$



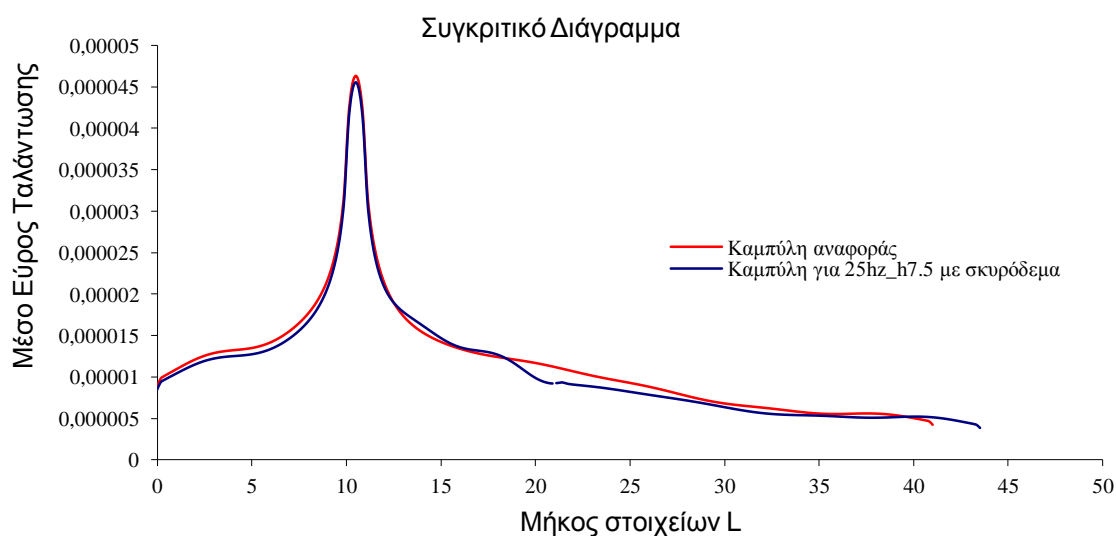
**Εικόνα 4.3.25:** Περίγραμμα μετατοπίσεων για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 25\text{Hz}$  με βάθος επικαλυμμένου με σκυρόδεμα ορύγματος  $h = 7,5\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,5\text{m}$



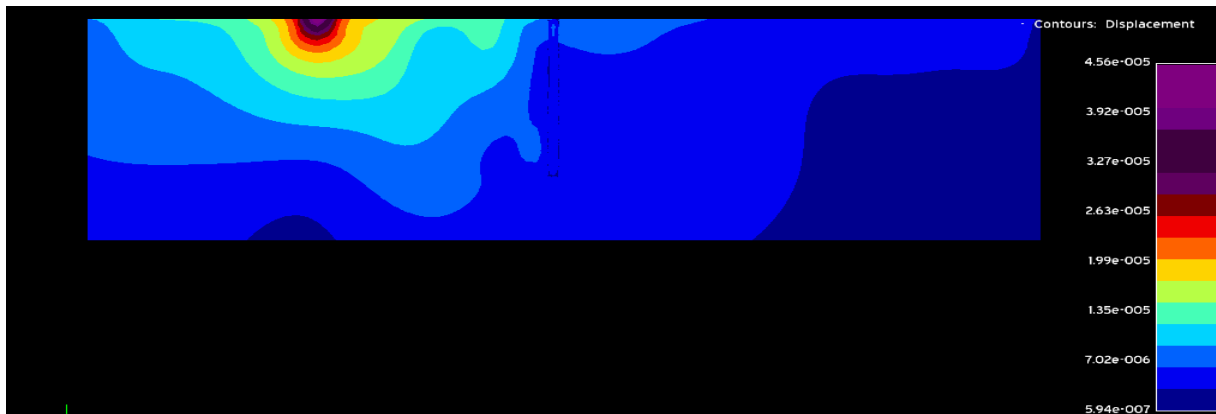
**Εικόνα 4.3.26:** Παραμόρφωση του εδάφους για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 25\text{Hz}$  με βάθος επικαλυμμένου με σκυρόδεμα ορύγματος  $h = 7,5\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,5\text{m}$



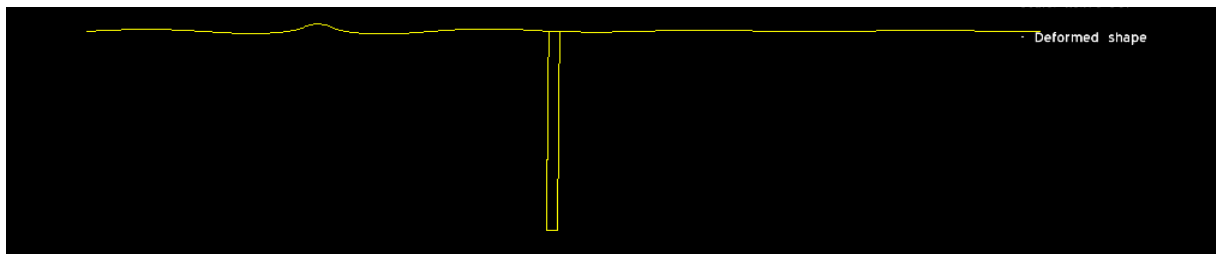
**Διάγραμμα 4.3.24:** Διάγραμμα μεταβολής του συντελεστή μείωσης εύρους σε όλο το μήκος του εδάφους για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 25\text{Hz}$  με βάθος επικαλυμμένου με σκυρόδεμα ορύγματος  $h = 7,5\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,5\text{m}$ .



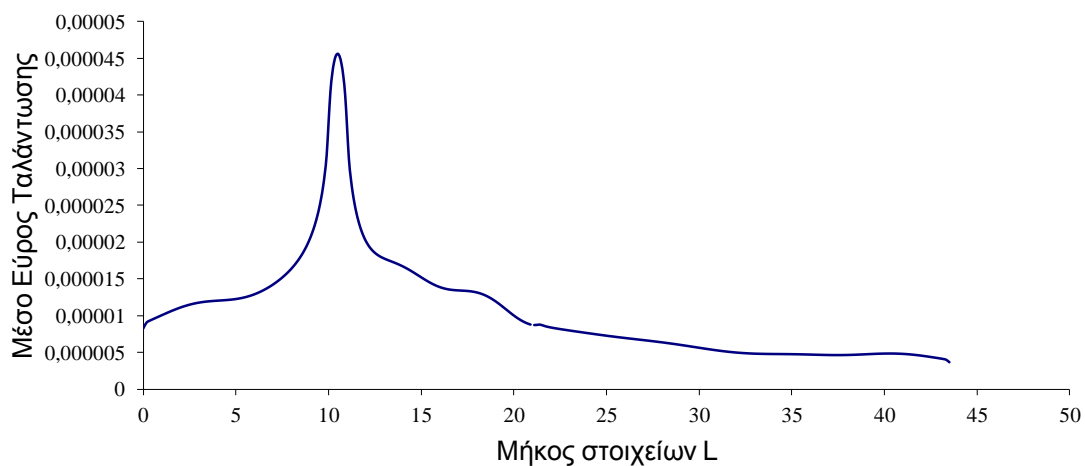
**Σχήμα 4.3.25:** Συγκριτικό διάγραμμα για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f=25\text{Hz}$  με βάθος επικαλυμμένου με σκυρόδεμα ορύγματος  $h = 7,5\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,5\text{m}$



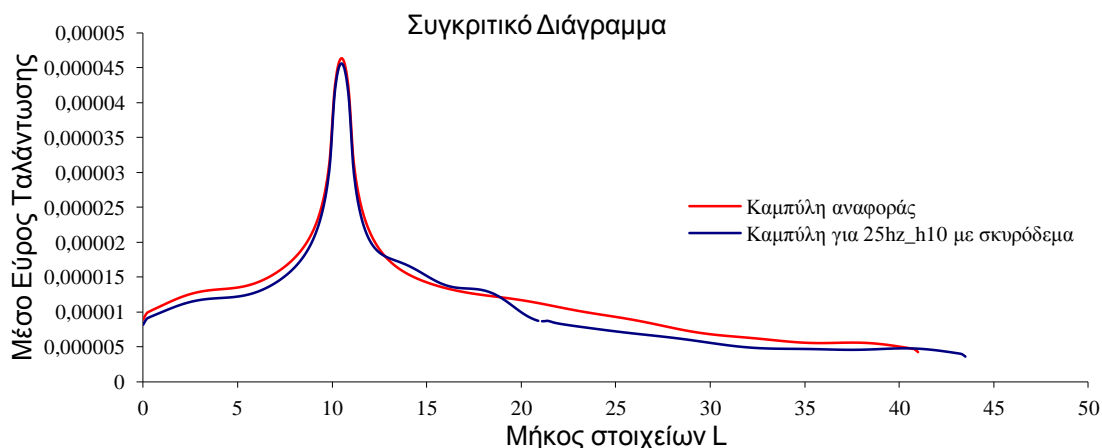
**Εικόνα 4.3.27:** Περίγραμμα μετατοπίσεων για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 25\text{Hz}$  με βάθος επικαλυμμένου με σκυρόδεμα ορύγματος  $h = 10\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,5\text{m}$



**Εικόνα 4.3.28:** Παραμόρφωση του εδάφους για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 25\text{Hz}$  με βάθος επικαλυμμένου με σκυρόδεμα ορύγματος  $h = 10\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,5\text{m}$



**Διάγραμμα 4.3.26:** Διάγραμμα μεταβολής του συντελεστή μείωσης εύρους σε όλο το μήκος του εδάφους για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 25\text{Hz}$  με βάθος επικαλυμμένου με σκυρόδεμα ορύγματος  $h = 10\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,5\text{m}$ .



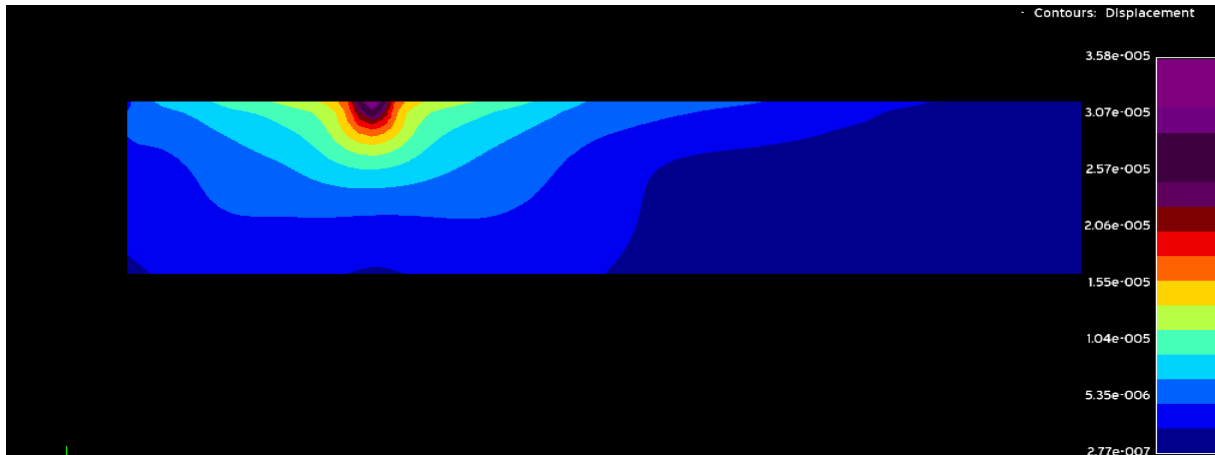
**Διάγραμμα 4.3.27:** Συγκριτικό διάγραμμα για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f=25\text{Hz}$  με βάθος επικαλυμμένου με σκυρόδεμα ορύγματος  $h = 10\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,5\text{m}$

**Πίνακας 4.3.3:** Υπολογισμός του μέσου όρου του εύρους μετατόπισης των διαμήκη κυμάτων για όρυγμα επικαλυμμένο με σκυρόδεμα, για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 25\text{Hz}$  με διαφορετικά βάθη ορύγματος ( $h$ ) και με μήκος ορύγματος  $c = 0,75\text{m}$ .

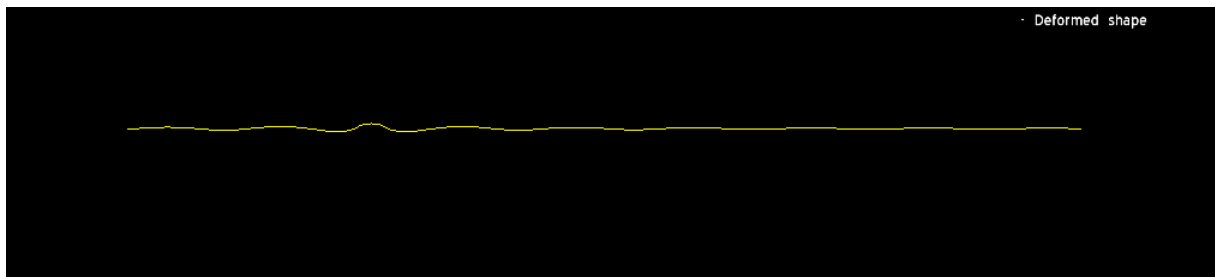
ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ	ΒΑΘΟΣ ΟΡΥΓΜΑΤΟΣ (H)	ΜΗΚΟΣ ΟΡΥΓΜΑΤΟΣ (c)	ΜΕΣΗ ΜΕΤΑΤΟΠΗΣΗ ΚΥΜΑΤΩΝ ΠΡΟΣΤΑΤΕΥΜΕΝΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ	ΜΕΙΩΣΗ ΤΗΣ ΜΕΣΗΣ ΜΕΤΑΤΟΠΗΣΗΣ ΚΥΜΑΤΩΝ(%)	
25Hz	2,5m	0,5m	6,39393E-06	11,27	1,12698
25Hz	5,0m	0,5m	6,27991E-06	12,85	1,147442
25Hz	7,5m	0,5m	5,91284E-06	17,94	1,218675
25Hz	10,0m	0,5m	5,31659E-06	26,22	1,355348
25hz (χωρίς όρυγμα)	0m	0m	7,20583E-06		1

#### 4.4. Επίλυση του προβλήματος με το πρόγραμμα ISOBEM για συχνότητα αρμονικής δύναμης 50Hz

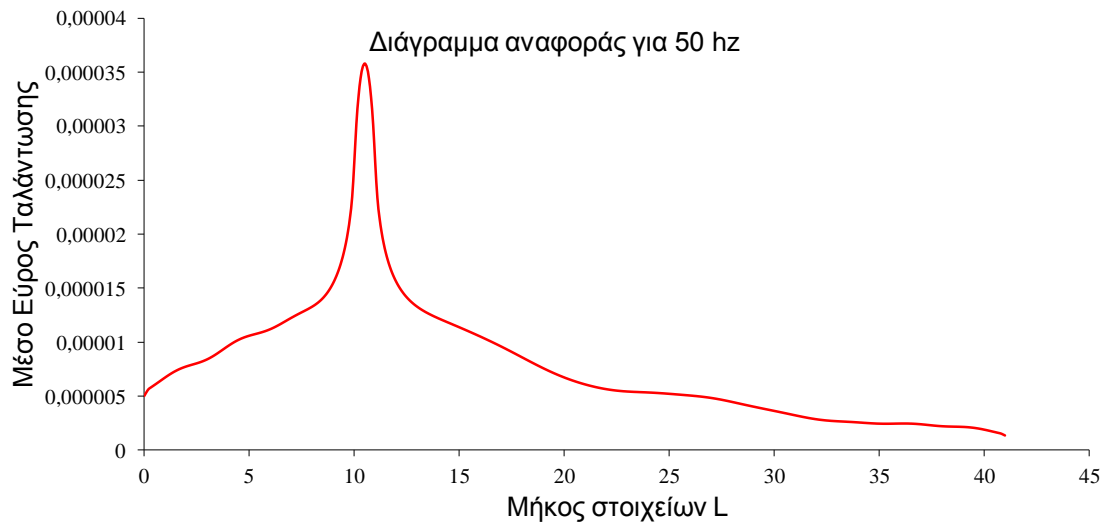
##### 4.4.1. Αποτελέσματα για συχνότητα αρμονικής δύναμης $f = 50\text{Hz}$ με διαφορετικά βάθη ορύγματος και με πλάτος ορύγματος $c = 0,5\text{m}$ .



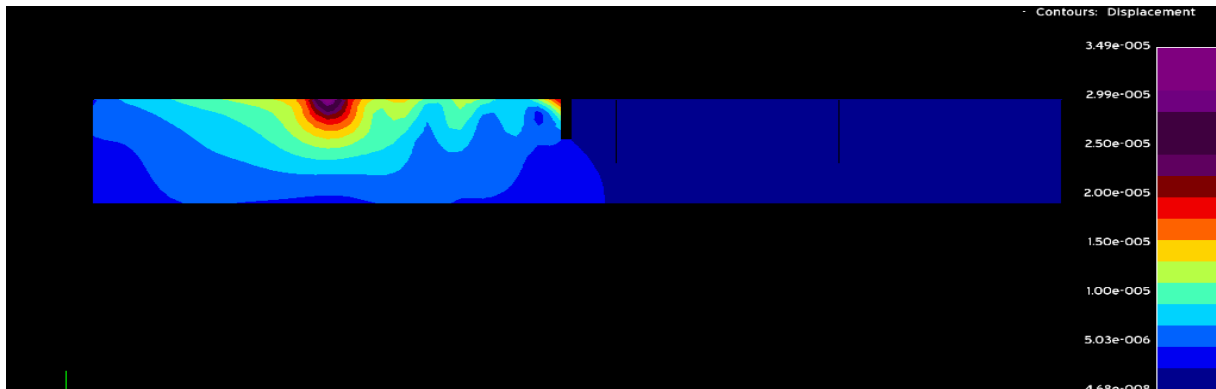
**Εικόνα 4.4.1:** Μέτρο μετατοπίσεων (m) για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 50\text{Hz}$  χωρίς όρυγμα. (Πρόβλημα αναφοράς)



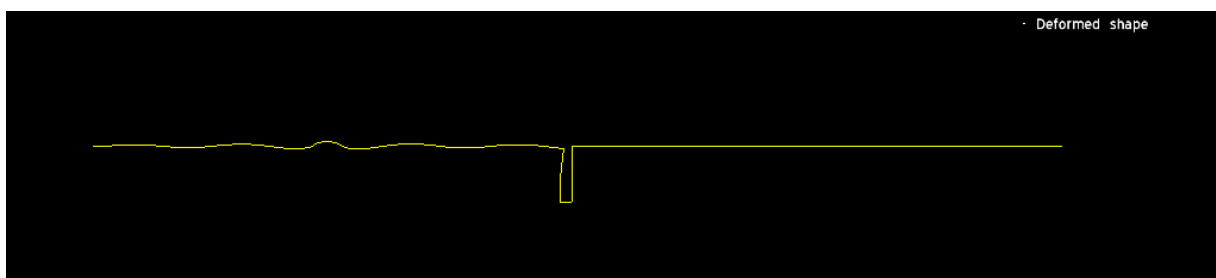
**Εικόνα 4.4.2:** Παραμόρφωση του εδάφους για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 50\text{Hz}$  χωρίς όρυγμα (Πρόβλημα αναφοράς)



**Διάγραμμα 4.4.1:** Μέτρο μετατοπίσεων ( $m$ ) για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 25\text{Hz}$  χωρίς όρυγμα (Πρόβλημα αναφοράς) για  $y = 0$  (ελεύθερη επιφάνεια).

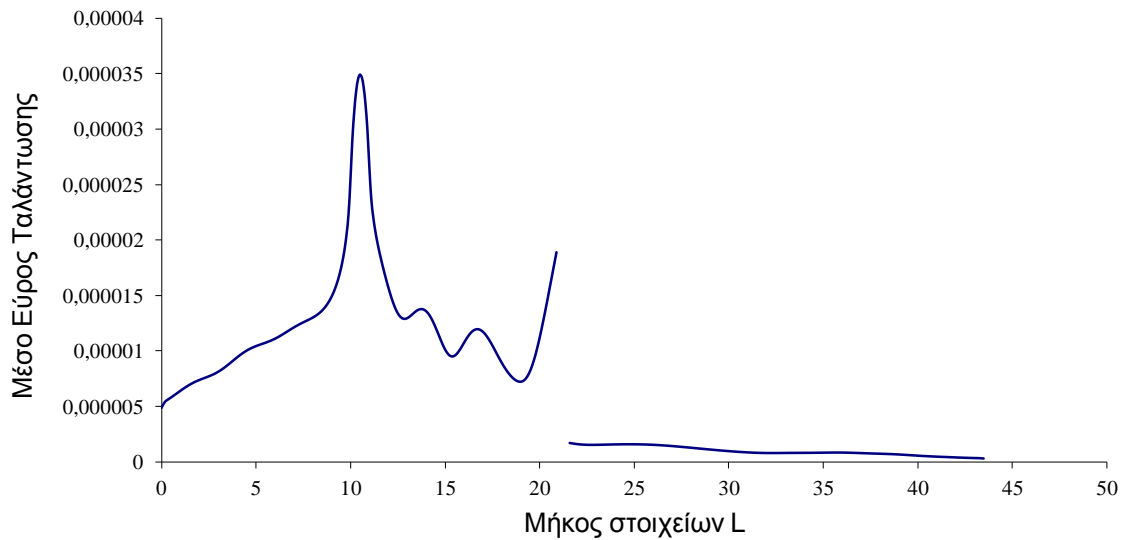


**Εικόνα 4.4.3:** Περίγραμμα μετατοπίσεων για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 50\text{Hz}$  με βάθος ορύγματος  $h = 2,5\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,5\text{m}$

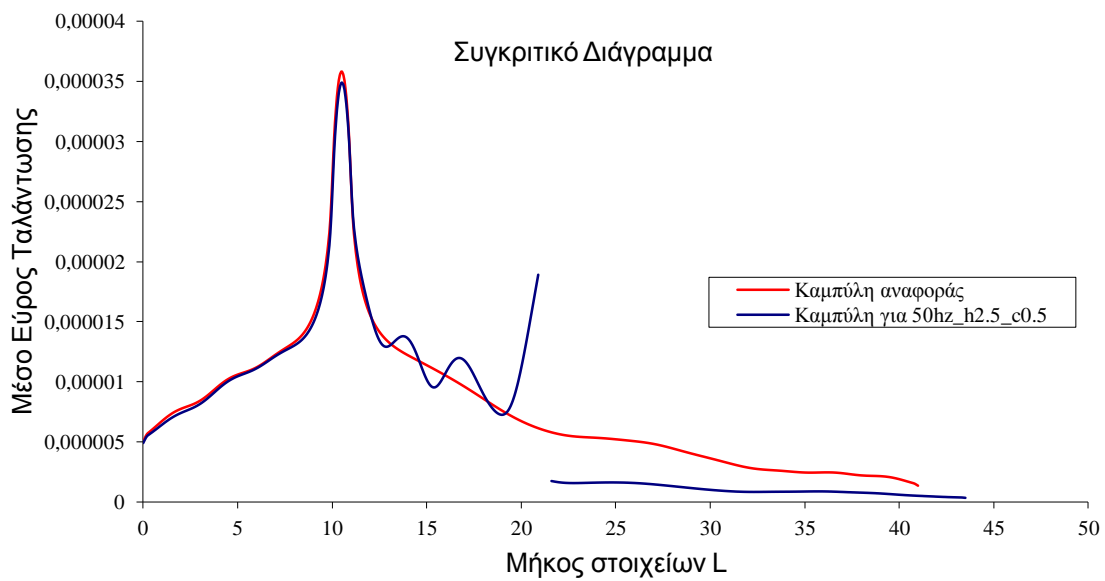


**Εικόνα 4.4.4:** Παραμόρφωση του εδάφους για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 50\text{Hz}$  με βάθος ορύγματος  $h = 2,5\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,5\text{m}$





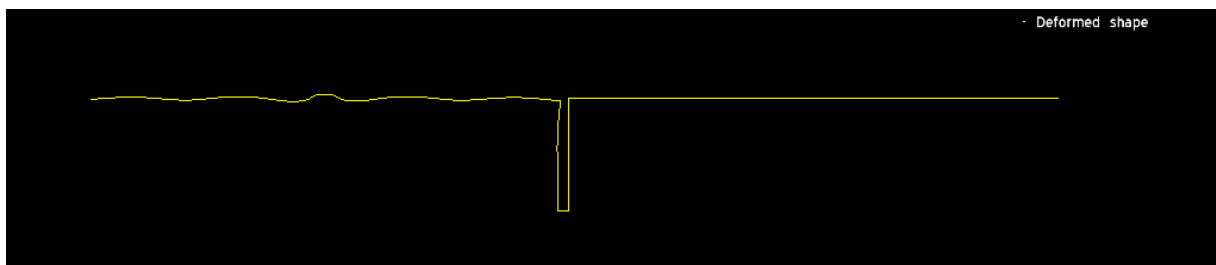
**Διάγραμμα 4.4.2:** Διάγραμμα μεταβολής του συντελεστή μείωσης εύρους σε όλο το μήκος του εδάφους για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 50\text{Hz}$  με βάθος ορύγματος  $h = 2,5\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,5\text{m}$ .



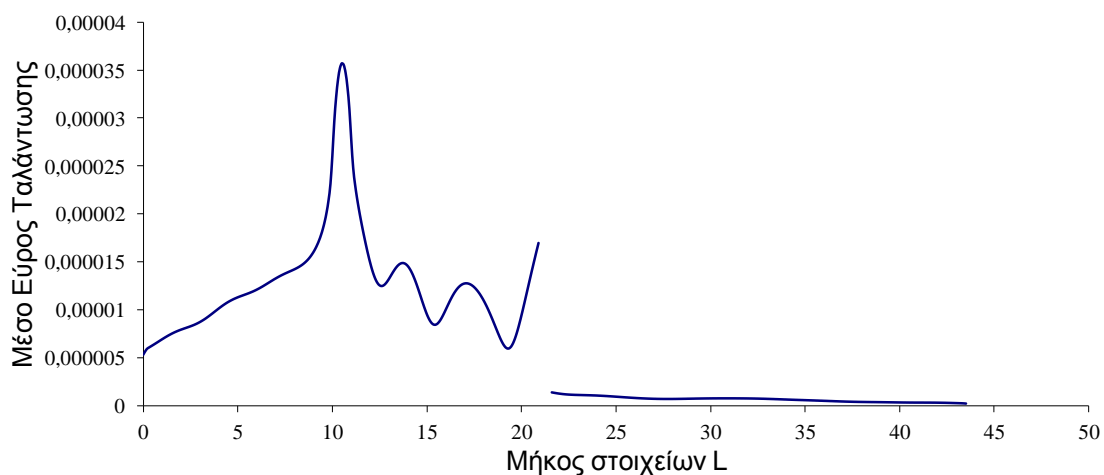
**Διάγραμμα 4.4.3:** Συγκριτικό διάγραμμα για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f=50\text{Hz}$  με βάθος ορύγματος  $h = 2,5\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,5\text{m}$



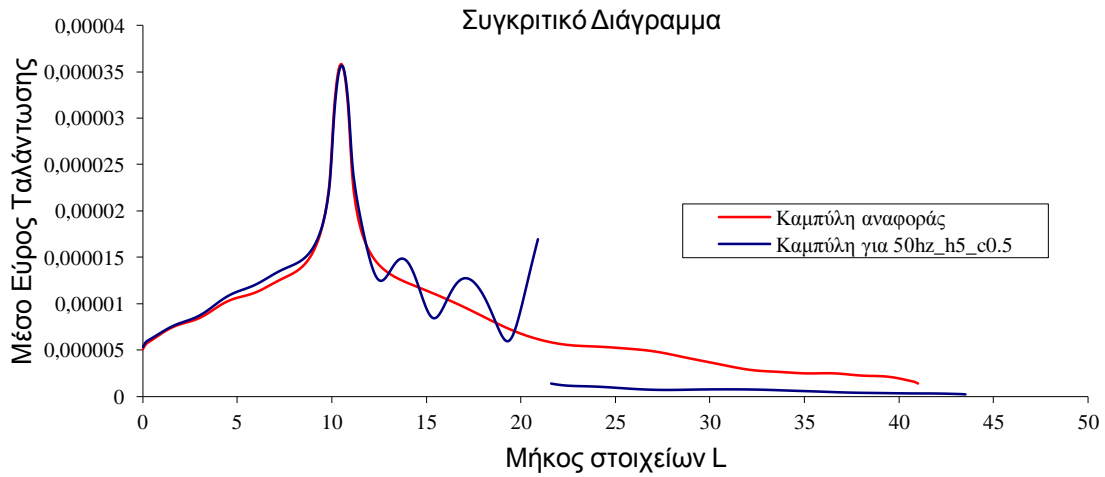
**Εικόνα 4.4.5:** Περίγραμμα μετατοπίσεων για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 50\text{Hz}$  με βάθος ορύγματος  $h = 5\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,5\text{m}$



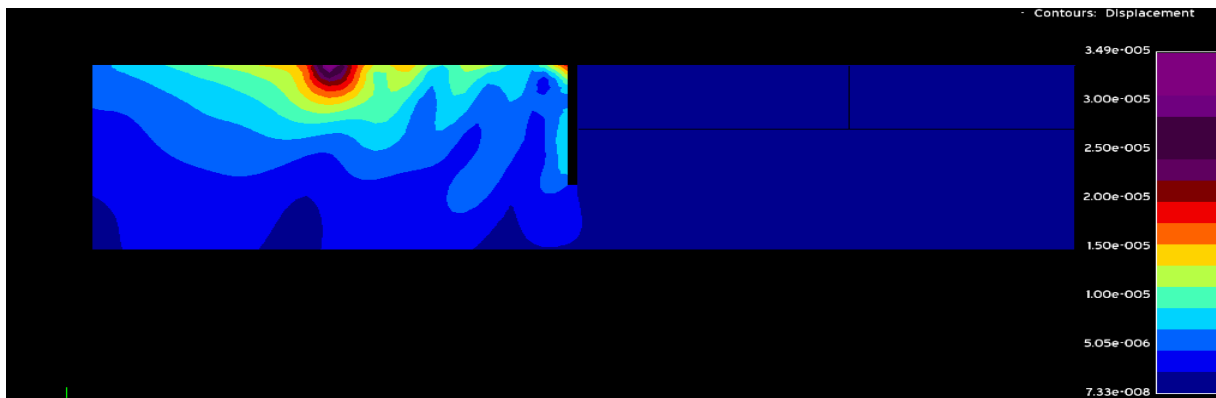
**Εικόνα 4.4.6:** Παραμόρφωση του εδάφους για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 50\text{Hz}$  με βάθος ορύγματος  $h = 5\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,5\text{m}$



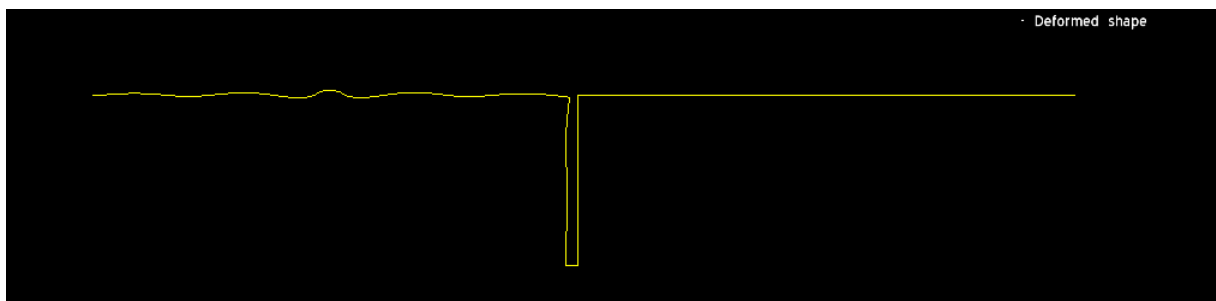
**Διάγραμμα 4.4.4:** Διάγραμμα μεταβολής του συντελεστή μείωσης εύρους σε όλο το μήκος του εδάφους για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 50\text{Hz}$  με βάθος ορύγματος  $h = 5\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,5\text{m}$ .



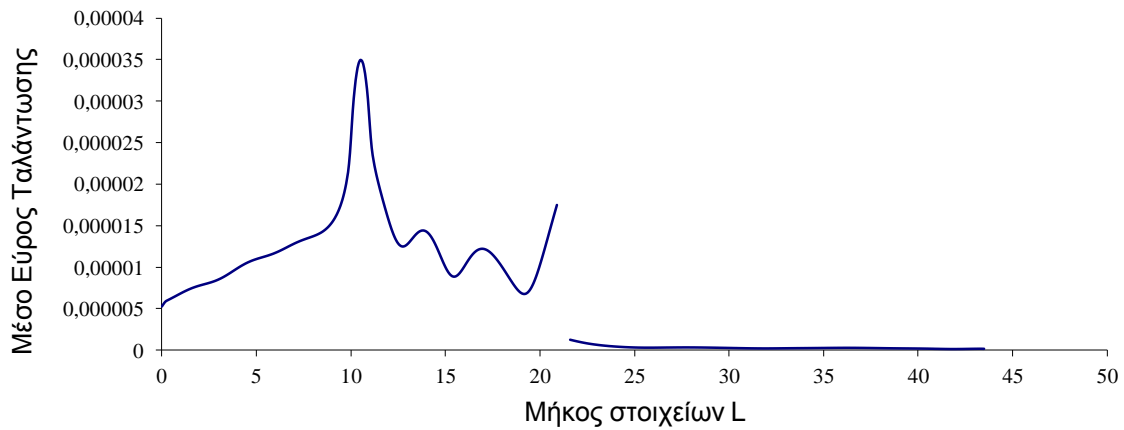
**Διάγραμμα 4.4.5:** Συγκριτικό διάγραμμα για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f=50\text{Hz}$  με βάθος ορύγματος  $h = 5\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,5\text{m}$



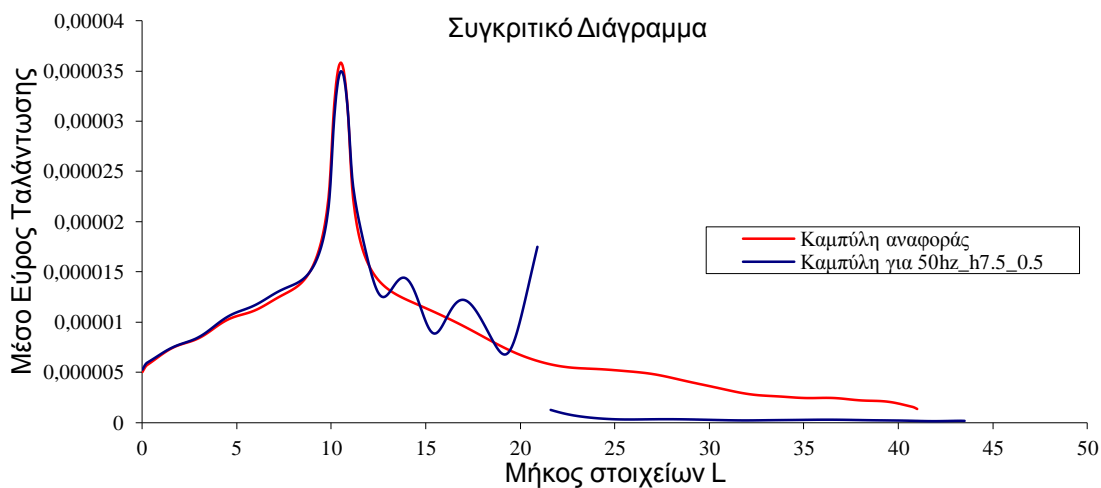
**Εικόνα 4.4.7:** Περίγραμμα μετατοπίσεων για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 50\text{Hz}$  με βάθος ορύγματος  $h = 7,5\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,5\text{m}$



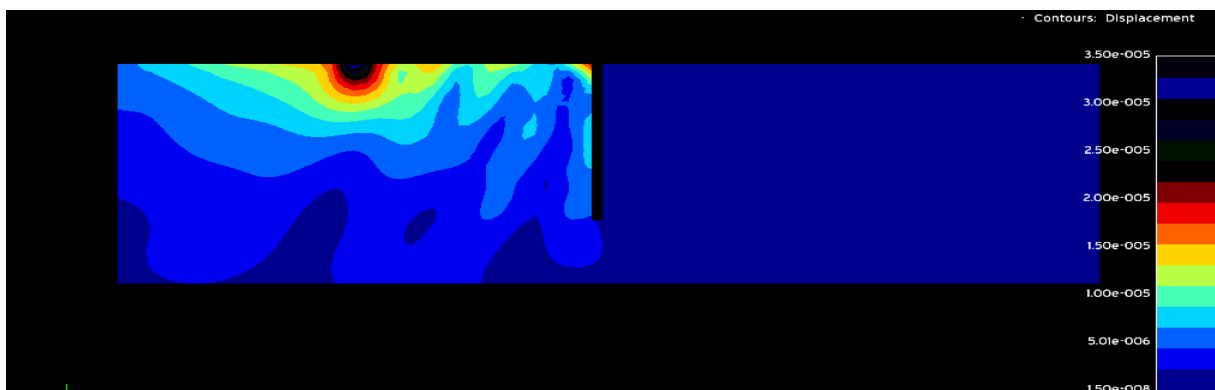
**Εικόνα 4.4.8:** Παραμόρφωση του εδάφους για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 50\text{Hz}$  με βάθος ορύγματος  $h = 7,5\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,5\text{m}$



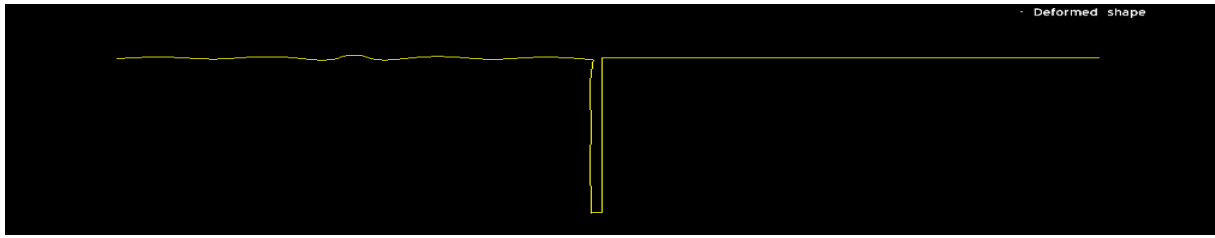
**Διάγραμμα 4.4.6:** Διάγραμμα μεταβολής του συντελεστή μείωσης εύρους σε όλο το μήκος του εδάφους για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 50\text{Hz}$  με βάθος ορύγματος  $h = 7,5\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,5\text{m}$ .



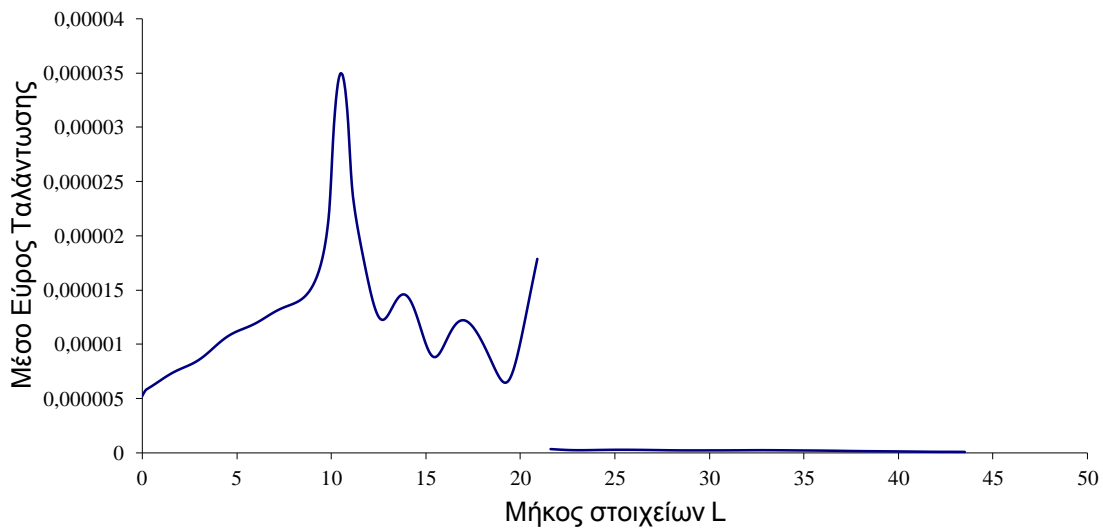
**Διάγραμμα 4.4.7:** Συγκριτικό διάγραμμα για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f=50\text{Hz}$  με βάθος ορύγματος  $h = 7,5\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,5\text{m}$



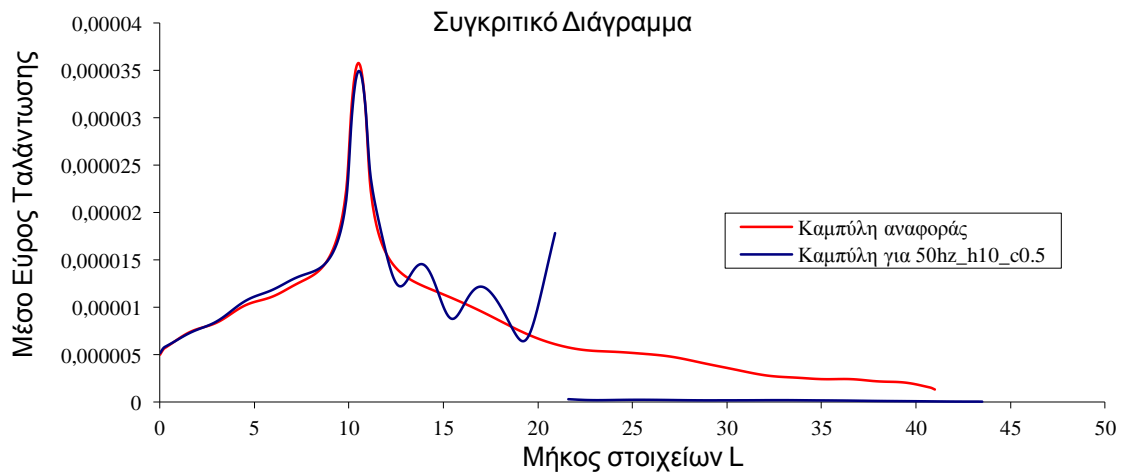
**Εικόνα 4.4.9:** Περίγραμμα μετατοπίσεων για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 50\text{Hz}$  με βάθος ορύγματος  $h = 10\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,5\text{m}$



**Εικόνα 4.4.10:** Παραμόρφωση του εδάφους για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 50\text{Hz}$  με βάθος ορύγματος  $h = 10\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,5\text{m}$



**Διάγραμμα 4.4.8:** Διάγραμμα μεταβολής του συντελεστή μείωσης εύρους σε όλο το μήκος του εδάφους για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 50\text{Hz}$  με βάθος ορύγματος  $h = 10\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,5\text{m}$

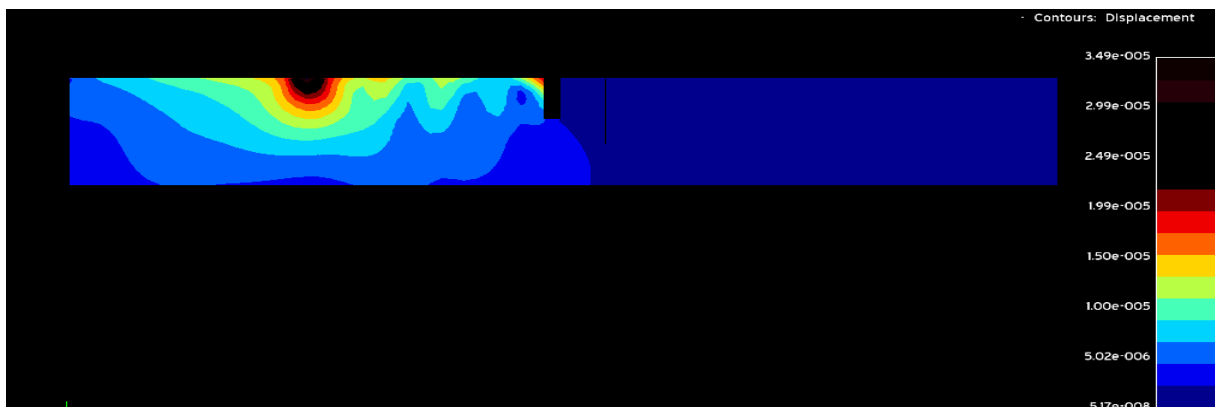


**Διάγραμμα 4.4.9:** Συγκριτικό διάγραμμα για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f=50\text{Hz}$  με βάθος ορύγματος  $h = 10\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,5\text{m}$

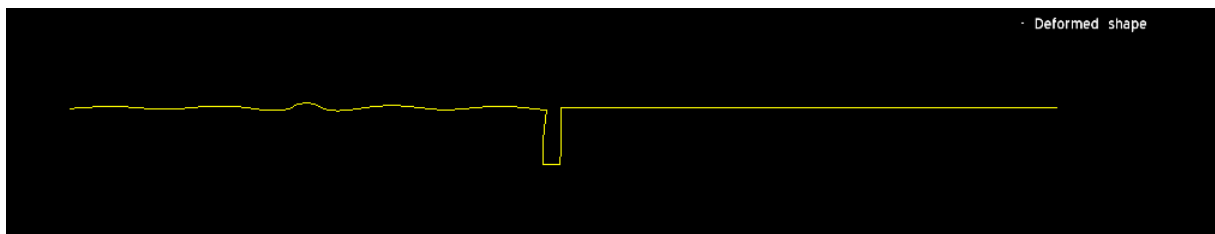
**Πίνακας 4.4.1:** Υπολογισμός του μέσου όρου του εύρους μετατόπισης των διαμήκη κυμάτων με κενό όρυγμα, για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 50\text{Hz}$  με διαφορετικά βάθη ορύγματος ( $h$ ) και με μήκος ορύγματος  $c = 0,5\text{m}$

ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ	ΒΑΘΟΣ ΟΡΥΓΜΑΤΟΣ (H)	ΜΗΚΟΣ ΟΡΥΓΜΑΤΟΣ (c)	ΜΕΣΗ ΜΕΤΑΤΟΠΗΣΗ ΚΥΜΑΤΩΝ ΠΡΟΣΤΑΤΕΥΜΕΝΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ	ΜΕΙΩΣΗ ΤΗΣ ΜΕΣΗΣ ΜΕΤΑΤΟΠΗΣΗΣ ΚΥΜΑΤΩΝ(%)	
50Hz	2,5m	0,5m	8,31101E-07	73,48	3,771166
50Hz	5m	0,5m	6,04754E-07	80,70	5,182636
50Hz	7,5m	0,5m	2,65290E-07	91,54	11,81432
50Hz	10m	0,5m	1,93850E-07	93,82	16,16827
50Hz (χωρίς όρυγμα)	0m	0m	3,13422E-06		1

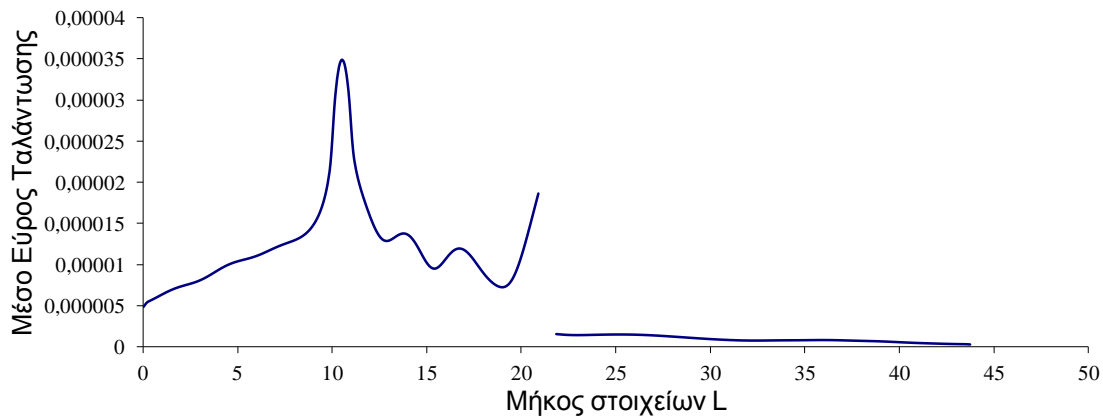
**4.4.2. Αποτελέσματα για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 50\text{Hz}$  με διαφορετικά βάθη ορύγματος και με πλάτος ορύγματος  $c = 0,75\text{m}$ .**



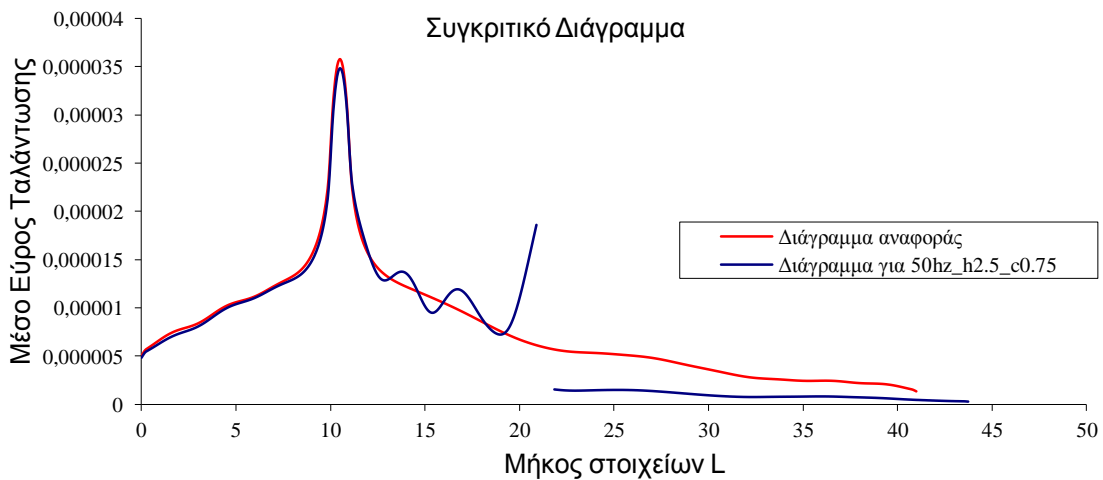
**Εικόνα 4.4.11:** Περίγραμμα μετατοπίσεων για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 50\text{Hz}$  με βάθος ορύγματος  $h = 2,5\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,75\text{m}$



**Εικόνα 4.4.12:** Παραμόρφωση του εδάφους για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 50\text{Hz}$  με βάθος ορύγματος  $h = 2,5\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,75\text{m}$



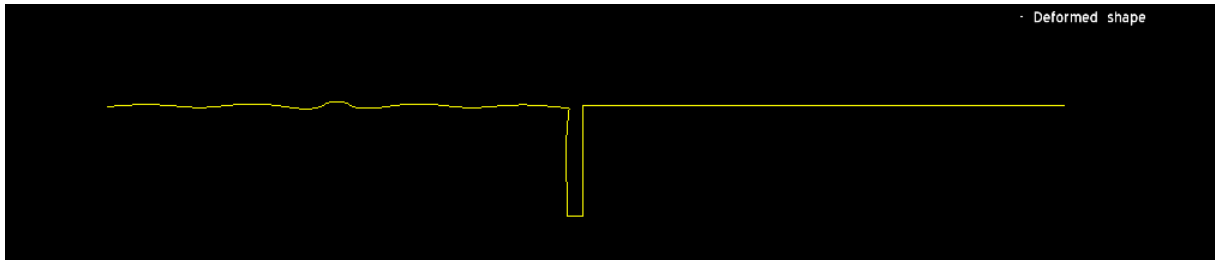
**Διάγραμμα 4.4.10:** Διάγραμμα μεταβολής του συντελεστή μείωσης εύρους σε όλο το μήκος του εδάφους για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 50\text{Hz}$  με βάθος ορύγματος  $h = 2,5\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,75\text{m}$



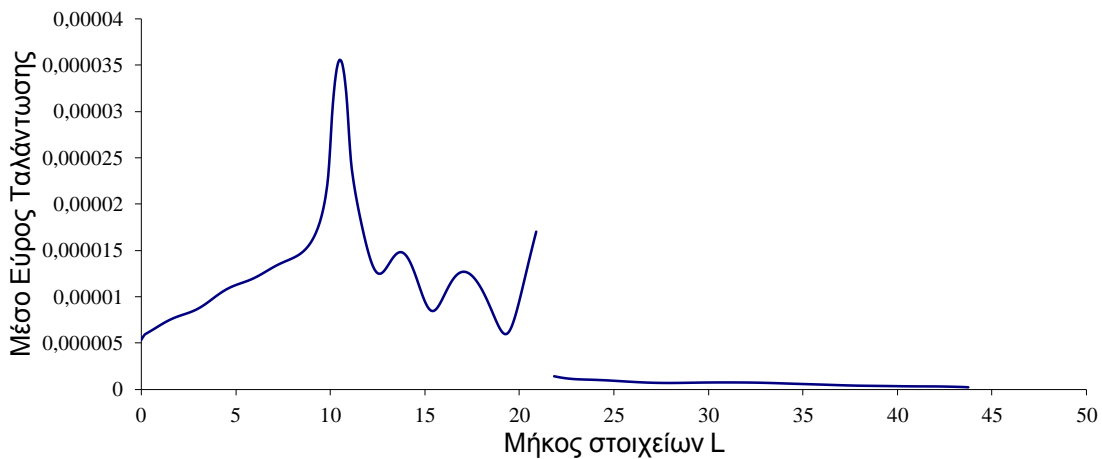
**Διάγραμμα 4.4.11:** Συγκριτικό διάγραμμα για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f=50\text{Hz}$  με βάθος ορύγματος  $h = 2,5\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,75\text{m}$



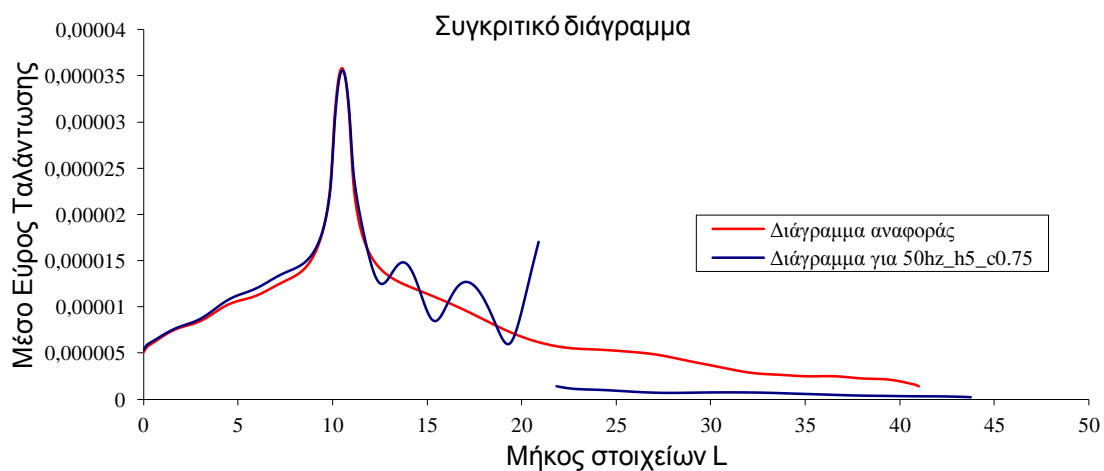
**Εικόνα 4.4.13:** Περίγραμμα μετατοπίσεων για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 50\text{Hz}$  με βάθος ορύγματος  $h = 2,5\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,75\text{m}$



**Εικόνα 4.4.14:** Παραμόρφωση του εδάφους για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 50\text{Hz}$  με βάθος ορύγματος  $h = 5\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,75\text{m}$



**Σχήμα 4.4.12:** Διάγραμμα μεταβολής του συντελεστή μείωσης εύρους σε όλο το μήκος του εδάφους για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 50\text{Hz}$  με βάθος ορύγματος  $h = 5\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,75\text{m}$

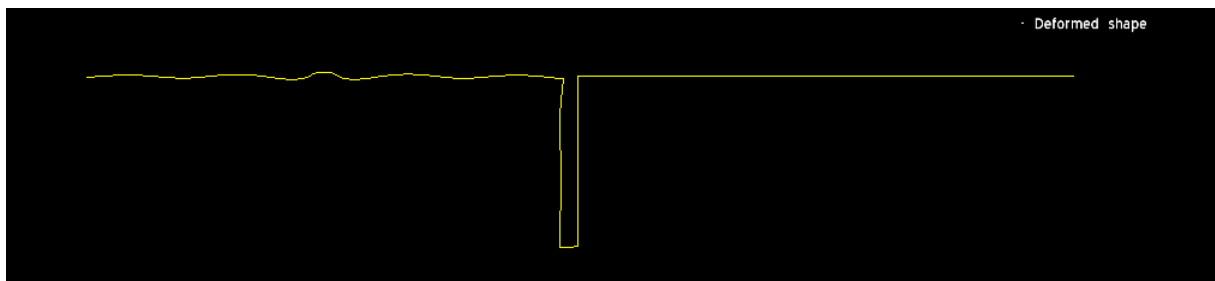


**Διάγραμμα 4.4.13:** Συγκριτικό διάγραμμα για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f=50\text{Hz}$  με βάθος ορύγματος  $h = 5\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,75\text{m}$

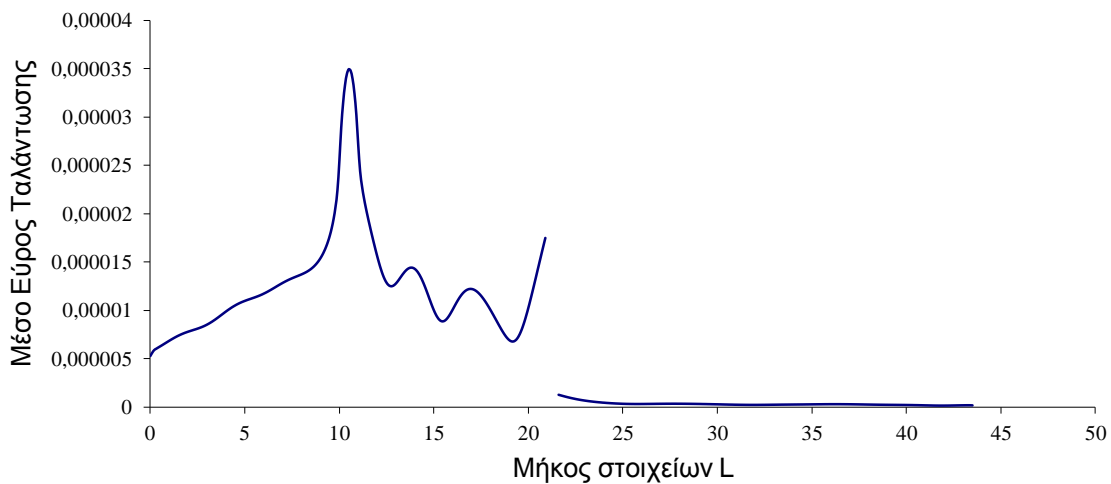




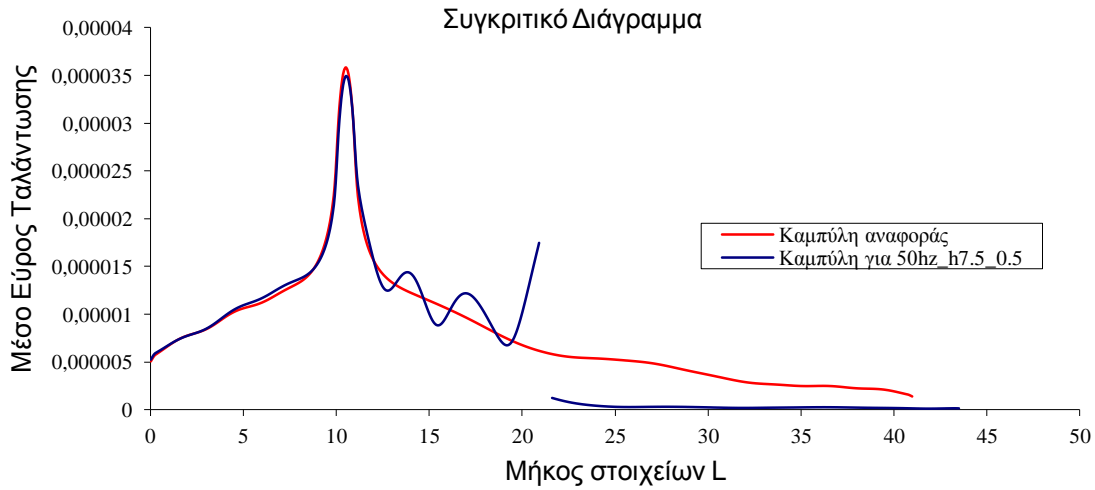
**εικόνα 4.4.15:** Περίγραμμα μετατοπίσεων για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 50\text{Hz}$  με βάθος ορύγματος  $h = 7,5\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,75\text{m}$



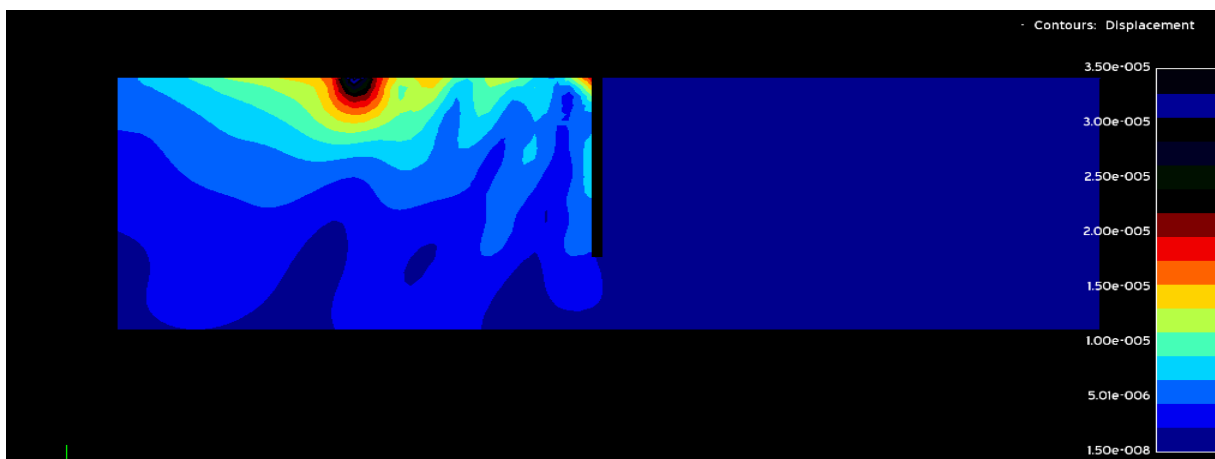
**Εικόνα 4.4.16:** Παραμόρφωση του εδάφους για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 50\text{Hz}$  με βάθος ορύγματος  $h = 7,5\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,75\text{m}$



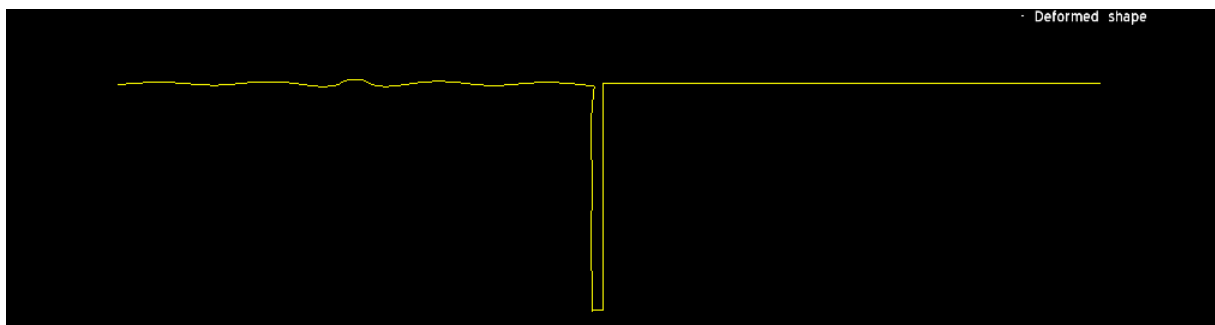
**Διάγραμμα 4.4.14:** Διάγραμμα μεταβολής του συντελεστή μείωσης εύρους σε όλο το μήκος του εδάφους για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 50\text{Hz}$  με βάθος ορύγματος  $h = 7,5\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,75\text{m}$



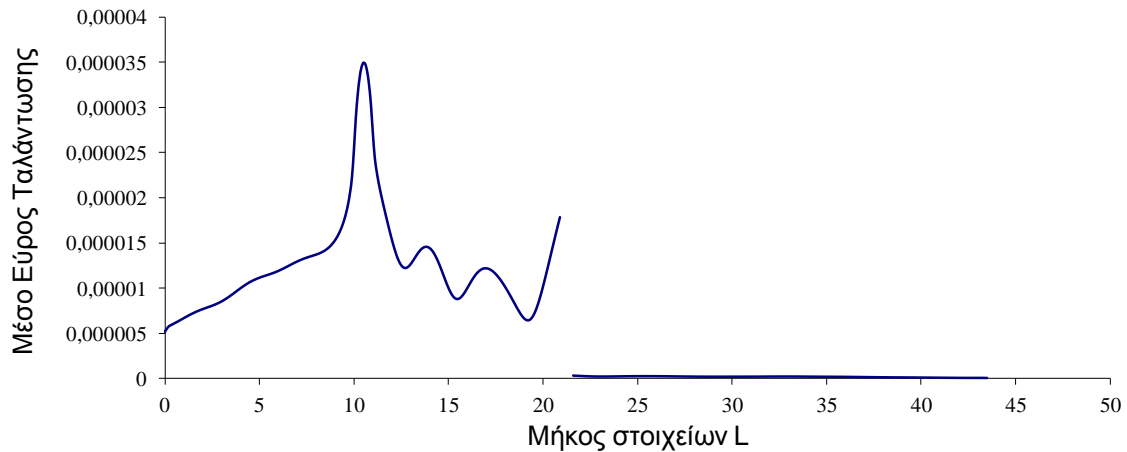
**Διάγραμμα 4.4.15:** Συγκριτικό διάγραμμα για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f=50\text{Hz}$  με βάθος ορύγματος  $h = 7,5\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,75\text{m}$



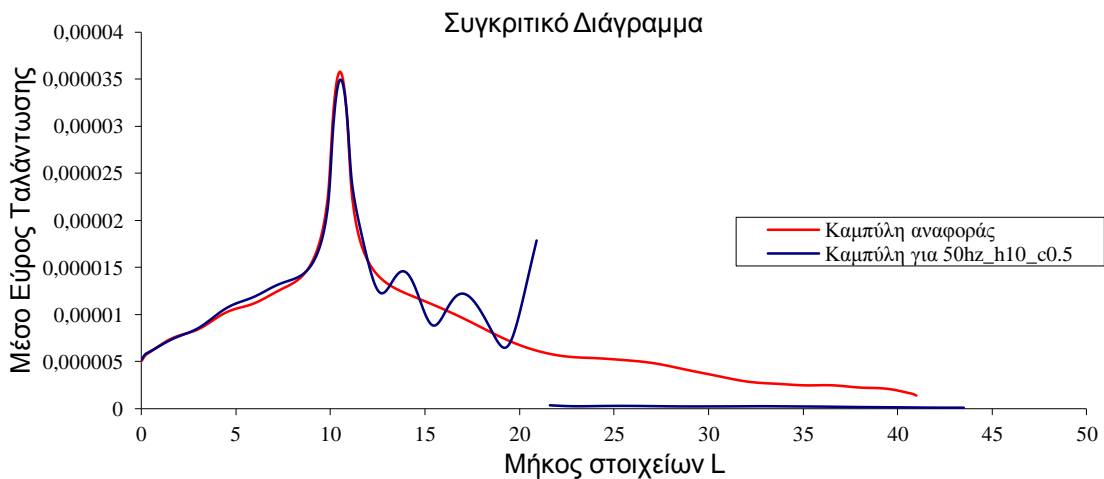
**Εικόνα 4.4.17:** Περίγραμμα μετατοπίσεων για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 50\text{Hz}$  με βάθος ορύγματος  $h = 10\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,75\text{m}$



**Εικόνα 4.4.18:** Παραμόρφωση του εδάφους για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 50\text{Hz}$  με βάθος ορύγματος  $h = 10\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,75\text{m}$



**Διάγραμμα 4.4.16:** Διάγραμμα μεταβολής του συντελεστή μείωσης εύρους σε όλο το μήκος του εδάφους για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 50\text{Hz}$  με βάθος ορύγματος  $h = 10\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,75\text{m}$

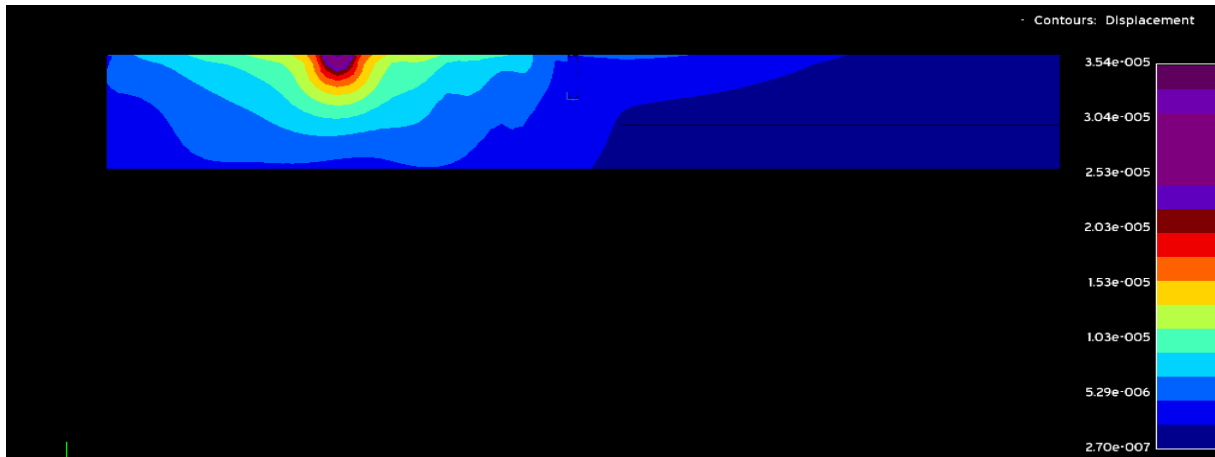


**Διάγραμμα 4.4.17:** Συγκριτικό διάγραμμα για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f=50\text{Hz}$  με βάθος ορύγματος  $h = 10\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,75\text{m}$

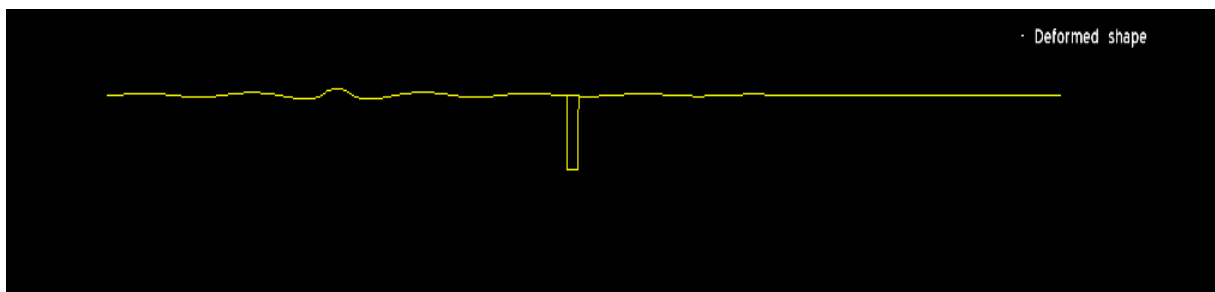
**Πίνακας 4.4.2:** Υπολογισμός του μέσου όρου του εύρους μετατόπισης των διαμήκη κυμάτων με κενό όρυγμα, για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 50\text{Hz}$  με διαφορετικά βάθη ορύγματος ( $h$ ) και με μήκος ορύγματος  $c = 0,75\text{m}$

ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ	ΒΑΘΟΣ ΟΡΥΓΜΑΤΟΣ (H)	ΜΗΚΟΣ ΟΡΥΓΜΑΤΟΣ (c)	ΜΕΣΗ ΜΕΤΑΤΟΠΗΣΗ ΚΥΜΑΤΩΝ ΠΡΟΣΤΑΤΕΥΜΕΝΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ	ΜΕΙΩΣΗ ΤΗΣ ΜΕΣΗΣ ΜΕΤΑΤΟΠΗΣΗΣ ΚΥΜΑΤΩΝ(%)	
50Hz	2,5m	0,75m	8,25670E-07	73,66	3,796E+00
50Hz	5m	0,75m	5,80819E-07	81,47	5,396E+00
50Hz	7,5m	0,75m	2,55854E-07	91,84	1,225E+01
50Hz	10m	0,75m	1,84072E-07	94,13	1,703E+01
50Hz (χωρίς όρυγμα)	0m	0m	3,13422E-06		1

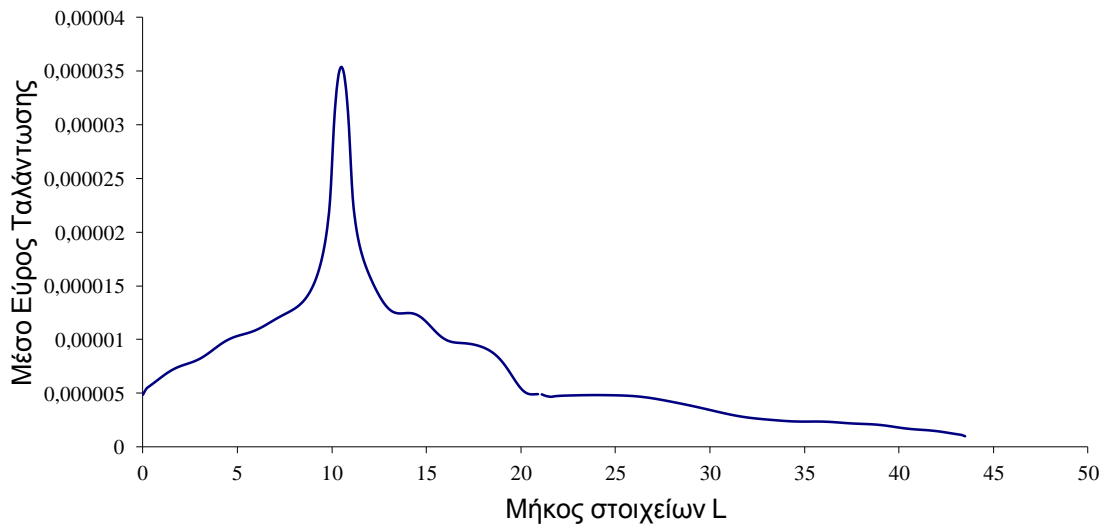
4.4.3. Αποτελέσματα για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 50\text{Hz}$  με διαφορετικά βάθη ορύγματος επικαλυμμένου με σκυρόδεμα και με πλάτος ορύγματος  $c = 0,5\text{m}$ .



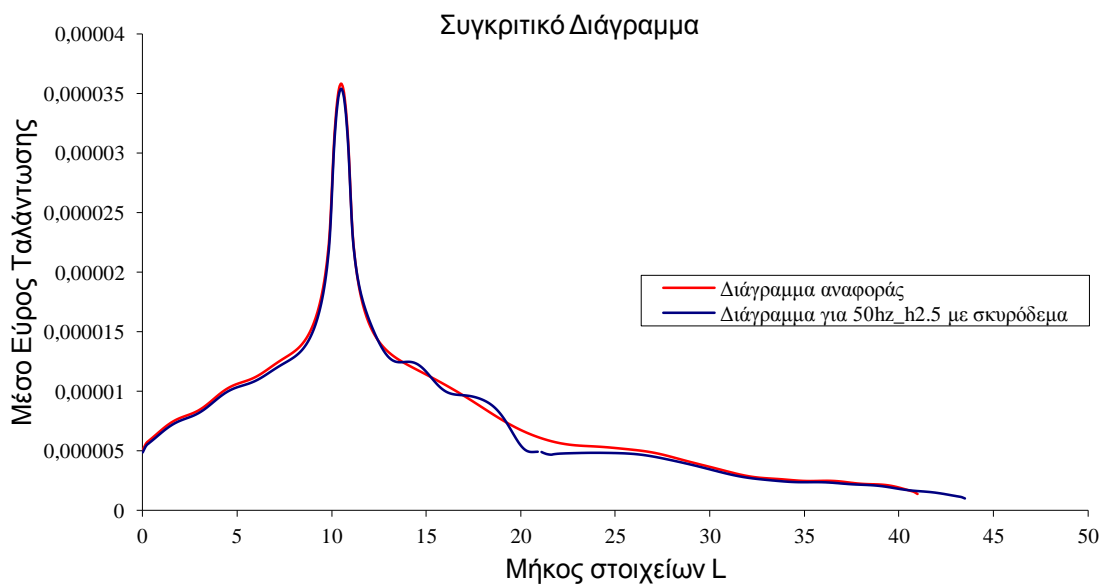
**Εικόνα 4.4.19:** Περίγραμμα μετατοπίσεων για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 50\text{Hz}$  με βάθος επικαλυμμένου με σκυρόδεμα ορύγματος  $h = 2,5\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,5\text{m}$



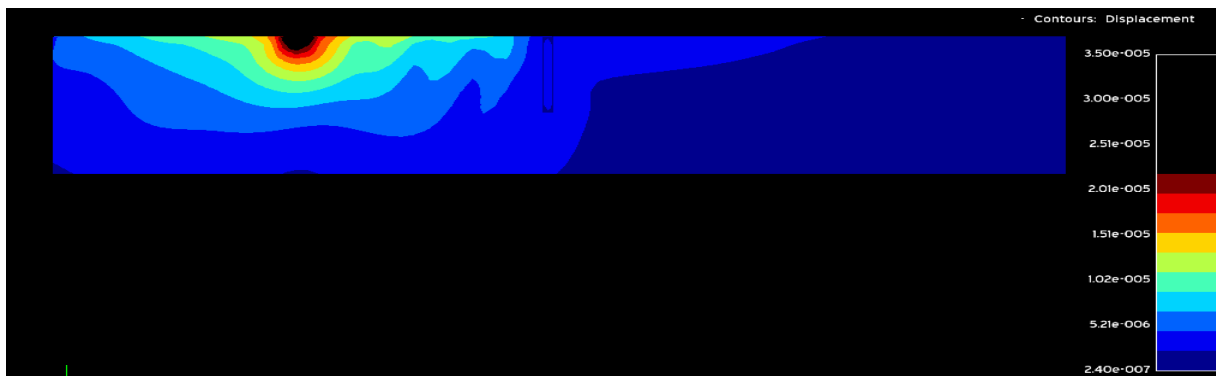
**Εικόνα 4.4.20:** Παραμόρφωση του εδάφους για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 50\text{Hz}$  με βάθος επικαλυμμένου με σκυρόδεμα ορύγματος  $h = 2,5\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,5\text{m}$



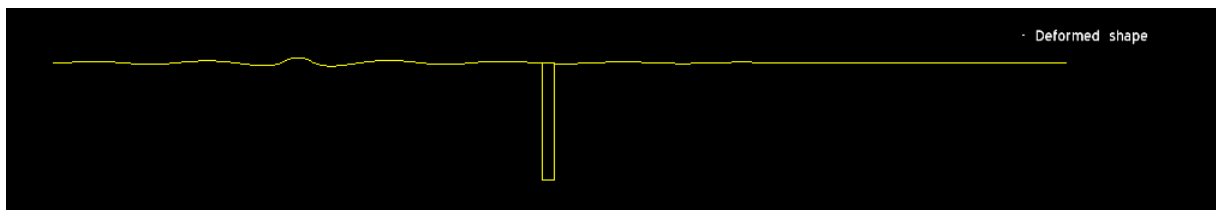
**Διάγραμμα 4.4.18:** Διάγραμμα μεταβολής του συντελεστή μείωσης εύρους σε όλο το μήκος του εδάφους για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 50\text{Hz}$  με βάθος επικαλυμμένου με σκυρόδεμα ορύγματος  $h = 2,5\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,5\text{m}$



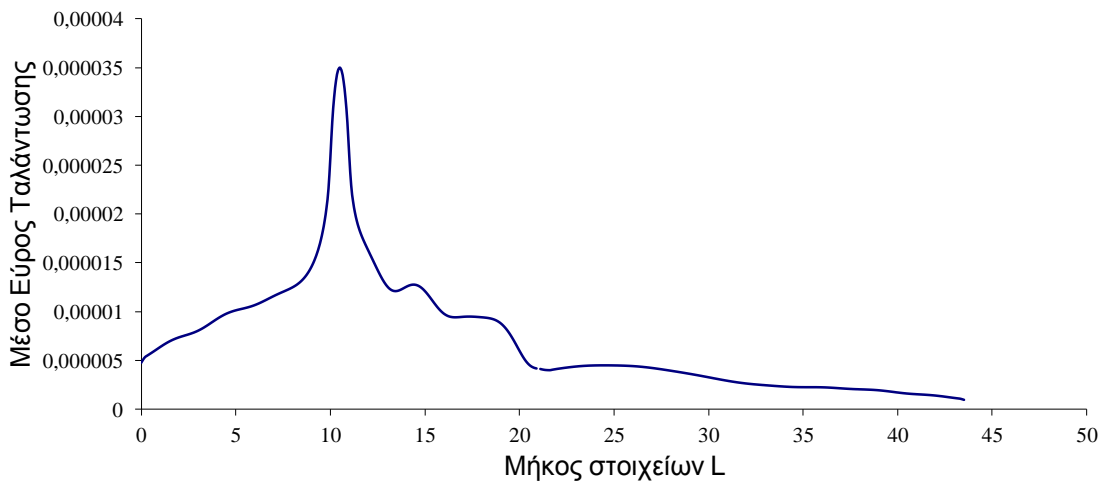
**Διάγραμμα 4.4.19:** Συγκριτικό διάγραμμα για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f=50\text{Hz}$  με βάθος επικαλυμμένου με σκυρόδεμα ορύγματος  $h = 2,5\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,5\text{m}$



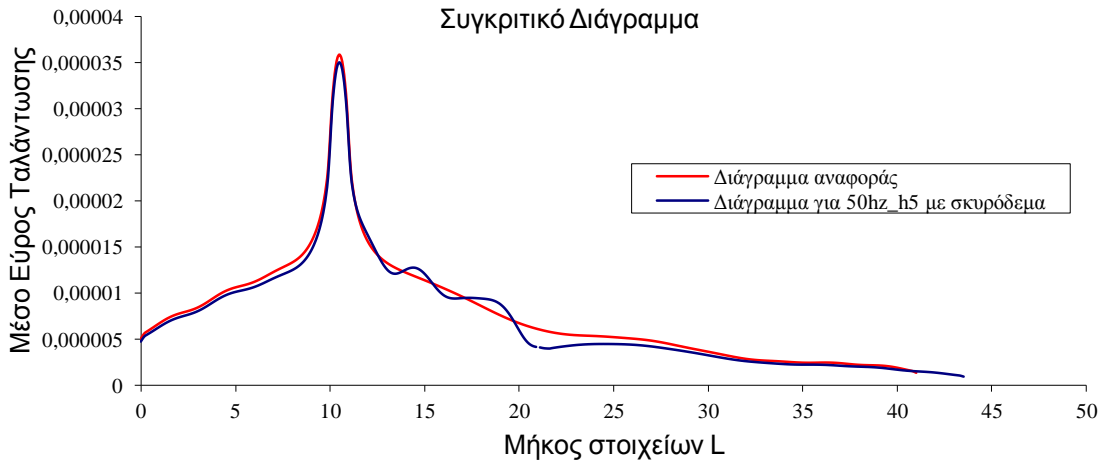
**Εικόνα 4.4.21:** Περίγραμμα μετατοπίσεων για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 50\text{Hz}$  με βάθος επικαλυμμένου με σκυρόδεμα ορύγματος  $h = 5\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,5\text{m}$



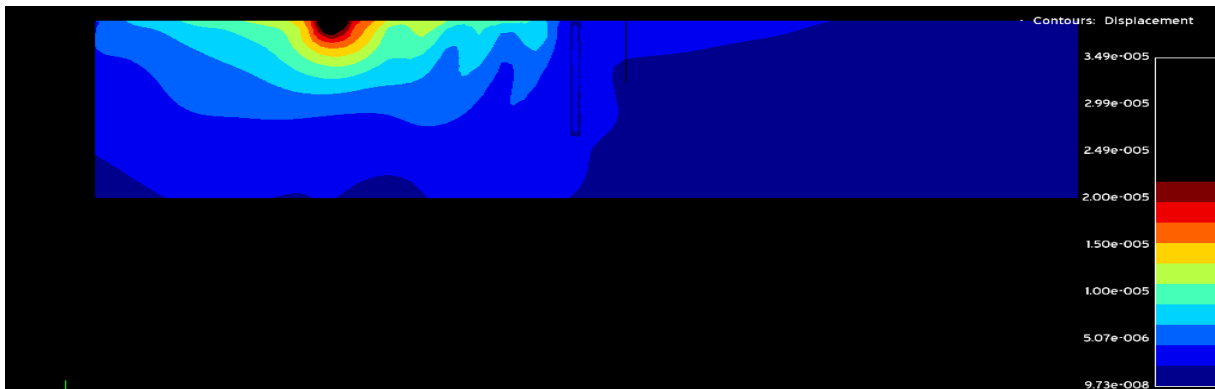
**Εικόνα 4.4.22:** Παραμόρφωση του εδάφους για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 50\text{Hz}$  με βάθος επικαλυμμένου με σκυρόδεμα ορύγματος  $h = 5\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,5\text{m}$



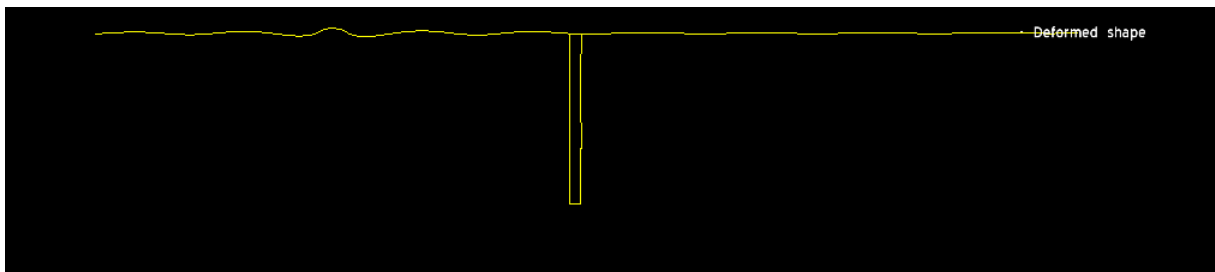
**Διάγραμμα 4.4.20:** Διάγραμμα μεταβολής του συντελεστή μείωσης εύρους σε όλο το μήκος του εδάφους για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 50\text{Hz}$  με βάθος επικαλυμμένου με σκυρόδεμα ορύγματος  $h = 5\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,5\text{m}$



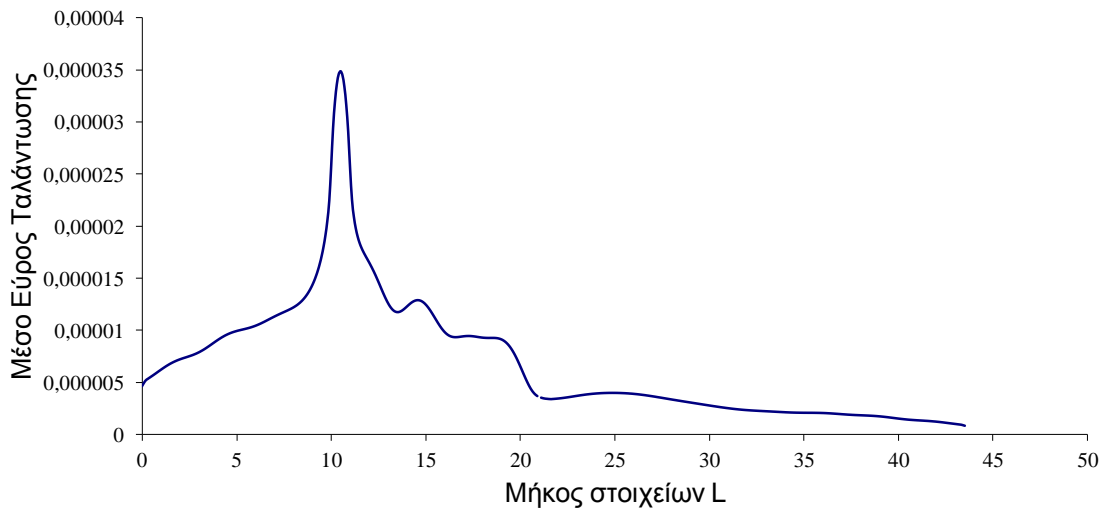
**Διάγραμμα 4.4.21:** Συγκριτικό διάγραμμα για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f=50\text{Hz}$  με βάθος επικαλυμμένου με σκυρόδεμα ορύγματος  $h = 5\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,5\text{m}$



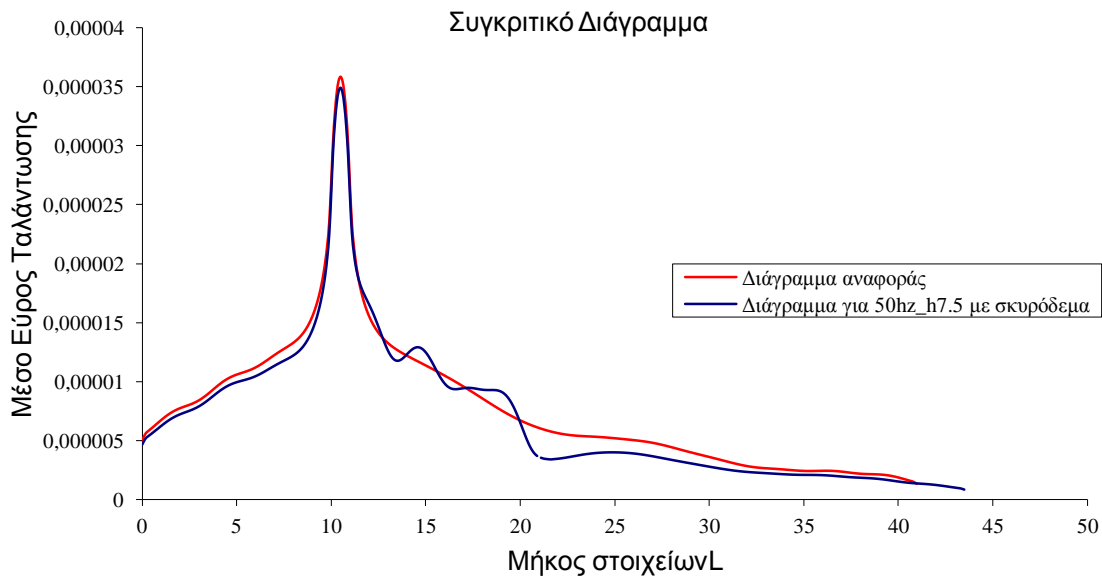
**Εικόνα 4.4.23:** Περίγραμμα μετατοπίσεων για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 50\text{Hz}$  με βάθος επικαλυμμένου με σκυρόδεμα ορύγματος  $h = 7,5\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,5\text{m}$



**Εικόνα 4.4.24:** Παραμόρφωση του εδάφους για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 50\text{Hz}$  με βάθος επικαλυμμένου με σκυρόδεμα ορύγματος  $h = 7,5\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,5\text{m}$

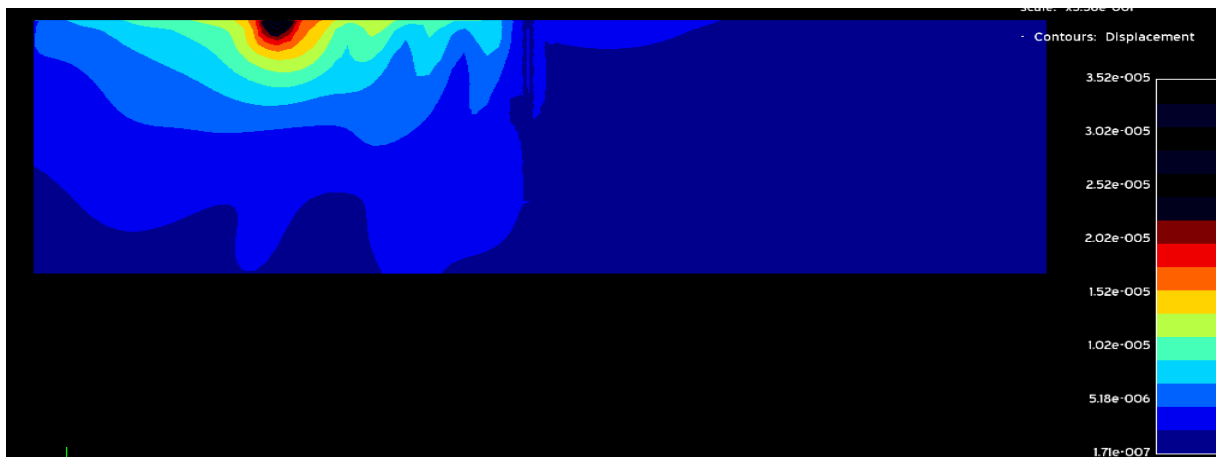


**Διάγραμμα 4.4.22:** Διάγραμμα μεταβολής του συντελεστή μείωσης εύρους σε όλο το μήκος του εδάφους για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 50\text{Hz}$  με βάθος επικαλυμμένου με σκυρόδεμα ορύγματος  $h = 7,5\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,5\text{m}$

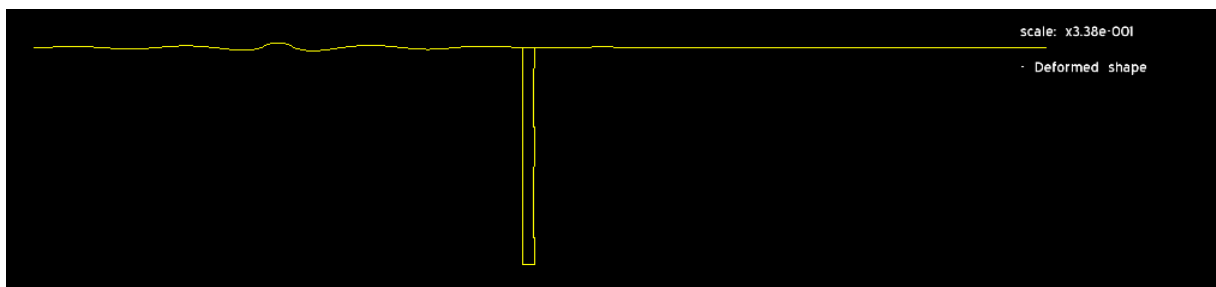


**Διάγραμμα 4.4.23:** Συγκριτικό διάγραμμα για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f=50\text{Hz}$  με βάθος επικαλυμμένου με σκυρόδεμα ορύγματος  $h = 7,5\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,5\text{m}$

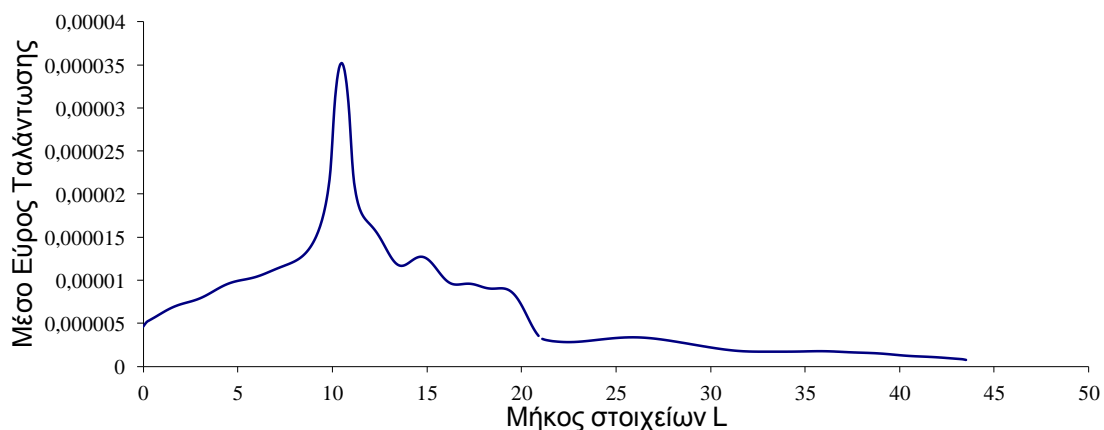




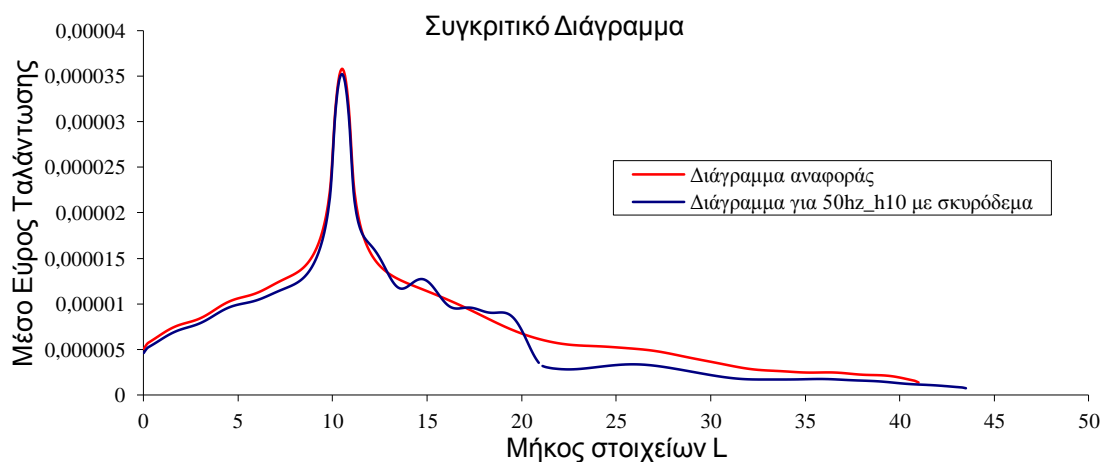
**Εικόνα 4.4.25:** Περίγραμμα μετατοπίσεων για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 50\text{Hz}$  με βάθος επικαλυμμένου με σκυρόδεμα ορύγματος  $h = 10\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,5\text{m}$



**Εικόνα 4.4.26:** Παραμόρφωση του εδάφους για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 50\text{Hz}$  με βάθος επικαλυμμένου με σκυρόδεμα ορύγματος  $h = 10\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,5\text{m}$



**Διάγραμμα 4.4.24:** Διάγραμμα μεταβολής του συντελεστή μείωσης εύρους σε όλο το μήκος του εδάφους για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 50\text{Hz}$  με βάθος επικαλυμμένου με σκυρόδεμα ορύγματος  $h = 10\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,5\text{m}$



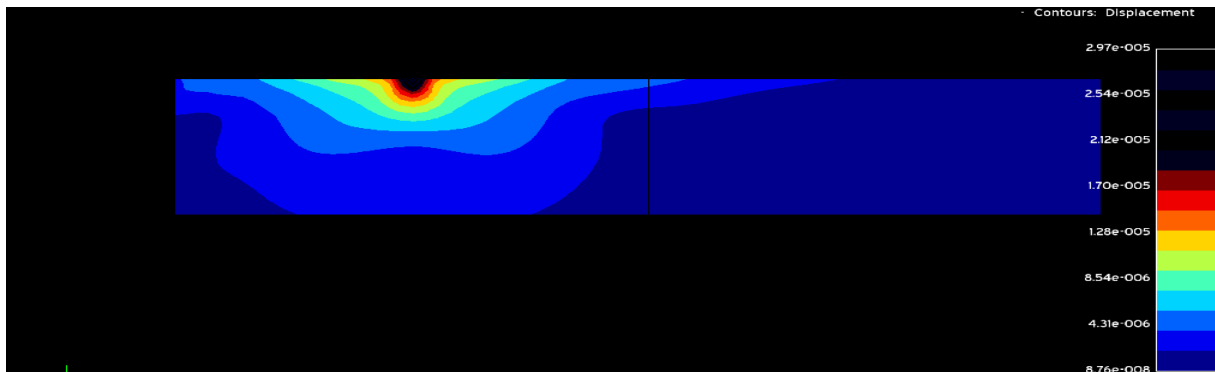
**Διάγραμμα 4.4.25:** Συγκριτικό διάγραμμα για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f=50\text{Hz}$  με βάθος επικαλυμμένου με σκυρόδεμα ορύγματος  $h = 10\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,5\text{m}$

**Πίνακας 4.4.1:** Υπολογισμός του μέσου όρου του εύρους μετατόπισης των διαμήκη κυμάτων επικαλυμμένου με σκυρόδεμα ορύγματος, για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 50\text{Hz}$  με διαφορετικά βάθη ορύγματος ( $h$ ) και με μήκος ορύγματος  $c = 0,75\text{m}$

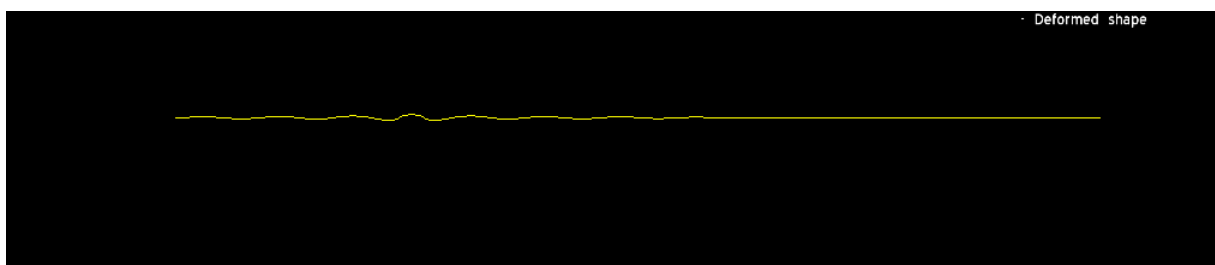
ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ	ΒΑΘΟΣ ΟΡΥΓΜΑΤΟΣ (H)	ΜΗΚΟΣ ΟΡΥΓΜΑΤΟΣ (c)	ΜΕΣΗ ΜΕΤΑΤΟΠΗΣΗ ΚΥΜΑΤΩΝ ΠΡΟΣΤΑΤΕΥΜΕΝΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ	ΜΕΙΩΣΗ ΤΗΣ ΜΕΣΗΣ ΜΕΤΑΤΟΠΗΣΗΣ ΚΥΜΑΤΩΝ(%)	
50Hz	2,5m	0,5m	2,52240E-06	19,52	1,242555
50Hz	5m	0,5m	2,33822E-06	25,40	1,34043
50Hz	7,5m	0,5m	2,05419E-06	34,46	1,525769
50Hz	10m	0,5m	1,69736E-06	45,84	1,846526
50Hz (χωρίς ορύγμα)	0m	0m	3,13422E-06		1

#### 4.5. Επίλυση του προβλήματος με το πρόγραμμα ISOBEM για συχνότητα αρμονικής δύναμη 75Hz

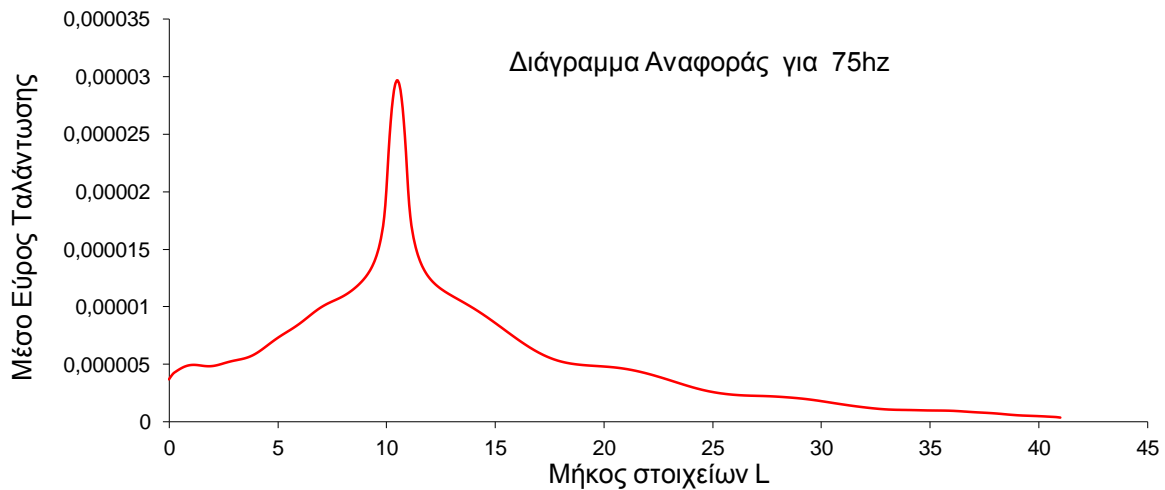
##### 4.5.1. Αποτελέσματα για συχνότητα αρμονικής δύναμης $f = 75\text{Hz}$ με διαφορετικά βάθη ορύγματος και με πλάτος ορύγματος $c = 0,5\text{m}$ .



**Εικόνα 4.5.1:** Μέτρο μετατοπίσεων (m) για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 75\text{Hz}$  χωρίς όρυγμα. (Πρόβλημα αναφοράς)



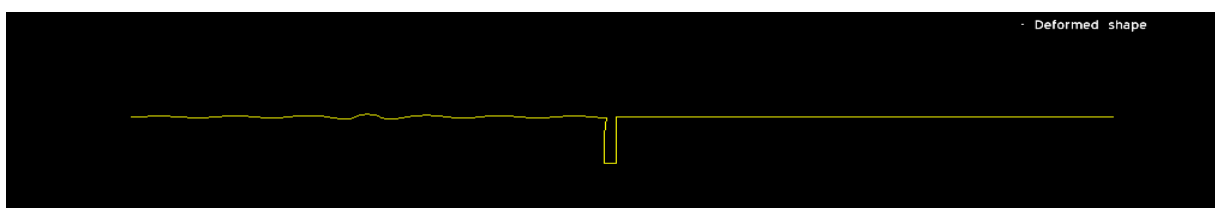
**Εικόνα 4.5.2:** Παραμόρφωση του εδάφους για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 75\text{Hz}$  χωρίς όρυγμα (Πρόβλημα αναφοράς)



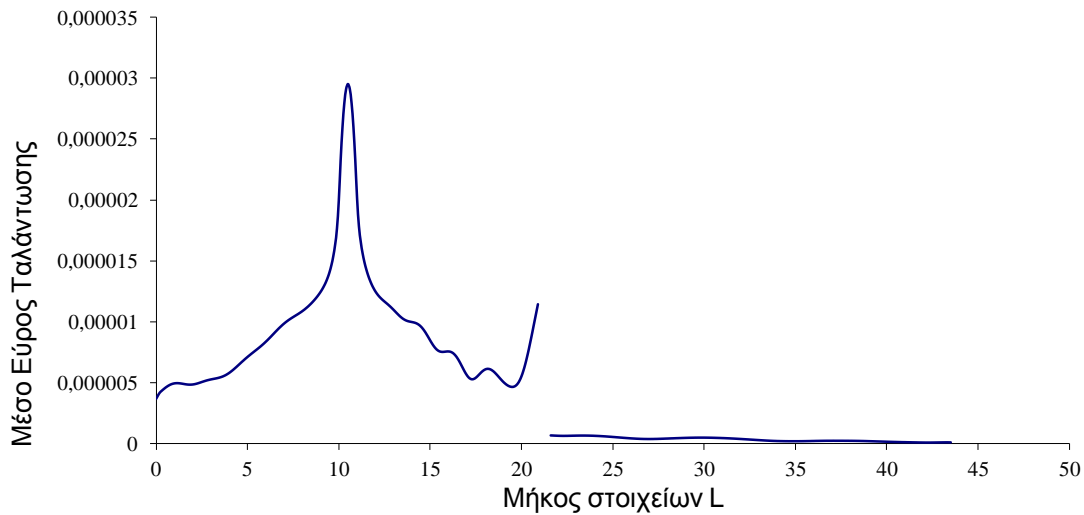
**Διάγραμμα 4.5.1:** Μέτρο μετατοπίσεων (m) για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 75\text{Hz}$  χωρίς όρυγμα (Πρόβλημα αναφοράς) για  $y = 0$  (ελεύθερη επιφάνεια).



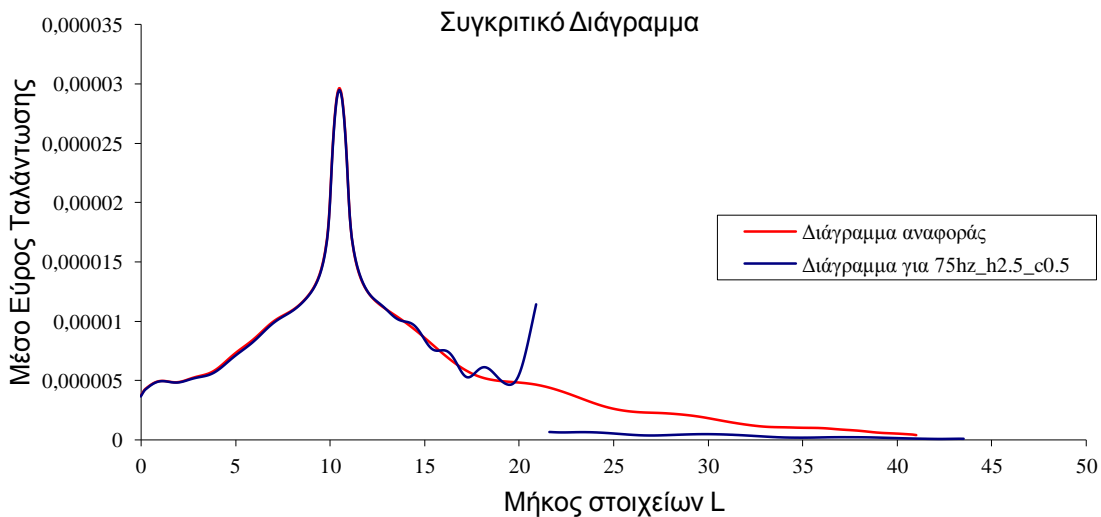
**Εικόνα 4.5.3:** Περίγραμμα μετατοπίσεων για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 75\text{Hz}$  με βάθος ορύγματος  $h = 2,5\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,5\text{m}$



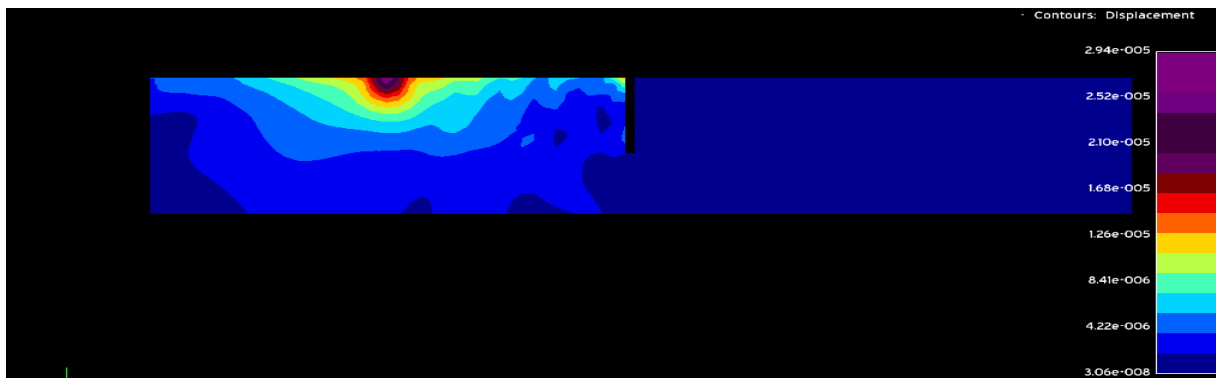
**Εικόνα 4.5.4:** Παραμόρφωση του εδάφους για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 75\text{Hz}$  με βάθος ορύγματος  $h = 2,5\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,5\text{m}$



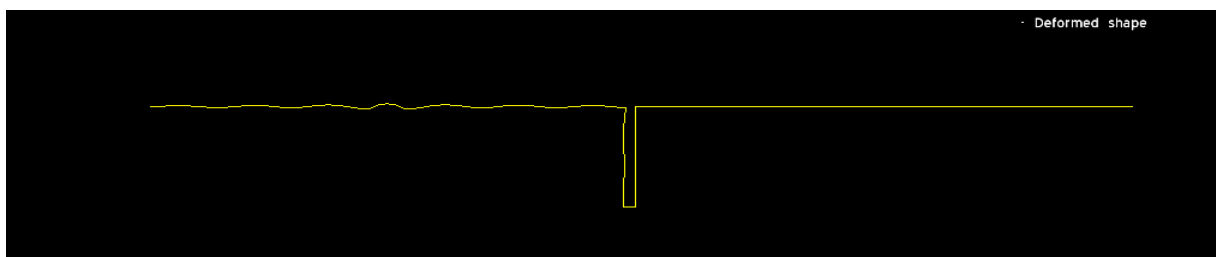
**Διάγραμμα 4.5.2:** Διάγραμμα μεταβολής του συντελεστή μείωσης εύρους σε όλο το μήκος του εδάφους για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 75\text{Hz}$  με βάθος ορύγματος  $h = 2,5\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,5\text{m}$



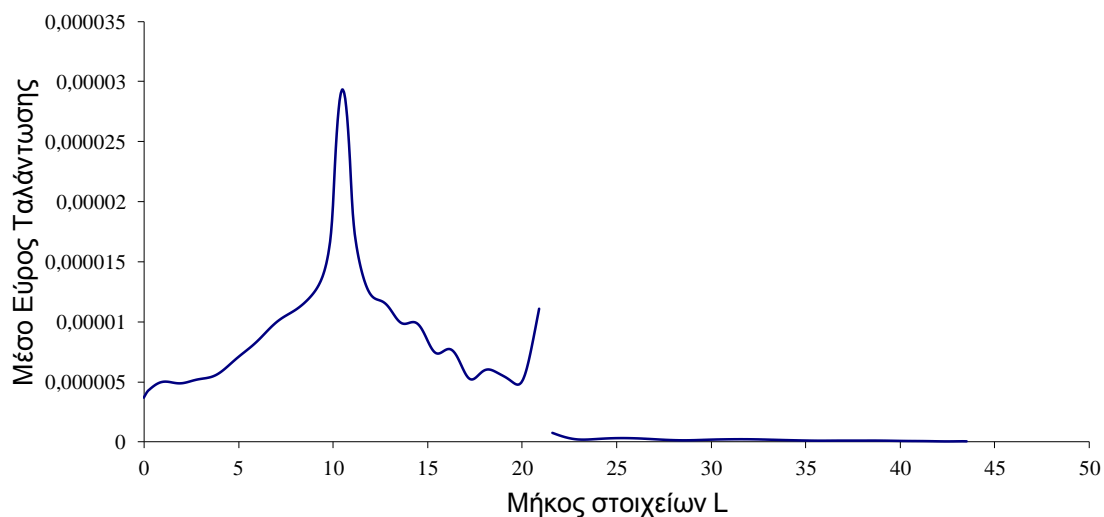
**Διάγραμμα 4.5.3:** Συγκριτικό διάγραμμα για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f=50\text{Hz}$  με βάθος ορύγματος  $h = 2,5\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,5\text{m}$



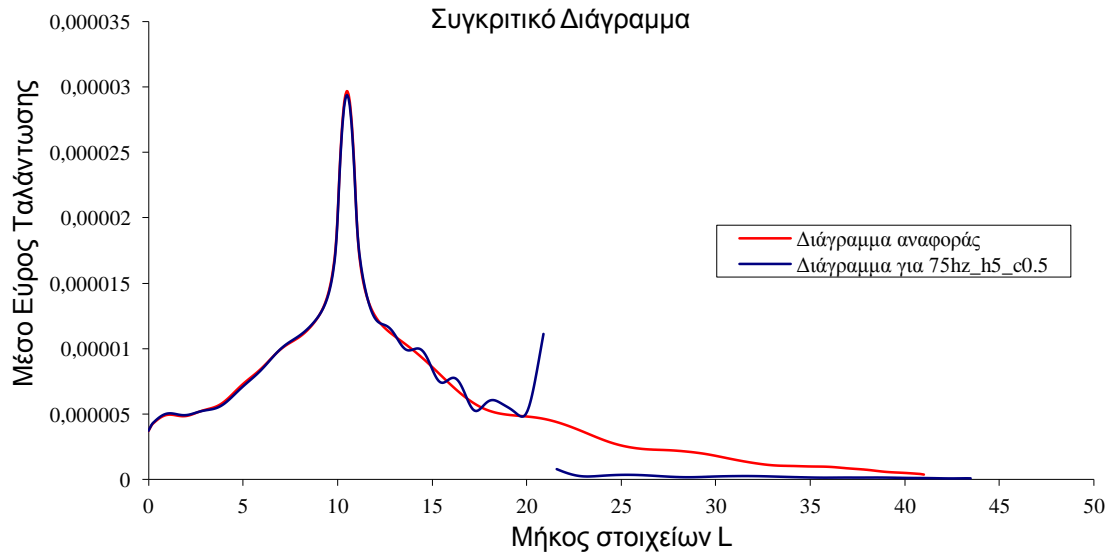
**Εικόνα 4.5.5:** Περίγραμμα μετατοπίσεων για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 75\text{Hz}$  με βάθος ορύγματος  $h = 5\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,5\text{m}$



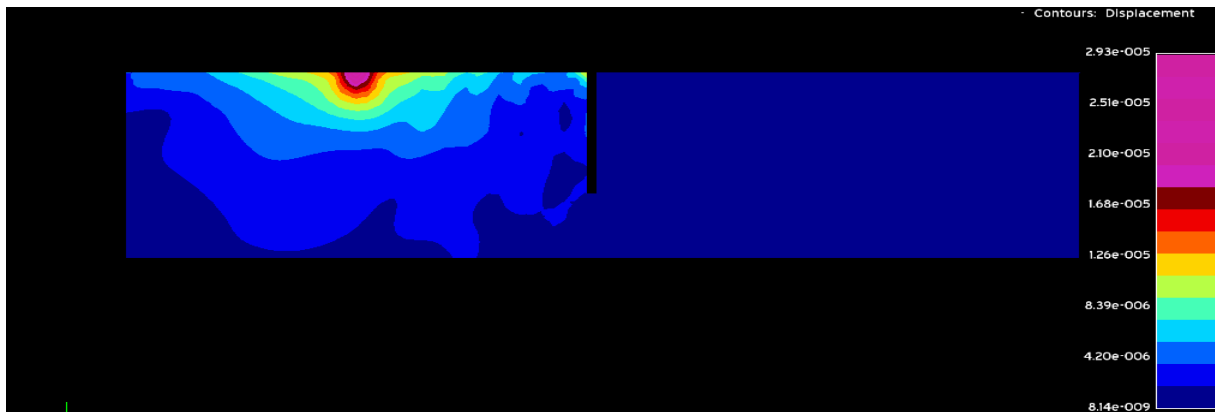
**Σχήμα 4.5.6:** Παραμόρφωση του εδάφους για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 75\text{Hz}$  με βάθος ορύγματος  $h = 5\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,5\text{m}$



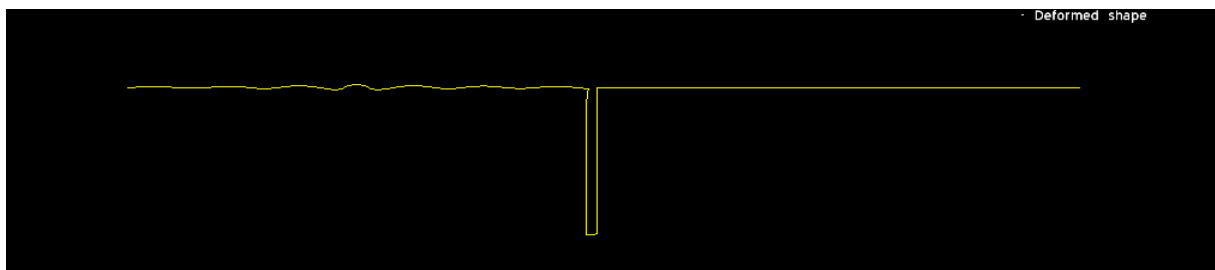
**Διάγραμμα 4.5.4:** Διάγραμμα μεταβολής του συντελεστή μείωσης εύρους σε όλο το μήκος του εδάφους για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 75\text{Hz}$  με βάθος ορύγματος  $h = 5\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,5\text{m}$



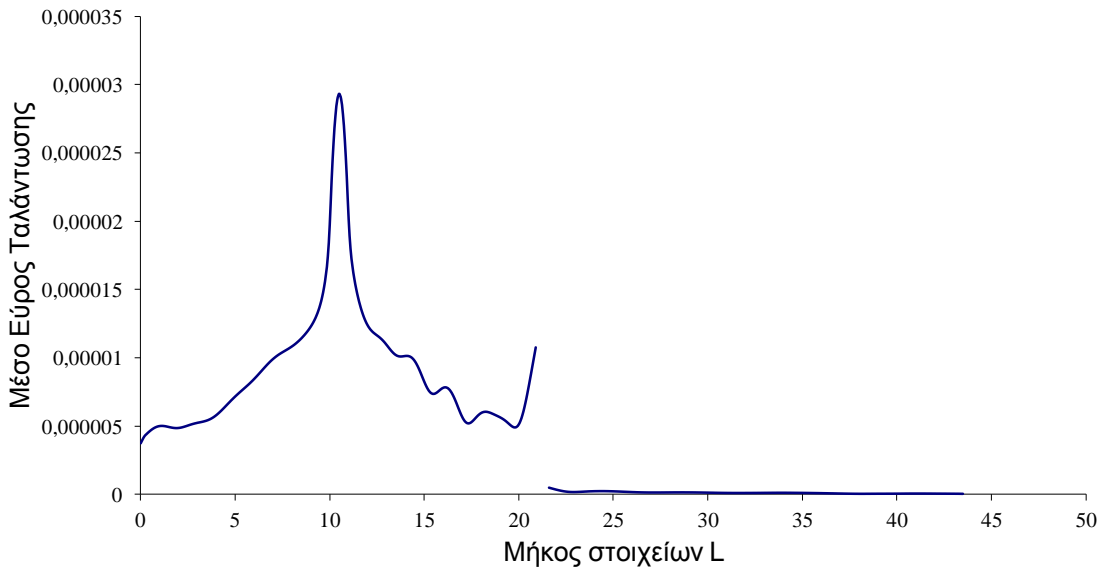
**Διάγραμμα 4.5.5:** Συγκριτικό διάγραμμα για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f=50\text{Hz}$  με βάθος ορύγματος  $h=5\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c=0,5\text{m}$



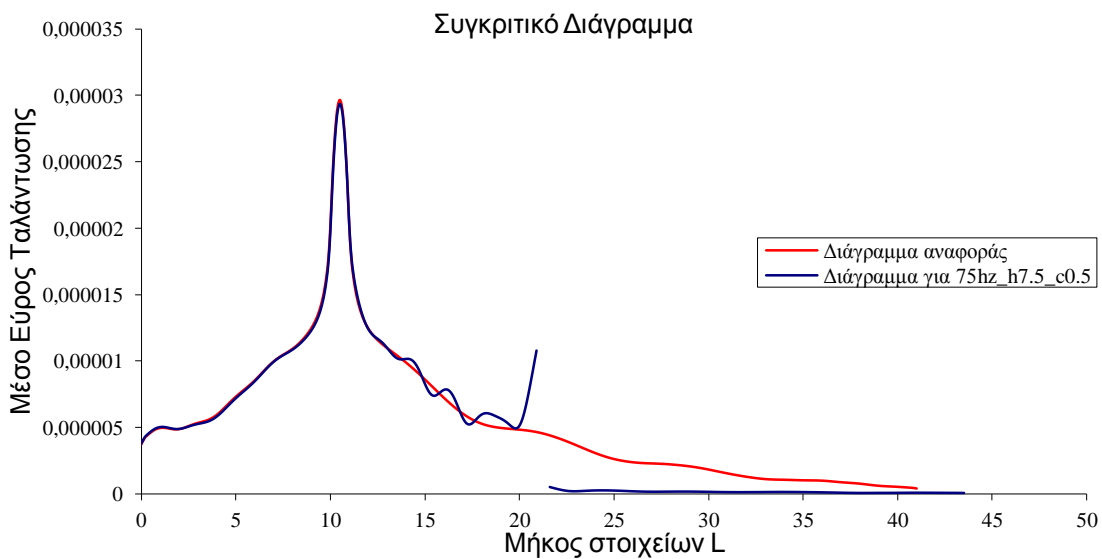
**Εικόνα 4.5.7:** Περίγραμμα μετατοπίσεων για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f=75\text{Hz}$  με βάθος ορύγματος  $h=7,5\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c=0,5\text{m}$



**Εικόνα 4.5.8:** Παραμόρφωση του εδάφους για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f=75\text{Hz}$  με βάθος ορύγματος  $h=7,5\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c=0,5\text{m}$



**Διάγραμμα 4.5.6:** Διάγραμμα μεταβολής του συντελεστή μείωσης εύρους σε όλο το μήκος του εδάφους για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 75\text{Hz}$  με βάθος ορύγματος  $h = 7,5\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,5\text{m}$



**Διάγραμμα 4.5.7:** Συγκριτικό διάγραμμα για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f=50\text{Hz}$  με βάθος ορύγματος  $h = 7,5\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,5\text{m}$



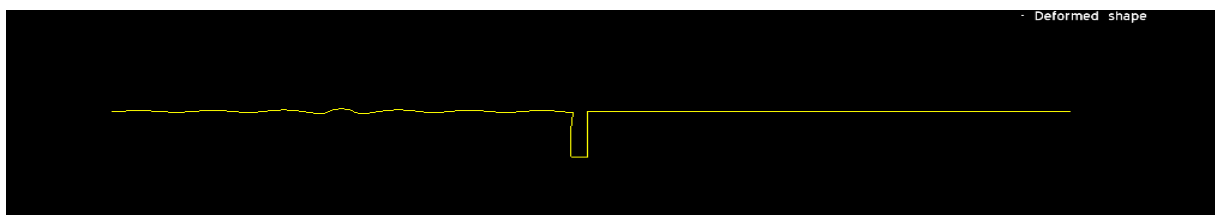
**Πίνακας 4.5.1:** Υπολογισμός του μέσου όρου του εύρους μετατόπισης των διαμήκη κυμάτων με κενό όρυγμα, για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 75\text{Hz}$  με διαφορετικά βάθη ορύγματος ( $h$ ) και με μήκος ορύγματος  $c = 0,5\text{m}$

ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ	ΒΑΘΟΣ ΟΡΥΓΜΑΤΟΣ (H)	ΜΗΚΟΣ ΟΡΥΓΜΑΤΟΣ (c)	ΜΕΣΗ ΜΕΤΑΤΟΠΗΣΗ ΚΥΜΑΤΩΝ ΠΡΟΣΤΑΤΕΥΜΕΝΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ	ΜΕΙΩΣΗ ΤΗΣ ΜΕΣΗΣ ΜΕΤΑΤΟΠΗΣΗΣ ΚΥΜΑΤΩΝ(%)	
75Hz	2,5m	0,5m	3,46499E-07	75,20	4,031613
75Hz	5m	0,5m	1,88332E-07	86,52	7,417486
75Hz	7,5m	0,5m	1,16111E-07	91,69	12,03116
75Hz (χωρίς όρυγμα)	0m	0m	1,39695E-06		1

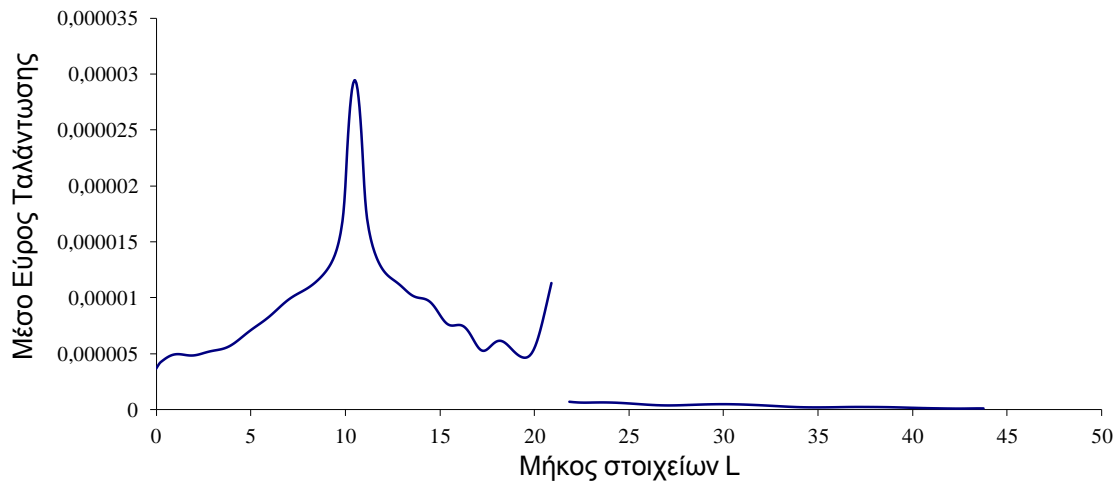
**4.5.2. Αποτελέσματα για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 75\text{Hz}$  με διαφορετικά βάθη ορύγματος και με πλάτος ορύγματος  $c = 0,75\text{m}$ .**



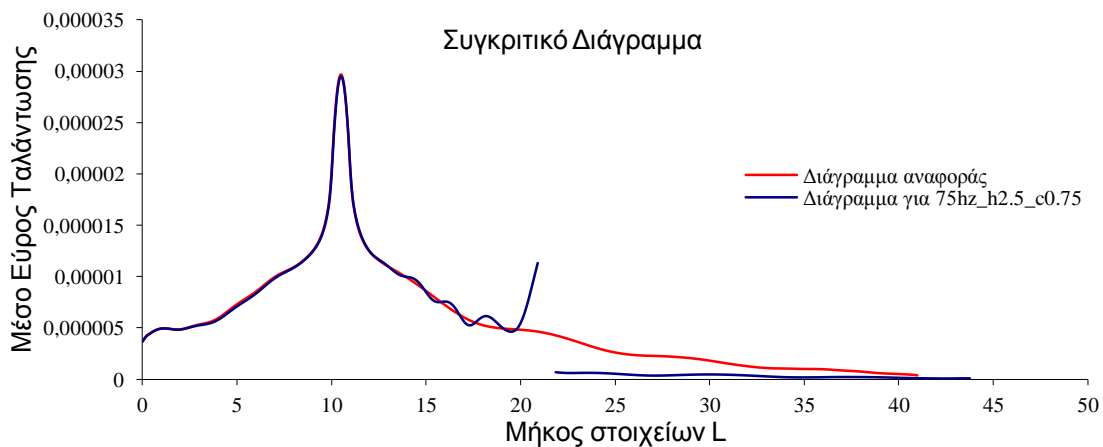
**Εικόνα 4.5.9:** Περίγραμμα μετατοπίσεων για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 75\text{Hz}$  με βάθος ορύγματος  $h = 2,5\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,75\text{m}$



**Εικόνα 4.5.10:** Παραμόρφωση του εδάφους για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 75\text{Hz}$  με βάθος ορύγματος  $h = 2,5\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,75\text{m}$



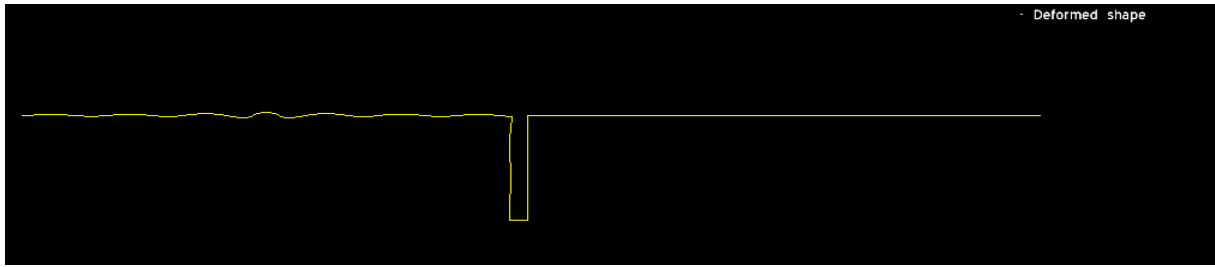
**Διάγραμμα 4.5.8:** Διάγραμμα μεταβολής του συντελεστή μείωσης εύρους σε όλο το μήκος του εδάφους για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 75\text{Hz}$  με βάθος ορύγματος  $h = 2,5\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,75\text{m}$



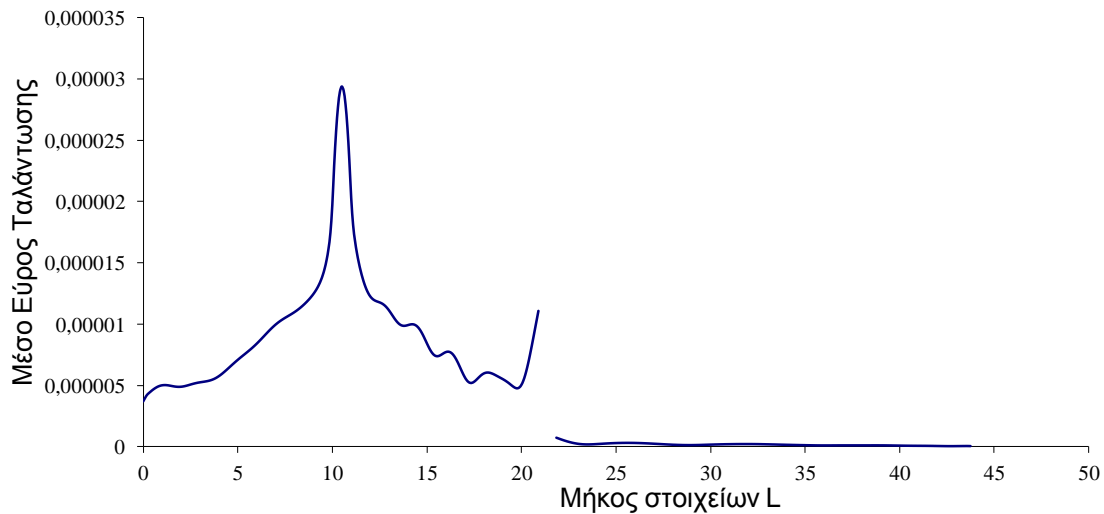
**Διάγραμμα 4.5.9:** Συγκριτικό διάγραμμα για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f=75\text{Hz}$  με βάθος ορύγματος  $h = 2,5\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,75\text{m}$



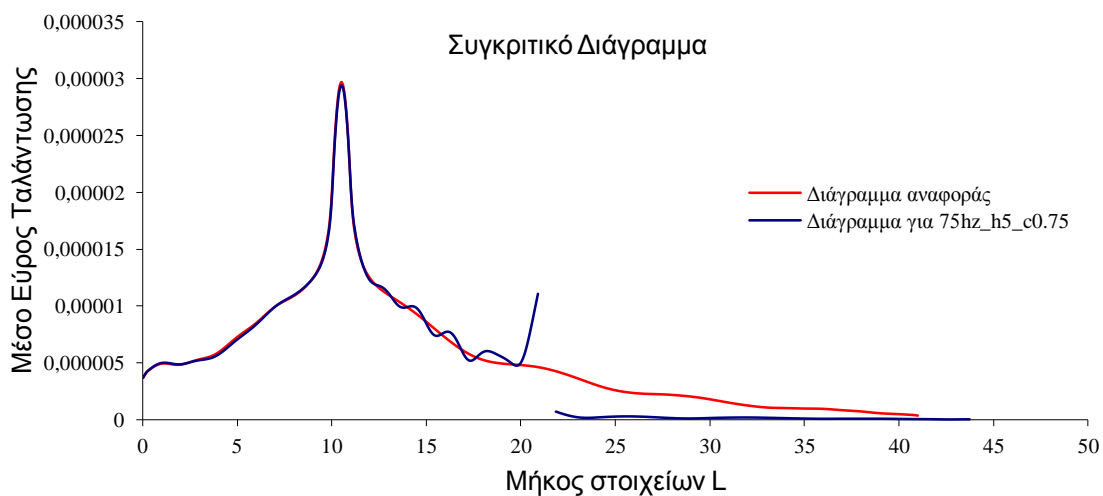
**Εικόνα 4.5.11:** Περίγραμμα μετατοπίσεων για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 75\text{Hz}$  με βάθος ορύγματος  $h = 5\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,75\text{m}$



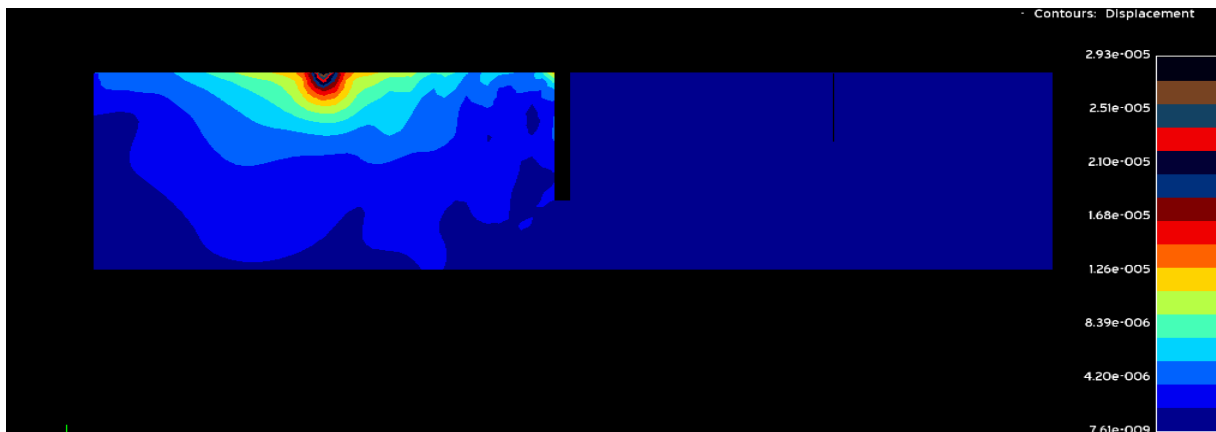
**Εικόνα 4.5.12:** Παραμόρφωση του εδάφους για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 75\text{Hz}$  με βάθος ορύγματος  $h = 5\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,75\text{m}$



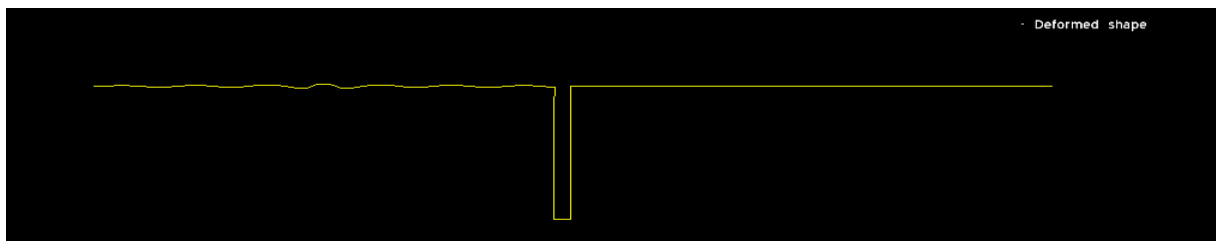
**Διάγραμμα 4.5.10:** Διάγραμμα μεταβολής του συντελεστή μείωσης εύρους σε όλο το μήκος του εδάφους για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 75\text{Hz}$  με βάθος ορύγματος  $h = 5\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,75\text{m}$



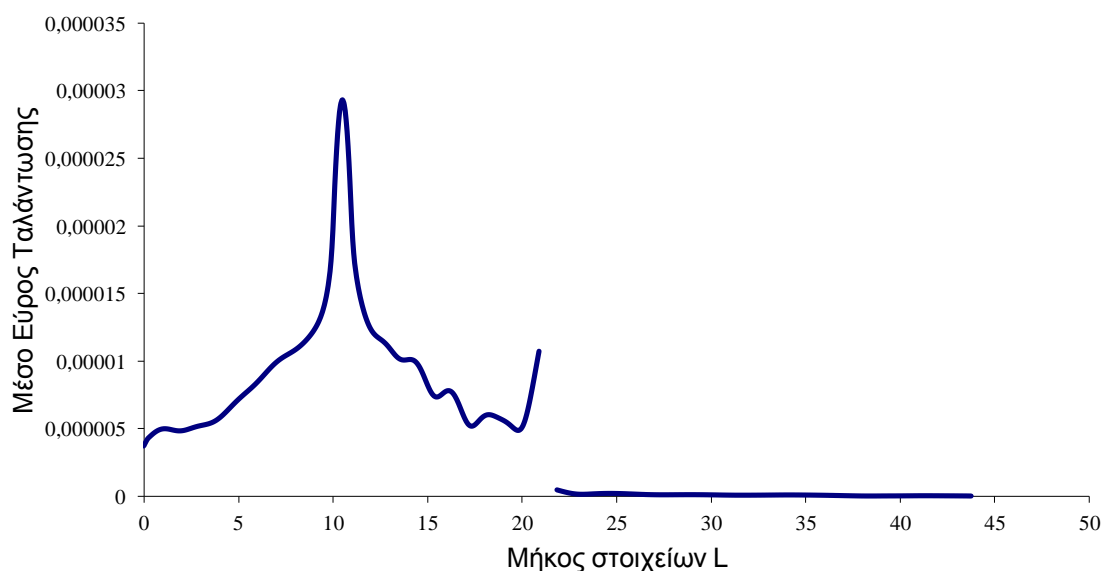
**Διάγραμμα 4.5.11:** Συγκριτικό διάγραμμα για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f=75\text{Hz}$  με βάθος ορύγματος  $h = 5\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,75\text{m}$



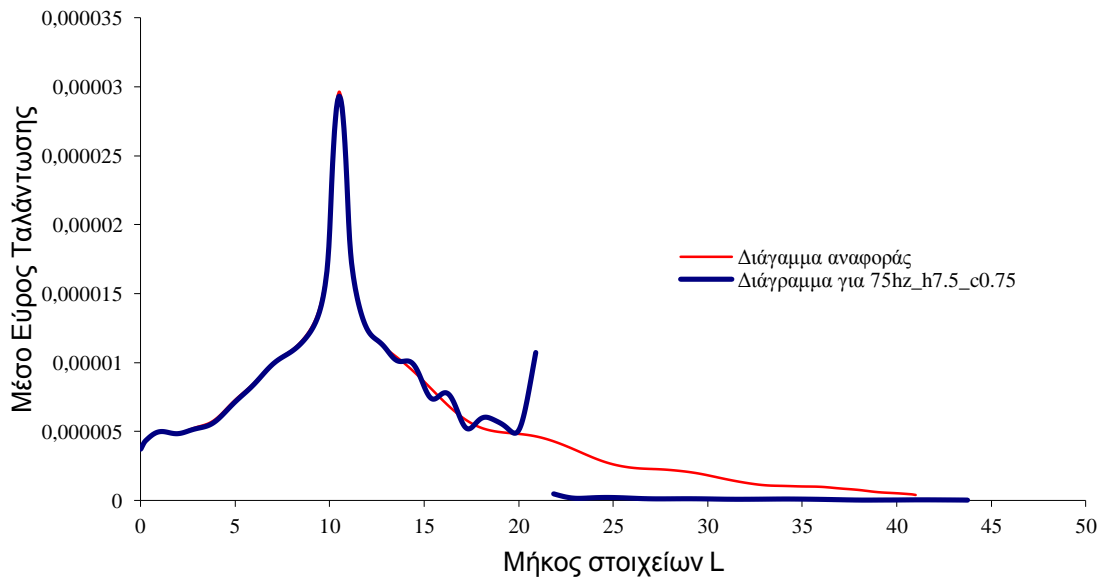
**Εικόνα 4.5.13:** Περίγραμμα μετατοπίσεων για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 75\text{Hz}$  με βάθος ορύγματος  $h = 7,5\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,75\text{m}$



**Εικόνα 4.5.14:** Παραμόρφωση του εδάφους για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 75\text{Hz}$  με βάθος ορύγματος  $h = 7,5\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,75\text{m}$



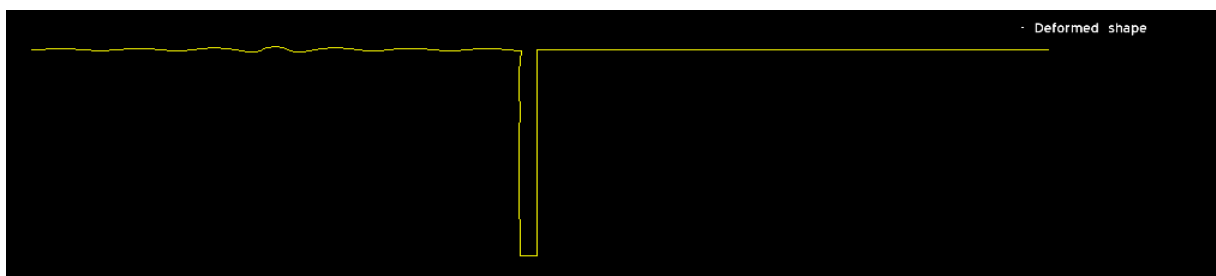
**Διάγραμμα 4.5.12:** Διάγραμμα μεταβολής του συντελεστή μείωσης εύρους σε όλο το μήκος του εδάφους για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 75\text{Hz}$  με βάθος ορύγματος  $h = 7,5\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,75\text{m}$



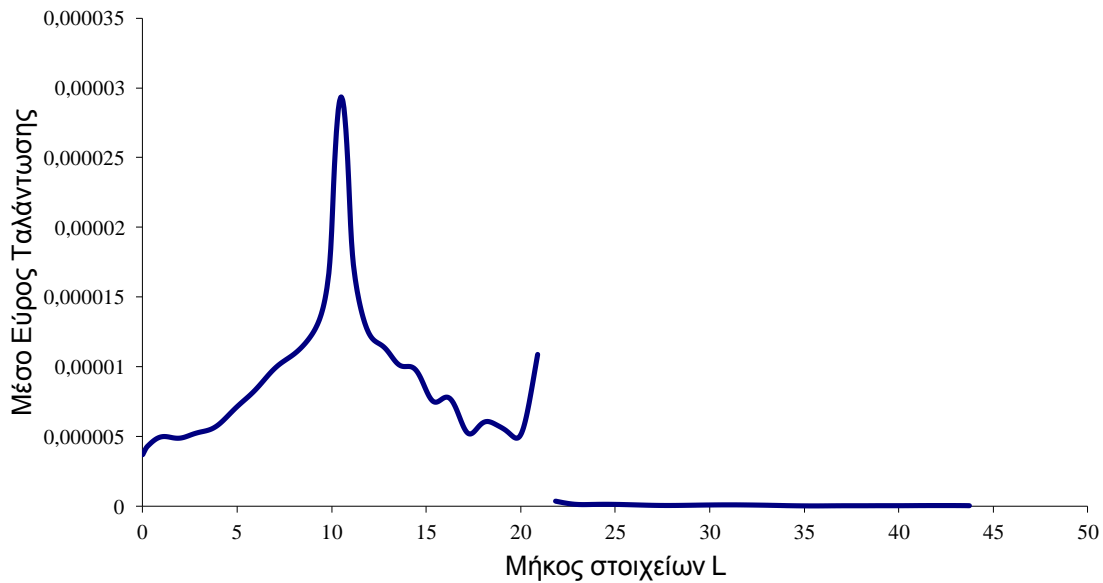
**Διάγραμμα 4.5.13:** Συγκριτικό διάγραμμα για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f=75\text{Hz}$  με βάθος ορύγματος  $h=7,5\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c=0,75\text{m}$



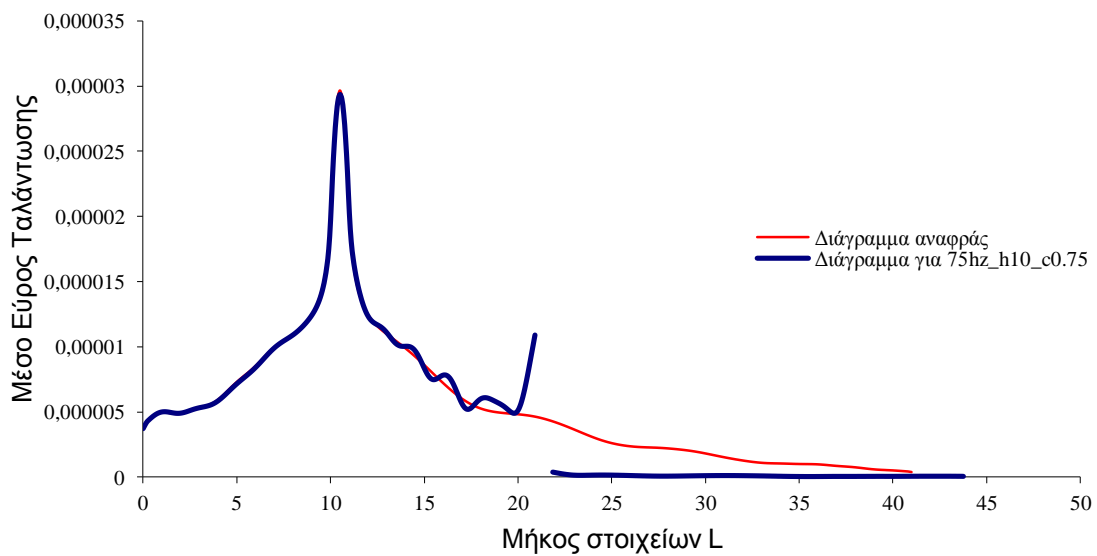
**Εικόνα 4.5.15:** Περίγραμμα μετατοπίσεων για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f=75\text{Hz}$  με βάθος ορύγματος  $h=10\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c=0,75\text{m}$



**Εικόνα 4.5.16:** Παραμόρφωση του εδάφους για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f=75\text{Hz}$  με βάθος ορύγματος  $h=10\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c=0,75\text{m}$



**Διάγραμμα 4.5.14:** Διάγραμμα μεταβολής του συντελεστή μείωσης εύρους σε όλο το μήκος του εδάφους για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 75\text{Hz}$  με βάθος ορύγματος  $h = 10\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,75\text{m}$



**Διάγραμμα 4.5.15:** Συγκριτικό διάγραμμα για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f=75\text{Hz}$  με βάθος ορύγματος  $h = 10\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,75\text{m}$

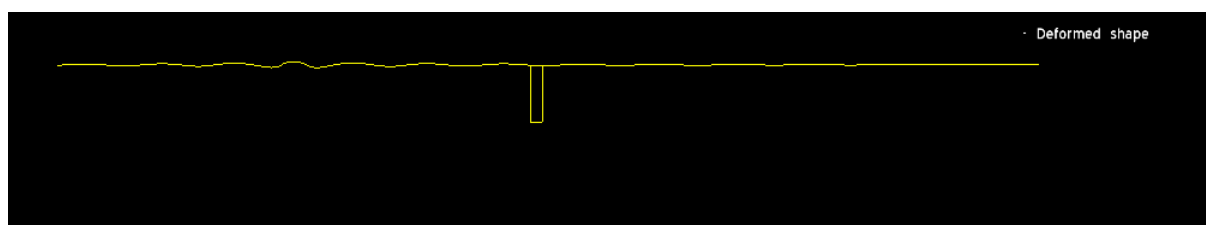
**Πίνακας 4.5.2:** Υπολογισμός του μέσου όρου του εύρους μετατόπισης των διαμήκη κυμάτων με κενό όρυγμα, για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 75\text{Hz}$  με διαφορετικά βάθη ορύγματος ( $h$ ) και με μήκος ορύγματος  $c = 0,75\text{m}$

ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ	ΒΑΘΟΣ ΟΡΥΓΜΑΤΟΣ (H)	ΜΗΚΟΣ ΟΡΥΓΜΑΤΟΣ (c)	ΜΕΣΗ ΜΕΤΑΤΟΠΗΣΗ ΚΥΜΑΤΩΝ ΠΡΟΣΤΑΤΕΥΜΕΝΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ	ΜΕΙΩΣΗ ΤΗΣ ΜΕΣΗΣ ΜΕΤΑΤΟΠΗΣΗΣ ΚΥΜΑΤΩΝ(%)	
75HZ	2,5m	0,75m	3,36989E-07	75,88	4,145388
75HZ	5m	0,75m	1,80630E-07	87,07	7,734E+00
75HZ	7,5m	0,75m	1,13383E-07	91,88	1,232E+01
75HZ	10m	0,75m	6,53346E-08	95,32	2,138E+01
75HZ (χωρίς όρυγμα)	0m	0m	1,39695E-06		1,000E+00

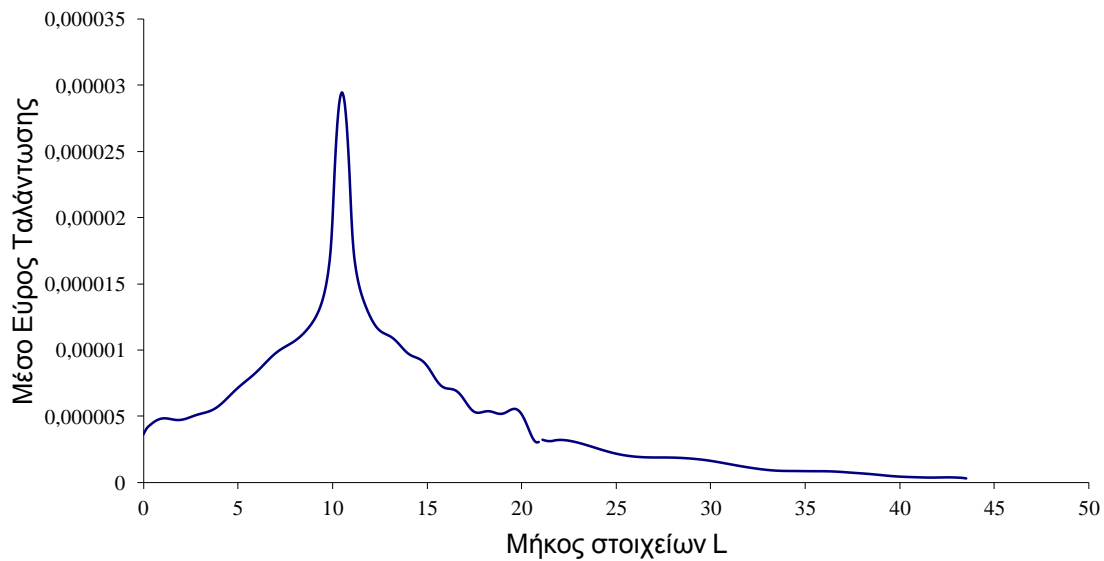
**4.5.3. Αποτελέσματα για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 75\text{Hz}$  με διαφορετικά βάθη ορύγματος επικαλυμμένου με σκυρόδεμα και με πλάτος ορύγματος  $c = 0,5\text{m}$ .**



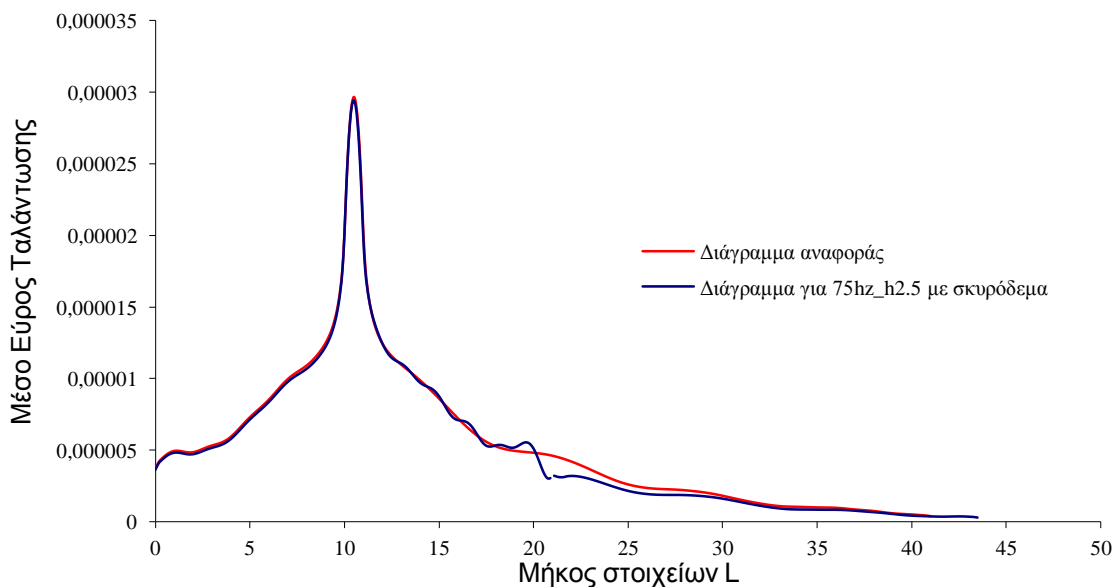
**Εικόνα 4.5.17:** Περίγραμμα μετατοπίσεων για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 75\text{Hz}$  με βάθος επικαλυμμένου με σκυρόδεμα ορύγματος  $h = 2,5\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,5\text{m}$



**Εικόνα 4.5.18:** Παραμόρφωση του εδάφους για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 75\text{Hz}$  με βάθος επικαλυμμένου με σκυρόδεμα ορύγματος  $h = 2,5\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,5\text{m}$



**Διάγραμμα 4.5.16:** Διάγραμμα μεταβολής του συντελεστή μείωσης εύρους σε όλο το μήκος του εδάφους για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 75\text{Hz}$  με βάθος επικαλυμμένου με σκυρόδεμα ορύγματος  $h = 2,5\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,5\text{m}$

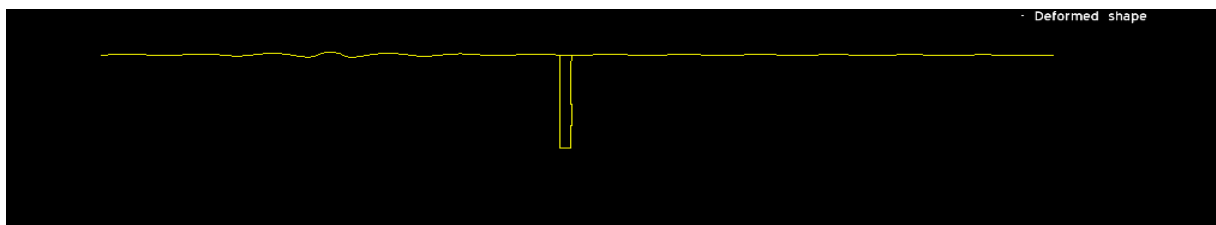


**Διάγραμμα 4.5.17:** Συγκριτικό διάγραμμα για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f=75\text{Hz}$  με βάθος επικαλυμμένου με σκυρόδεμα ορύγματος  $h = 2,5\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,5\text{m}$

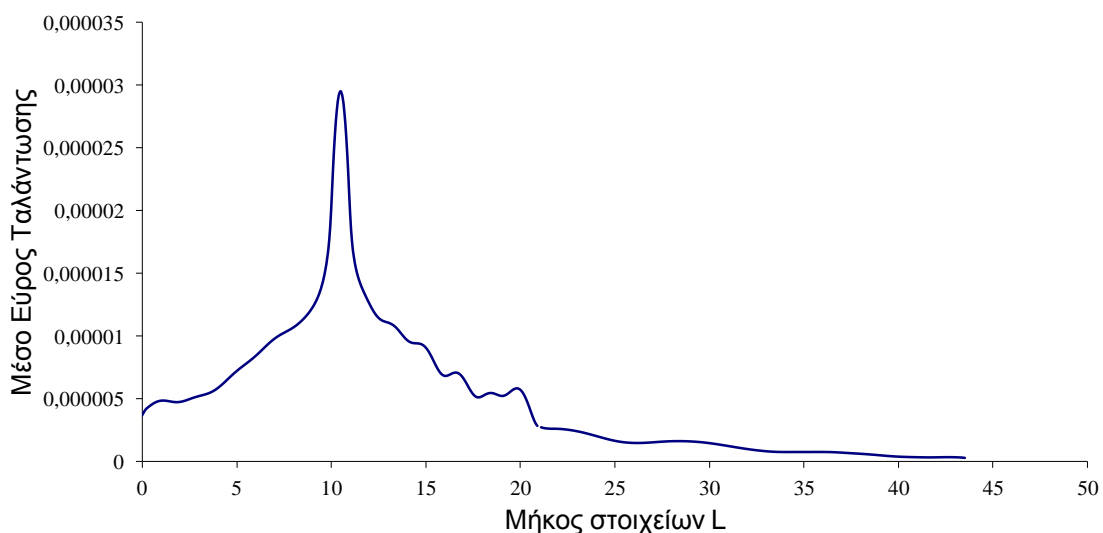




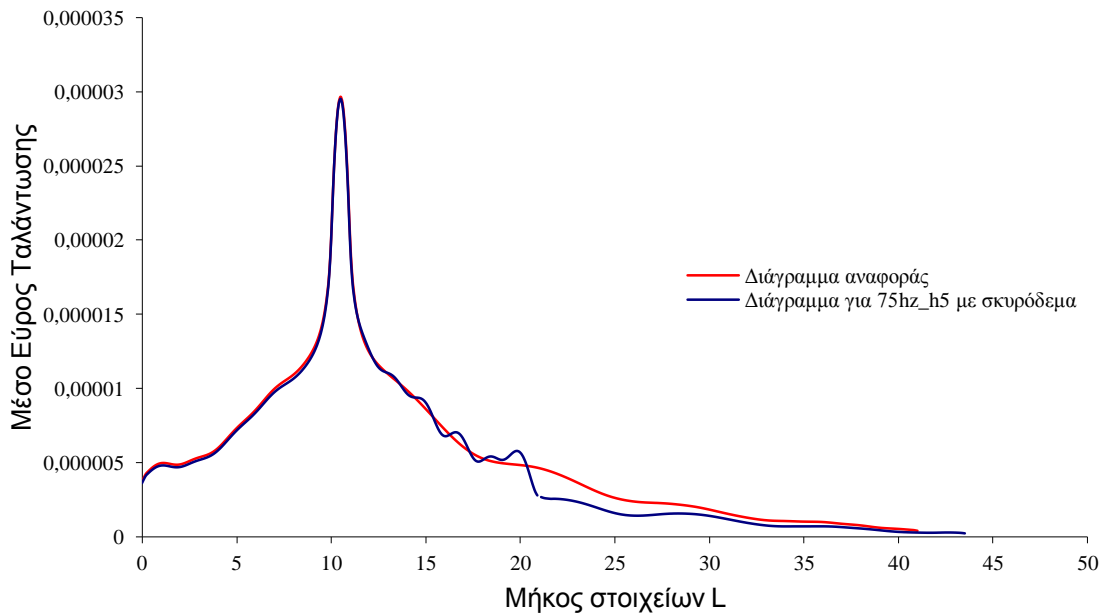
**Εικόνα 4.5.19:** Περίγραμμα μετατοπίσεων για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 75\text{Hz}$  με βάθος επικαλυμμένου με σκυρόδεμα ορύγματος  $h = 5\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,5\text{m}$



**Εικόνα 4.5.20:** Παραμόρφωση του εδάφους για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 75\text{Hz}$  με βάθος επικαλυμμένου με σκυρόδεμα ορύγματος  $h = 5\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,5\text{m}$



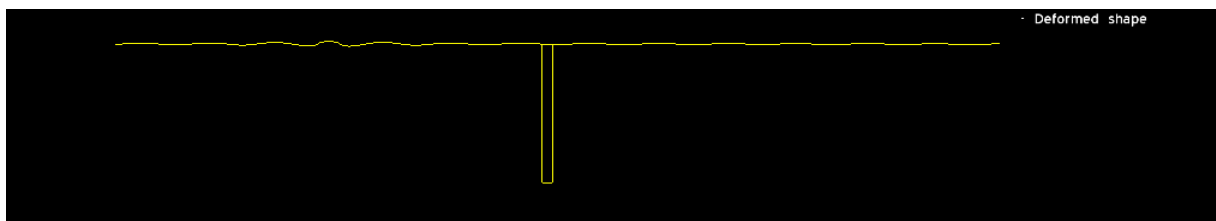
**Διάγραμμα 4.5.18:** Διάγραμμα μεταβολής του συντελεστή μείωσης εύρους σε όλο το μήκος του εδάφους για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 75\text{Hz}$  με βάθος επικαλυμμένου με σκυρόδεμα ορύγματος  $h = 5\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,5\text{m}$



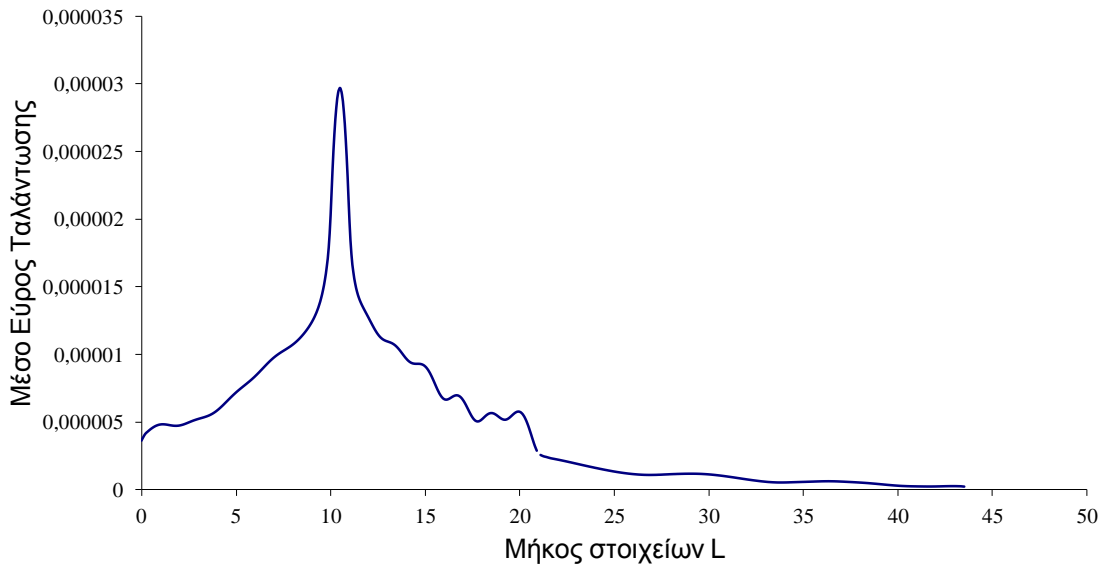
**Διάγραμμα 4.5.19:** Συγκριτικό διάγραμμα για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f=75\text{Hz}$  με βάθος επικαλυμμένου με σκυρόδεμα ορύγματος  $h = 5\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,5\text{m}$



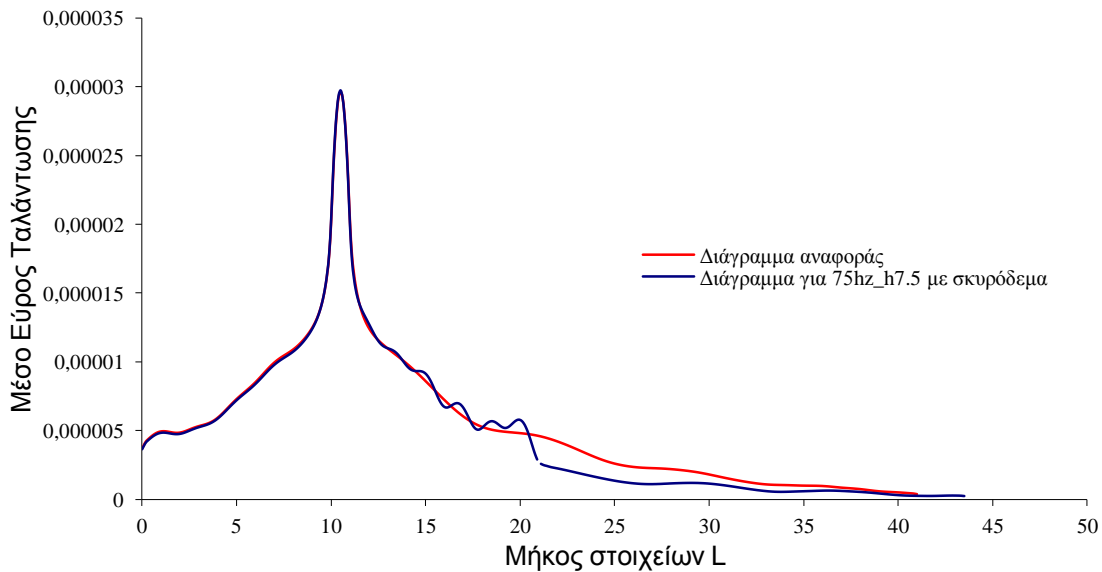
**Εικόνα 4.5.21:** Περίγραμμα μετατοπίσεων για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 75\text{Hz}$  με βάθος επικαλυμμένου με σκυρόδεμα ορύγματος  $h = 7,5\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,5\text{m}$



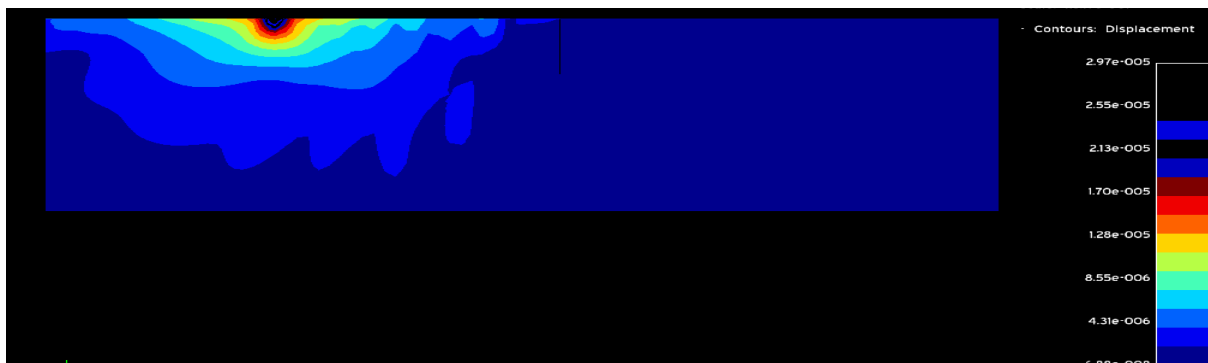
**Εικόνα 4.5.22:** Παραμόρφωση του εδάφους για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 75\text{Hz}$  με βάθος επικαλυμμένου με σκυρόδεμα ορύγματος  $h = 7,5\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,5\text{m}$



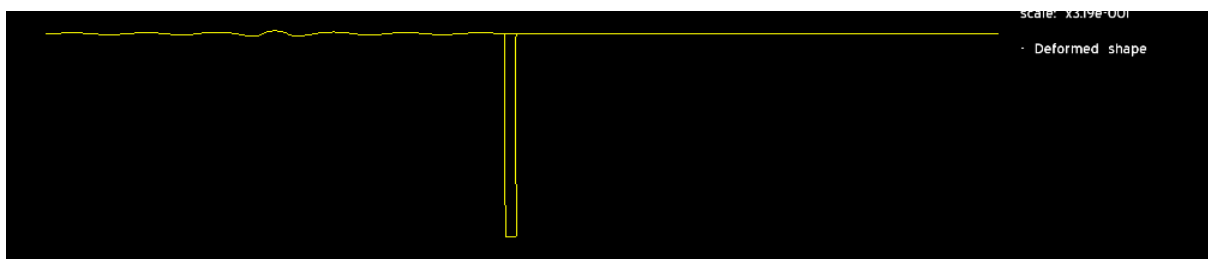
**Διάγραμμα 4.5.20:** Διάγραμμα μεταβολής του συντελεστή μείωσης εύρους σε όλο το μήκος του εδάφους για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 75\text{Hz}$  με βάθος επικαλυμμένου με σκυρόδεμα ορύγματος  $h = 7,5\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,5\text{m}$



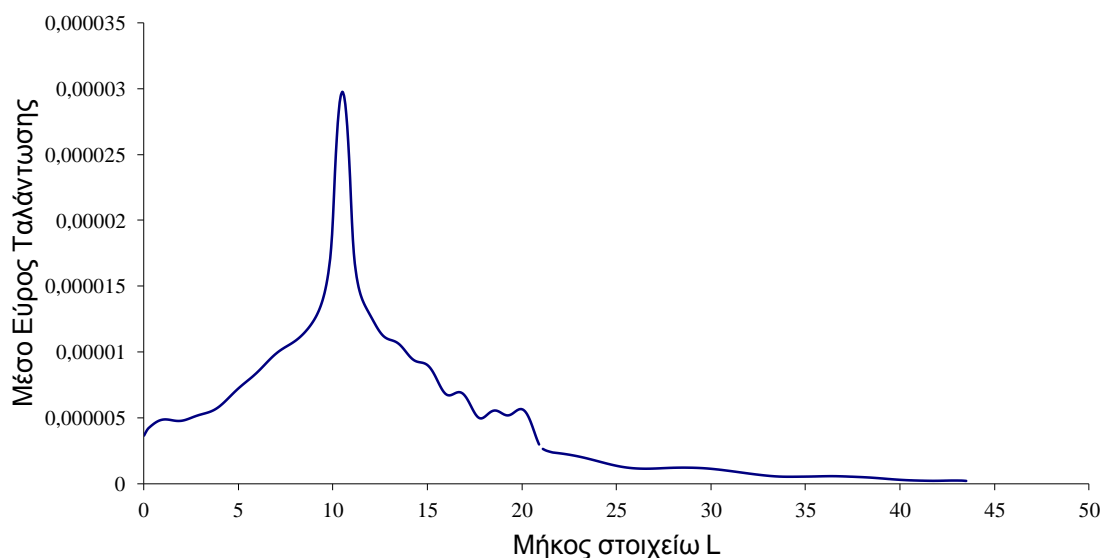
**Διάγραμμα 4.5.21:** Συγκριτικό διάγραμμα για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f=75\text{Hz}$  με βάθος επικαλυμμένου με σκυρόδεμα ορύγματος  $h = 7,5\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,5\text{m}$



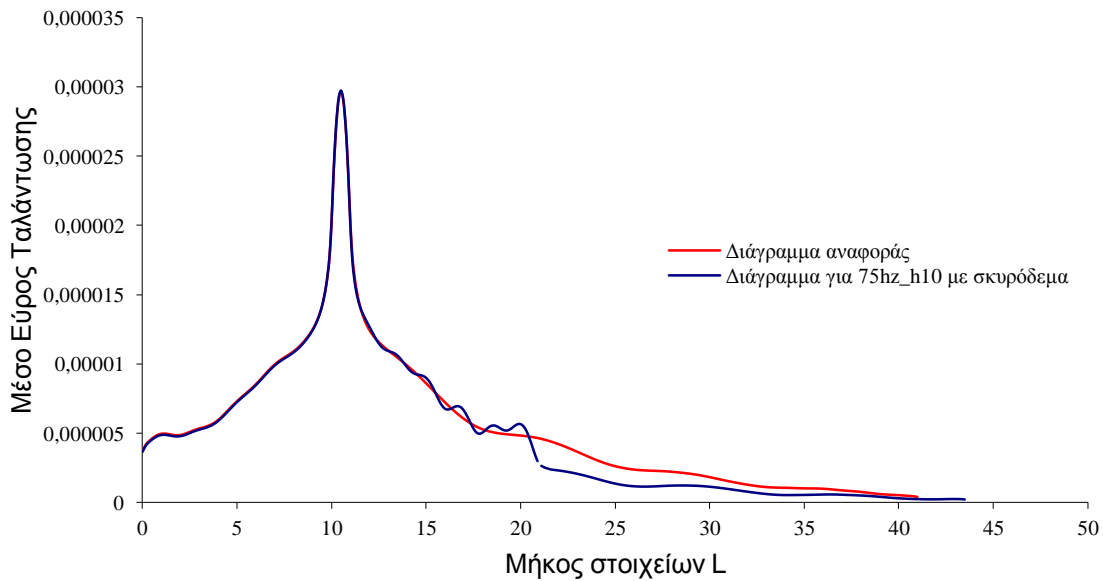
**Εικόνα 4.5.23:** Περίγραμμα μετατοπίσεων για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 75\text{Hz}$  με βάθος επικαλυμμένου με σκυρόδεμα ορύγματος  $h = 10\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,5\text{m}$



**Εικόνα 4.5.24:** Παραμόρφωση του εδάφους για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 75\text{Hz}$  με βάθος επικαλυμμένου με σκυρόδεμα ορύγματος  $h = 10\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,5\text{m}$



**Διάγραμμα 4.5.22:** Διάγραμμα μεταβολής του συντελεστή μείωσης εύρους σε όλο το μήκος του εδάφους για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 75\text{Hz}$  με βάθος επικαλυμμένου με σκυρόδεμα ορύγματος  $h = 10\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,5\text{m}$



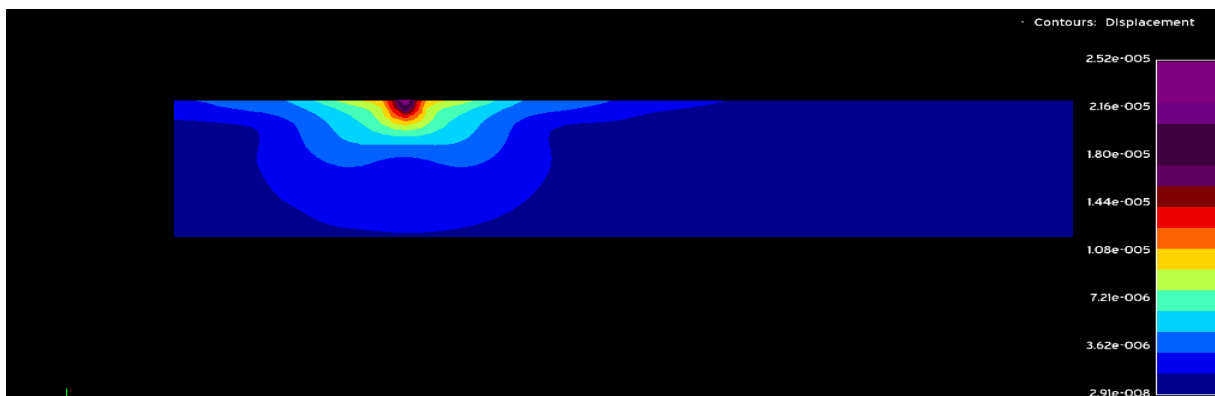
**Διάγραμμα 4.5.23:** Συγκριτικό διάγραμμα για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f=75\text{Hz}$  με βάθος επικαλυμμένου με σκυρόδεμα ορύγματος  $h = 10\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,5\text{m}$

**Πίνακας 4.5.3:** Υπολογισμός του μέσου όρου του εύρους μετατόπισης των διαμήκη κυμάτων επικαλυμμένου με σκυρόδεμα ορύγματος, για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 75\text{Hz}$  με διαφορετικά βάθη ορύγματος ( $h$ ) και με μήκος ορύγματος  $c = 0,75\text{m}$

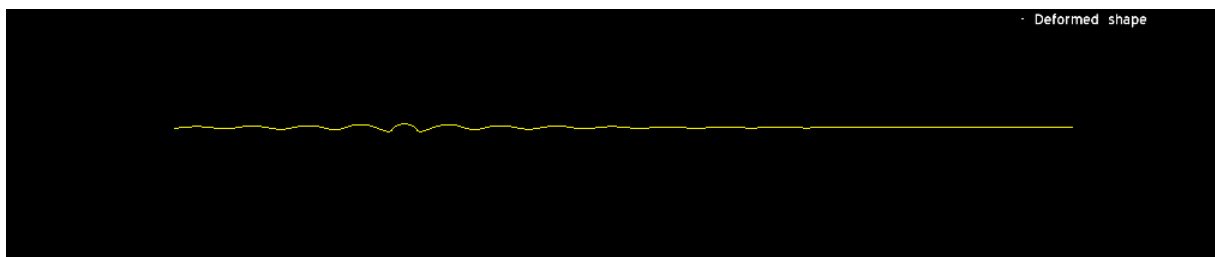
ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ	ΒΑΘΟΣ ΟΡΥΓΜΑΤΟΣ (H)	ΜΗΚΟΣ ΟΡΥΓΜΑΤΟΣ (c)	ΜΕΣΗ ΜΕΤΑΤΟΠΗΣΗ ΚΥΜΑΤΩΝ ΠΡΟΣΤΑΤΕΥΜΕΝΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ	ΜΕΙΩΣΗ ΤΗΣ ΜΕΣΗΣ ΜΕΤΑΤΟΠΗΣΗΣ ΚΥΜΑΤΩΝ(%)	
75HZ	2,5m	0,5m	9,72219E-07	30,40	1,436868
75HZ	5m	0,5m	8,55437E-07	38,76	1,633025
75HZ	7,5m	0,5m	7,27087E-07	47,95	1,921297
75HZ	10m	0,5m	7,17270E-07	48,65	1,947593
75HZ (χωρίς όρυγμα)	0m	0m	1,39695E-06		1

#### 4.6. Επίλυση του προβλήματος με το πρόγραμμα ISOBEM για συχνότητα αρμονικής δύναμης 100Hz

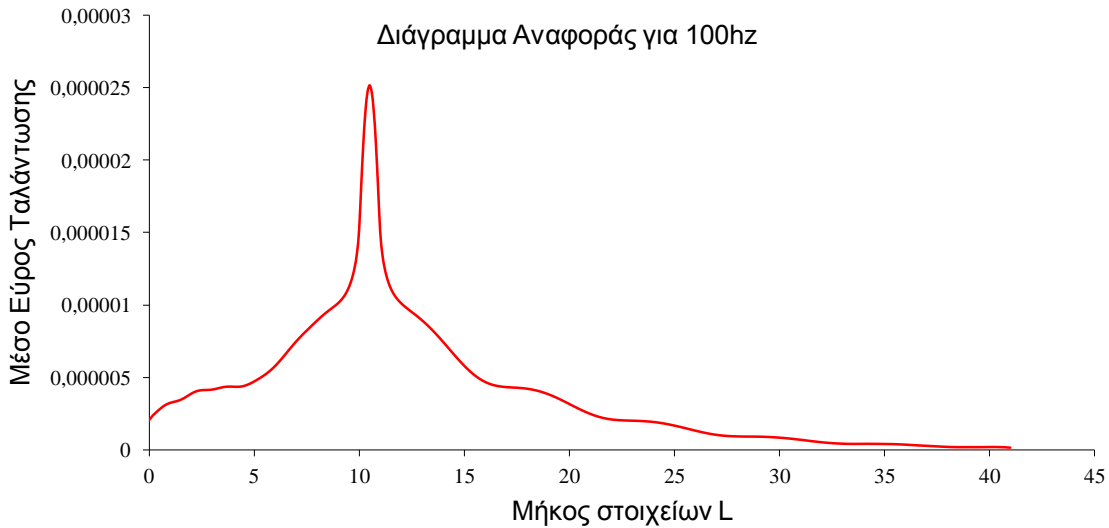
##### 4.6.1. Αποτελέσματα για συχνότητα αρμονικής δύναμης $f = 100\text{Hz}$ με διαφορετικά βάθη ορύγματος με πλάτος ορύγματος $c = 0,5\text{m}$ και με μήκος στοιχείων $L = 0,1\text{m}$



**Εικόνα 4.6.1:** Μέτρο μετατοπίσεων (m) για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 75\text{Hz}$  χωρίς όρυγμα. (Πρόβλημα αναφοράς)



**Εικόνα 4.6.2:** Παραμόρφωση του εδάφους για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 75\text{Hz}$  χωρίς όρυγμα (Πρόβλημα αναφοράς)



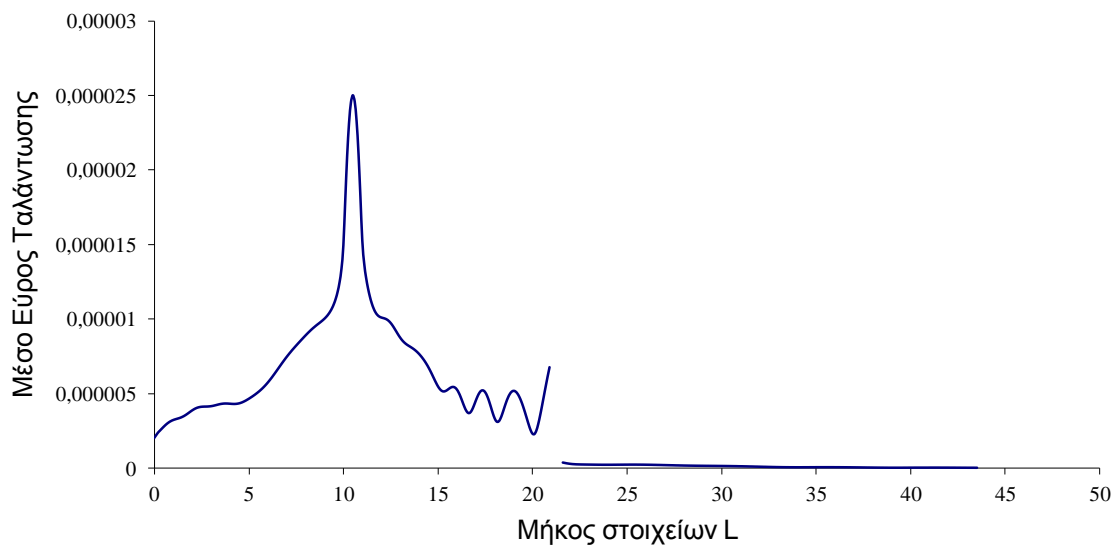
**Διάγραμμα 4.6.1:** Μέτρο μετατοπίσεων ( $m$ ) για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 100\text{Hz}$  χωρίς όρυγμα (Πρόβλημα αναφοράς) για  $y = 0$  (ελεύθερη επιφάνεια).



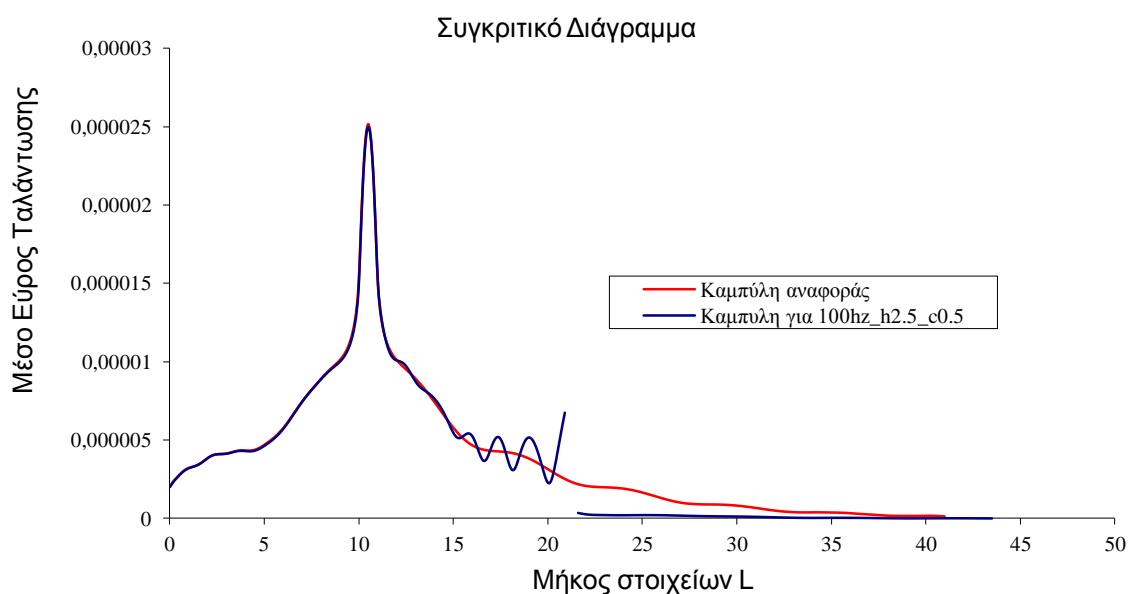
**Εικόνα 4.6.3:** Περίγραμμα μετατοπίσεων για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 100\text{Hz}$  με βάθος ορύγματος  $h = 2,5\text{m}$ , μήκος ορύγματος  $c = 0,5\text{m}$  και μήκος στοιχείων  $l = 0,1\text{m}$



**Εικόνα 4.6.4:** Παραμόρφωση του εδάφους για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 100\text{Hz}$  με βάθος ορύγματος  $h = 2,5\text{m}$ , μήκος ορύγματος  $c = 0,5\text{m}$  και μήκος στοιχείων  $l = 0,1\text{m}$



**Διάγραμμα 4.6.2:** Διάγραμμα μεταβολής του συντελεστή μείωσης εύρους σε όλο το μήκος του εδάφους για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 100\text{Hz}$  με βάθος ορύγματος  $h = 2,5\text{m}$ , μήκος ορύγματος  $c = 0,5\text{m}$  και μήκος στοιχείων  $l = 0,1\text{m}$

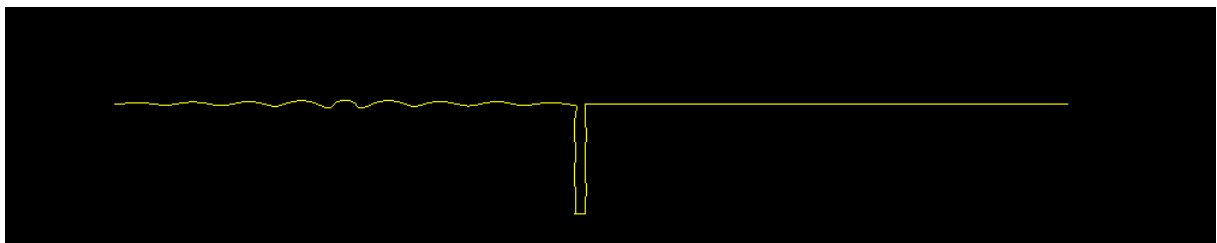


**Διάγραμμα 4.6.3:** Συγκριτικό διάγραμμα για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f=100\text{Hz}$  με βάθος ορύγματος  $h = 2,5\text{m}$ , μήκος ορύγματος  $c = 0,5\text{m}$  και μήκος στοιχείων  $l = 0,1\text{m}$

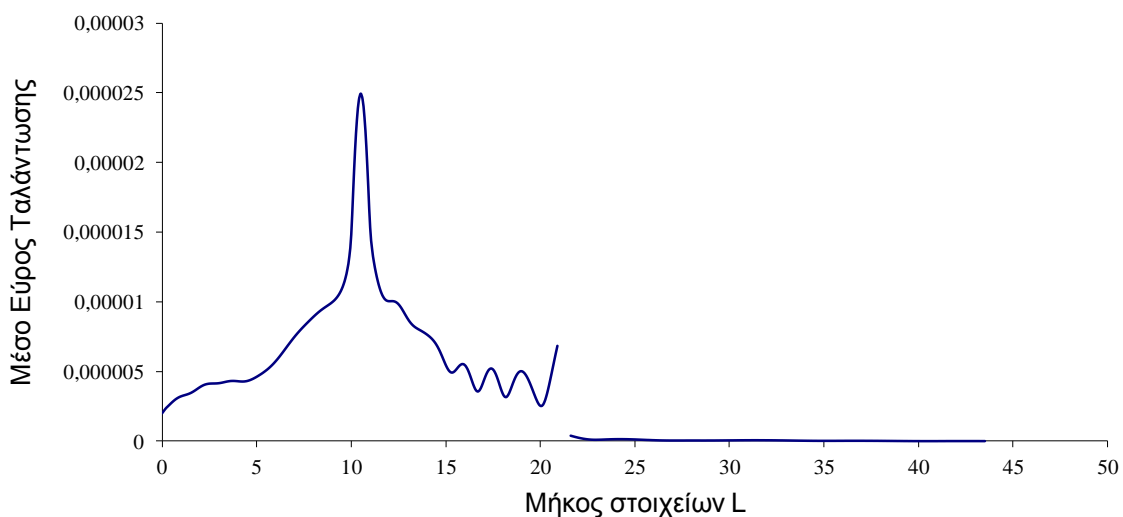




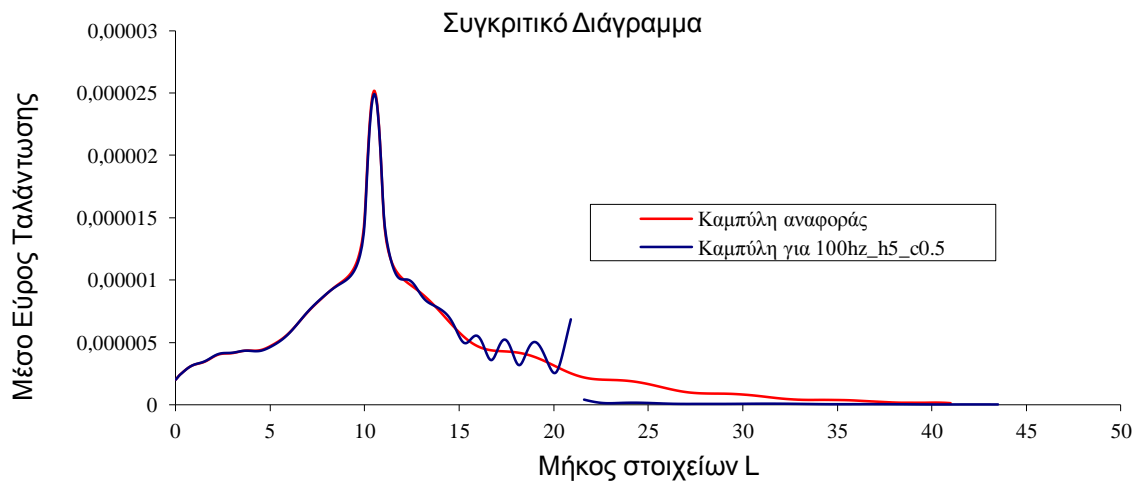
**Εικόνα 4.6.5:** Περίγραμμα μετατοπίσεων για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 100\text{Hz}$  με βάθος ορύγματος  $h = 5\text{m}$ , μήκος ορύγματος  $c = 0,5\text{m}$  και μήκος στοιχείων  $l = 0,1\text{m}$



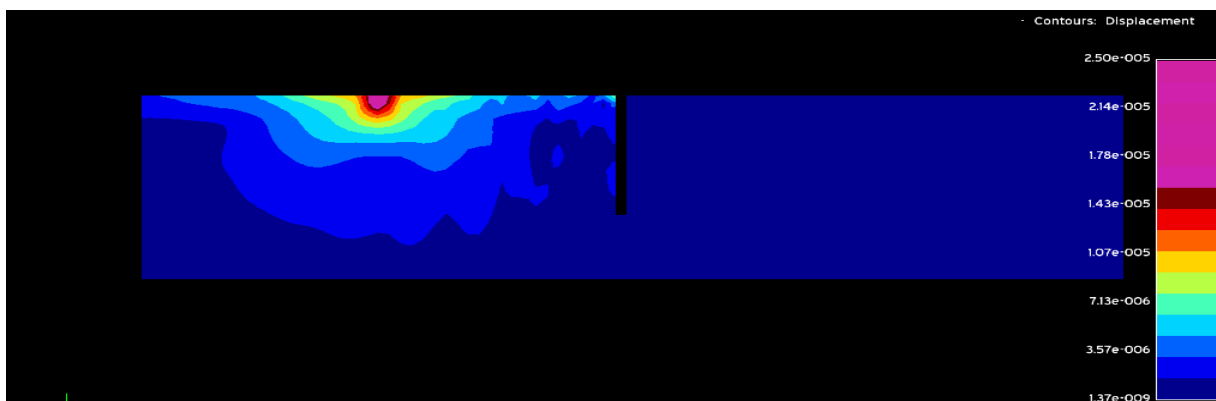
**Εικόνα 4.6.6:** Παραμόρφωση του εδάφους για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 100\text{Hz}$  με βάθος ορύγματος  $h = 5\text{m}$ , μήκος ορύγματος  $c = 0,5\text{m}$  και μήκος στοιχείων  $l = 0,1\text{m}$



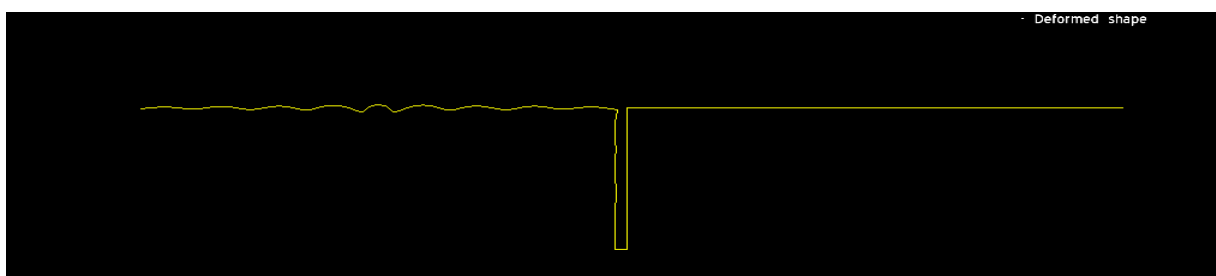
**Διάγραμμα 4.6.4:** Διάγραμμα μεταβολής του συντελεστή μείωσης εύρους σε όλο το μήκος του εδάφους για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 100\text{Hz}$  με βάθος ορύγματος  $h = 5\text{m}$ , μήκος ορύγματος  $c = 0,5\text{m}$  και μήκος στοιχείων  $l = 0,1\text{m}$



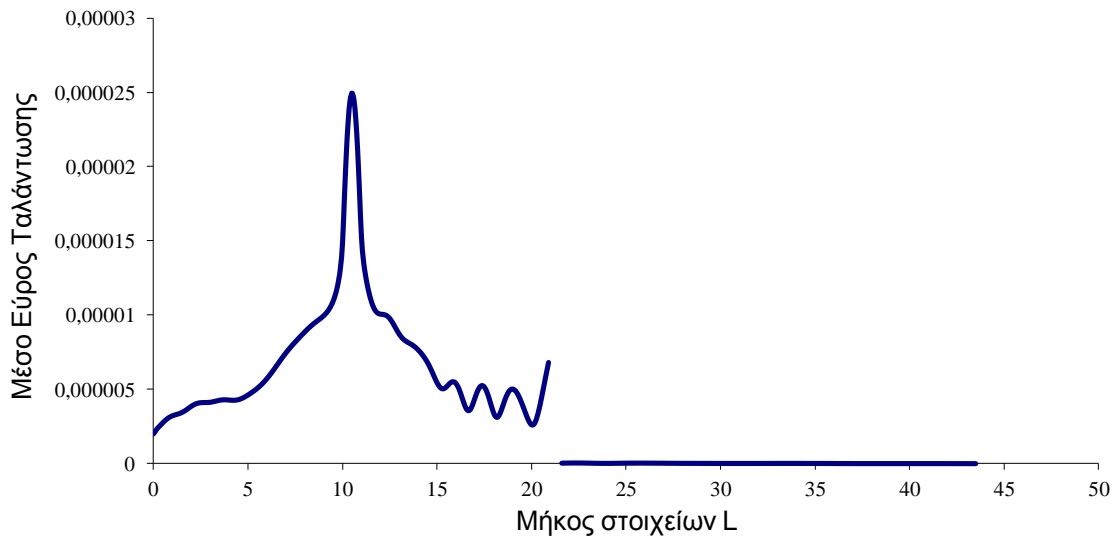
**Διάγραμμα 4.6.5:** Συγκριτικό διάγραμμα για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f=100\text{Hz}$  με βάθος ορύγματος  $h=5\text{m}$ , μήκος ορύγματος  $c=0,5\text{m}$  και μήκος στοιχείων  $l=0,1\text{m}$



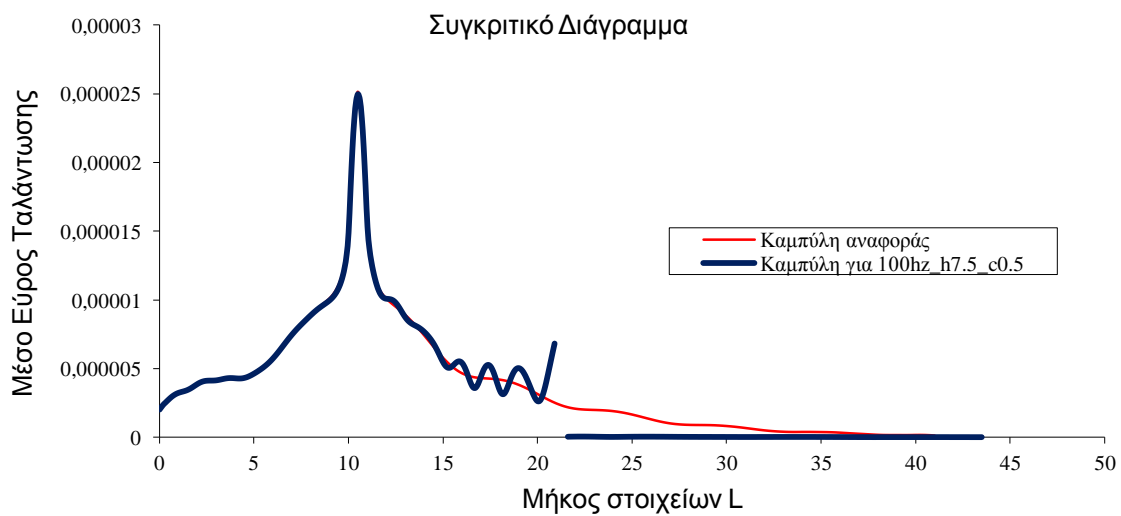
**Εικόνα 4.6.7:** Περίγραμμα μετατοπίσεων για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f=100\text{Hz}$  με βάθος ορύγματος  $h=7,5\text{m}$ , μήκος ορύγματος  $c=0,5\text{m}$  και μήκος στοιχείων  $l=0,1\text{m}$



**Εικόνα 4.6.8:** Παραμόρφωση του εδάφους για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f=100\text{Hz}$  με βάθος ορύγματος  $h=7,5\text{m}$ , μήκος ορύγματος  $c=0,5\text{m}$  και μήκος στοιχείων  $l=0,1\text{m}$



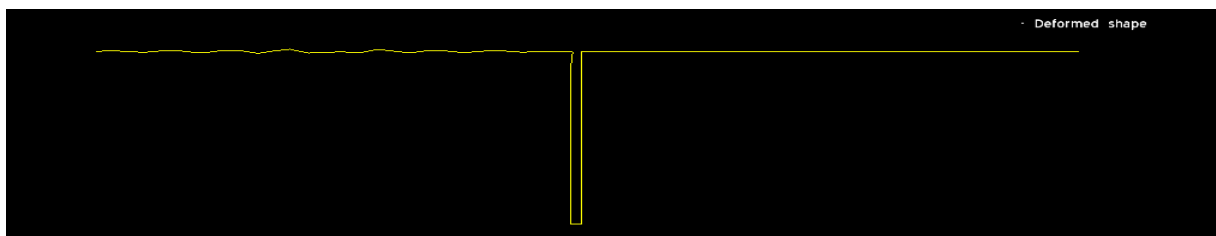
**Διάγραμμα 4.6.6:** Διάγραμμα μεταβολής του συντελεστή μείωσης εύρους σε όλο το μήκος του εδάφους για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 100\text{Hz}$  με βάθος ορύγματος  $h = 7,5\text{m}$ , μήκος ορύγματος  $c = 0,5\text{m}$  και μήκος στοιχείων  $l = 0,1\text{m}$



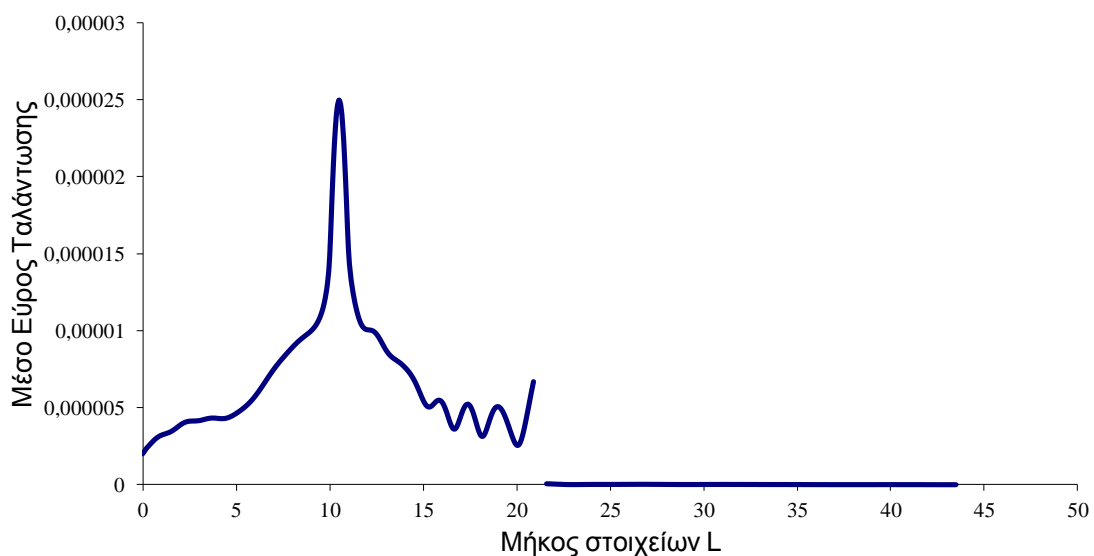
**Διάγραμμα 4.6.7:** Συγκριτικό διάγραμμα για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f=100\text{Hz}$  με βάθος ορύγματος  $h = 7,5\text{m}$ , μήκος ορύγματος  $c = 0,5\text{m}$  και μήκος στοιχείων  $l = 0,1\text{m}$



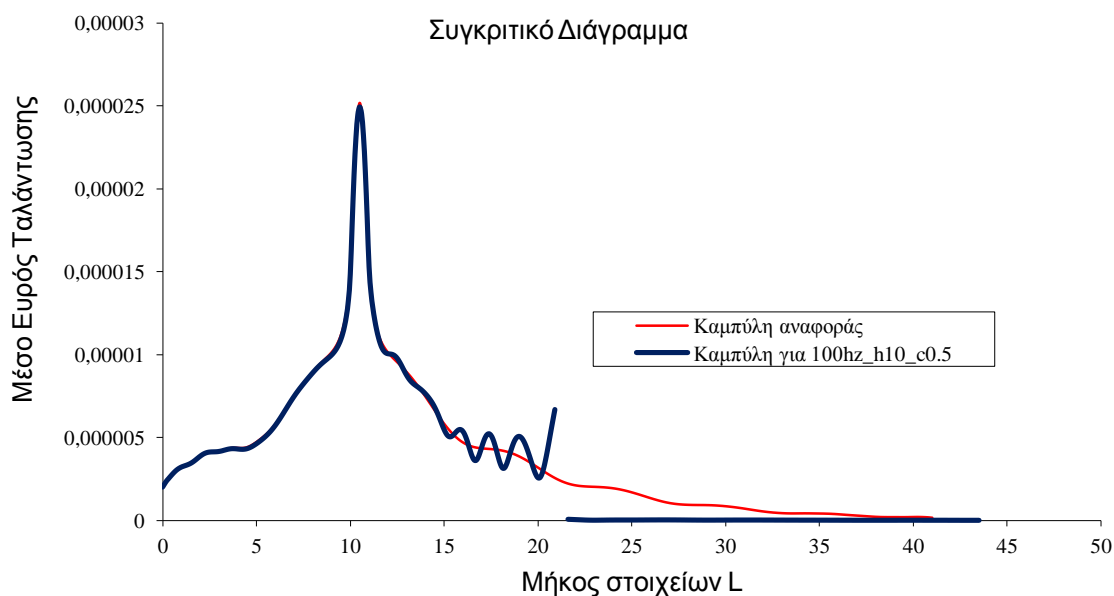
**Εικόνα 4.6.9:** Περίγραμμα μετατοπίσεων για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 100\text{Hz}$  με βάθος ορύγματος  $h = 10\text{m}$ , μήκος ορύγματος  $c = 0,5\text{m}$  και μήκος στοιχείων  $l = 0,1\text{m}$



**Εικόνα 4.6.10:** Παραμόρφωση του εδάφους για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 100\text{Hz}$  με βάθος ορύγματος  $h = 10\text{m}$ , μήκος ορύγματος  $c = 0,5\text{m}$  και μήκος στοιχείων  $l = 0,1\text{m}$



**Διάγραμμα 4.6.8:** Διάγραμμα μεταβολής του συντελεστή μείωσης εύρους σε όλο το μήκος του εδάφους για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 100\text{Hz}$  με βάθος ορύγματος  $h = 10\text{m}$ , μήκος ορύγματος  $c = 0,5\text{m}$  και μήκος στοιχείων  $l = 0,1\text{m}$



**Διάγραμμα 4.6.9:** Συγκριτικό διάγραμμα για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f=100\text{Hz}$  με βάθος ορύγματος  $h = 10\text{m}$ , μήκος ορύγματος  $c = 0,5\text{m}$  και μήκος στοιχείων  $l = 0,1\text{m}$

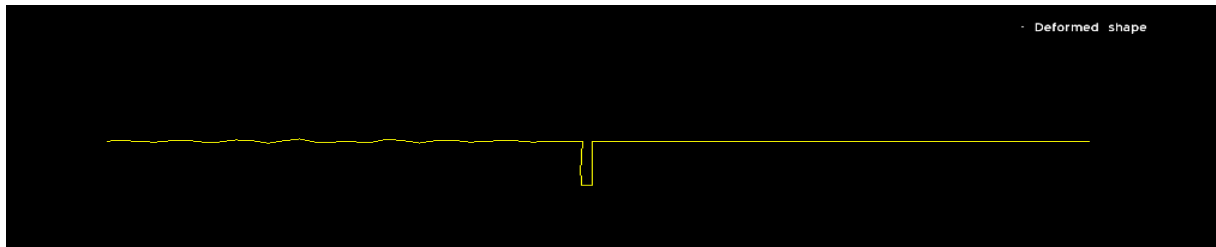
**Πίνακας 4.6.4:** Υπολογισμός του μέσου όρου του εύρους μετατόπισης των διαμήκη κυμάτων με κενό όρυγμα, για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 100\text{Hz}$  με διαφορετικά βάθη ορύγματος ( $h$ ), με μήκος ορύγματος  $c = 0,5\text{m}$  και με μήκος στοιχείων  $l = 0,1\text{m}$

ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ	ΒΑΘΟΣ ΟΡΥΓΜΑΤΟΣ (H)	ΜΗΚΟΣ ΟΡΥΓΜΑΤΟΣ (c)	ΜΕΣΗ ΜΕΤΑΤΟΠΗΣΗ ΚΥΜΑΤΩΝ ΠΡΟΣΤΑΤΕΥΜΕΝΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ	ΜΕΙΩΣΗ ΤΗΣ ΜΕΣΗΣ ΜΕΤΑΤΟΠΗΣΗΣ ΚΥΜΑΤΩΝ(%)	
100Hz	2,5m	0,5m	1,31739E-07	79,78	4,944481
100Hz	5m	0,5m	8,02900E-08	87,67	8,112853
100Hz	7,5m	0,5m	2,23325E-08	96,57	29,1674
100Hz	10m	0,5m	1,78879E-08	97,25	36,41462
100Hz (χωρίς όρυγμα)	0m	0m	6,51381E-07		1

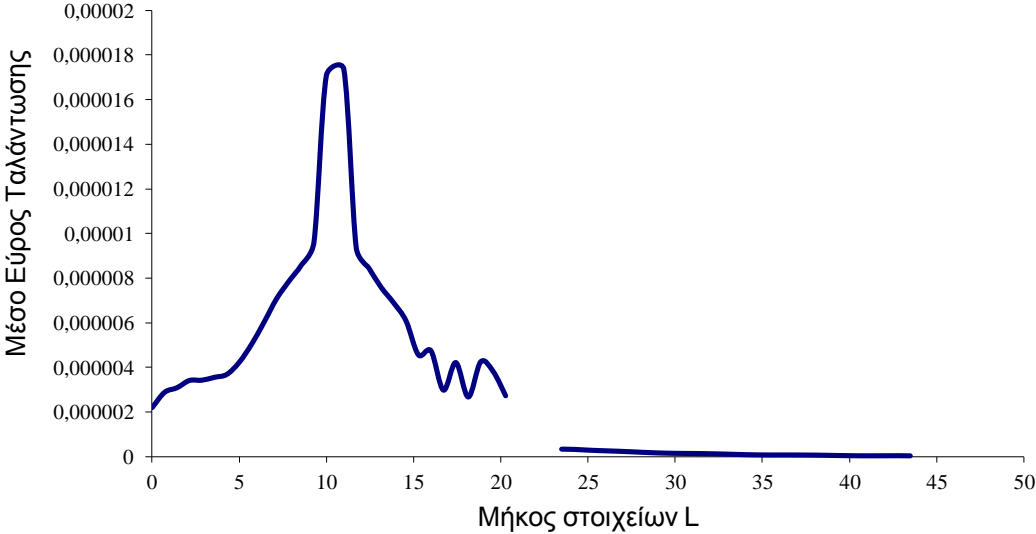
**4.6.2. Αποτελέσματα για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 100\text{Hz}$  με διαφορετικά βάθη ορύγματος με πλάτος ορύγματος  $c = 0,5\text{m}$  και με μήκος στοιχείων  $L = 0,7\text{m}$**



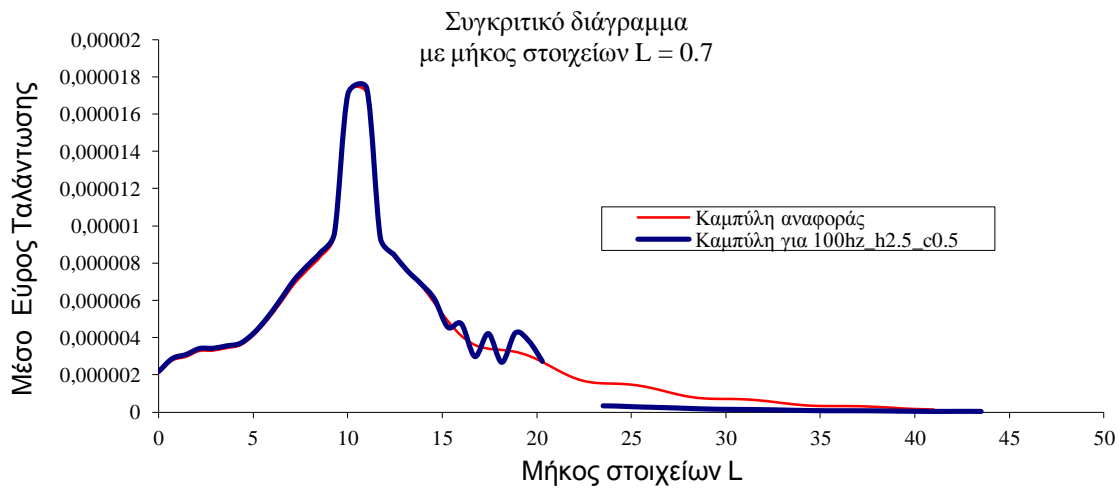
**Εικόνα 4.6.11:** Περίγραμμα μετατοπίσεων για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 100\text{Hz}$  με βάθος ορύγματος  $h = 2,5\text{m}$ , μήκος ορύγματος  $c = 0,5\text{m}$  και μήκος στοιχείων  $l = 0,7\text{m}$



**Εικόνα 4.6.12:** Παραμόρφωση του εδάφους για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 100\text{Hz}$  με βάθος ορύγματος  $h = 2,5\text{m}$ , μήκος ορύγματος  $c = 0,5\text{m}$  και μήκος στοιχείων  $l = 0,7\text{m}$



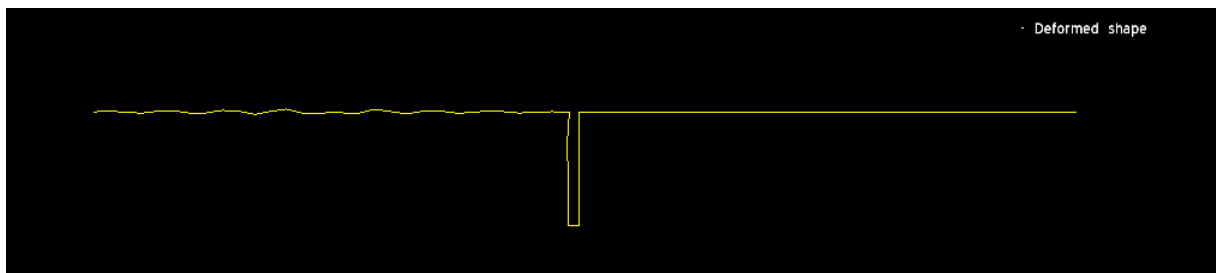
**Διάγραμμα 4.6.10:** Διάγραμμα μεταβολής του συντελεστή μείωσης εύρους σε όλο το μήκος του εδάφους για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 100\text{Hz}$  με βάθος ορύγματος  $h = 2,5\text{m}$ , μήκος ορύγματος  $c = 0,5\text{m}$  και μήκος στοιχείων  $l = 0,7\text{m}$



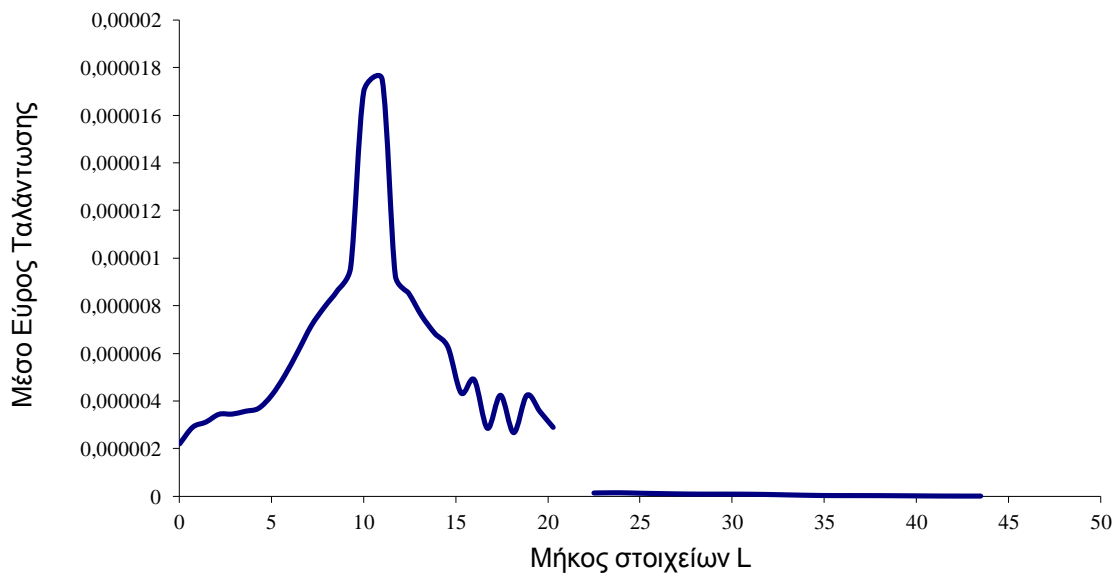
**Διάγραμμα 4.6.11:** Συγκριτικό διάγραμμα για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f=100\text{Hz}$  με βάθος ορύγματος  $h = 2,5\text{m}$ , μήκος ορύγματος  $c = 0,5\text{m}$  και μήκος στοιχείων  $l = 0,7\text{m}$



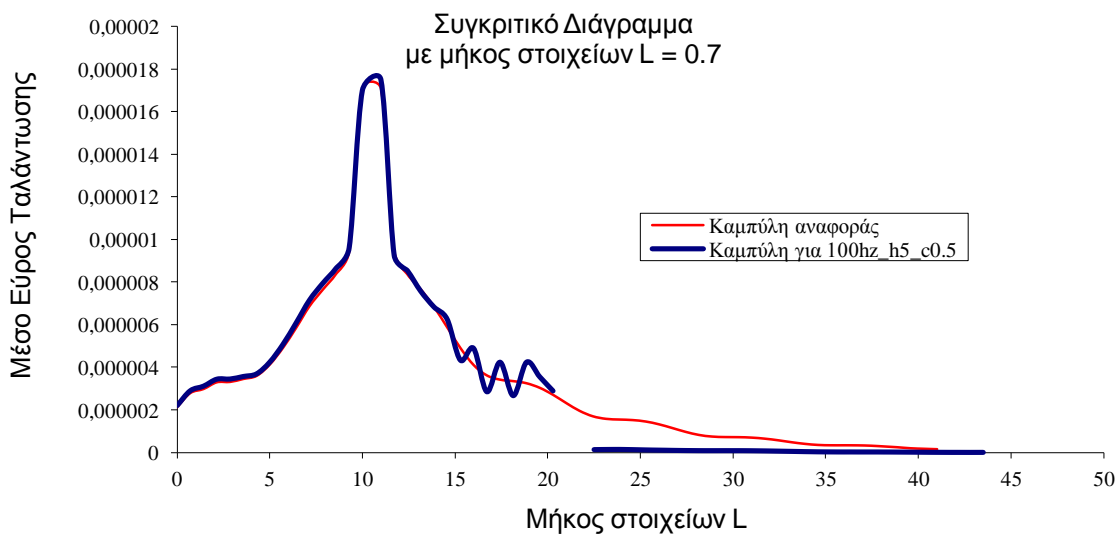
**Εικόνα 4.6.13:** Περίγραμμα μετατοπίσεων για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 100\text{Hz}$  με βάθος ορύγματος  $h = 5\text{m}$ , μήκος ορύγματος  $c = 0,5\text{m}$  και μήκος στοιχείων  $l = 0,7\text{m}$



**Εικόνα 4.6.15:** Παραμόρφωση του εδάφους για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 100\text{Hz}$  με βάθος ορύγματος  $h = 5\text{m}$ , μήκος ορύγματος  $c = 0,5\text{m}$  και μήκος στοιχείων  $l = 0,7\text{m}$



**Διάγραμμα 4.6.17:** Διάγραμμα μεταβολής του συντελεστή μείωσης εύρους σε όλο το μήκος του εδάφους για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 100\text{Hz}$  με βάθος ορύγματος  $h = 5\text{m}$ , μήκος ορύγματος  $c = 0,5\text{m}$  και μήκος στοιχείων  $l = 0,7\text{m}$

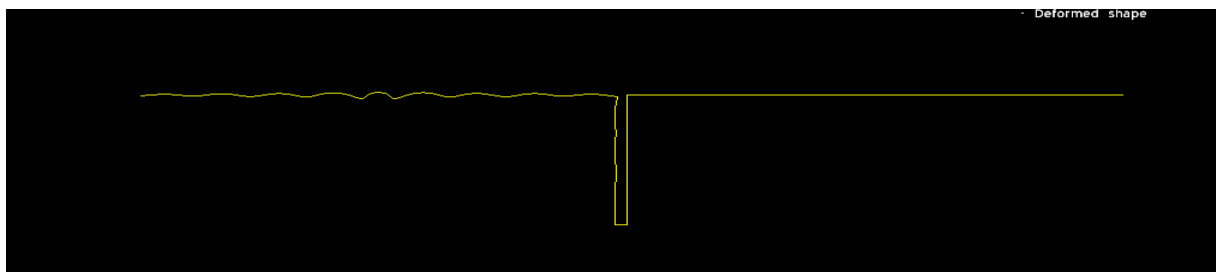


**Διάγραμμα 4.6.18:** Συγκριτικό διάγραμμα για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f=100\text{Hz}$  με βάθος ορύγματος  $h = 5\text{m}$ , μήκος ορύγματος  $c = 0,5\text{m}$  και μήκος στοιχείων  $l = 0,7\text{m}$

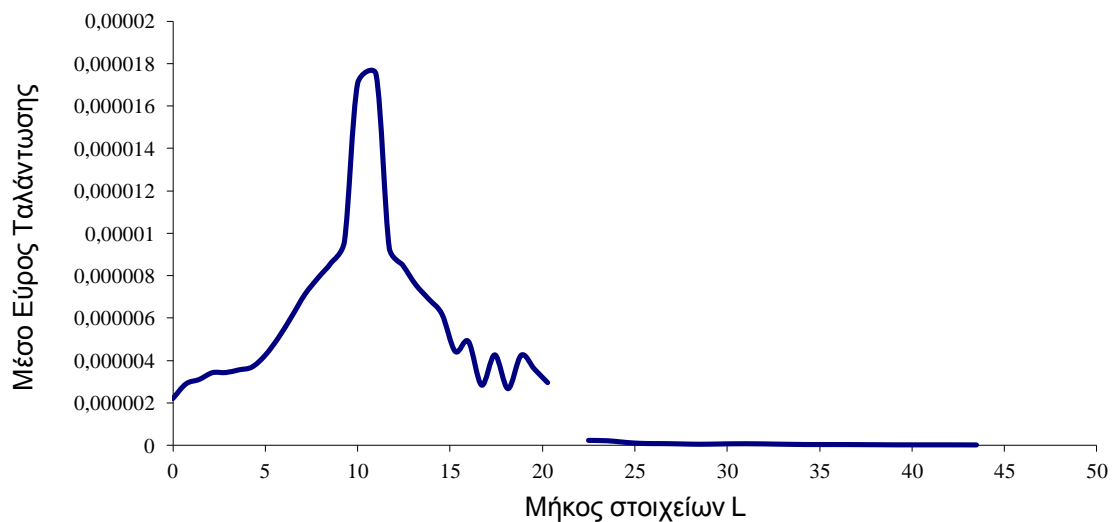




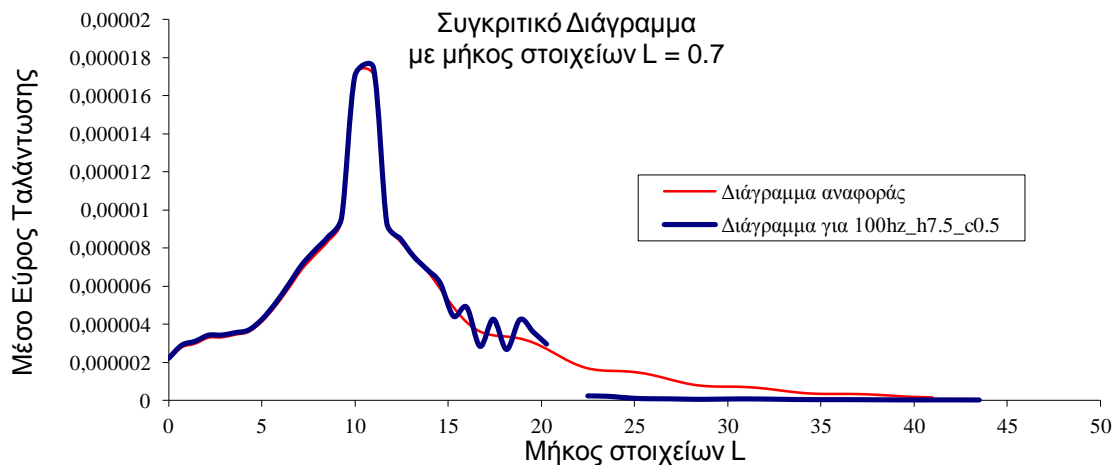
**Εικόνα 4.6.20:** Περίγραμμα μετατοπίσεων για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 100\text{Hz}$  με βάθος ορύγματος  $h = 7,5\text{m}$ , μήκος ορύγματος  $c = 0,5\text{m}$  και μήκος στοιχείων  $l = 0,7\text{m}$



**Εικόνα 4.6.21:** Παραμόρφωση του εδάφους για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 100\text{Hz}$  με βάθος ορύγματος  $h = 7,5\text{m}$ , μήκος ορύγματος  $c = 0,5\text{m}$  και μήκος στοιχείων  $l = 0,7\text{m}$



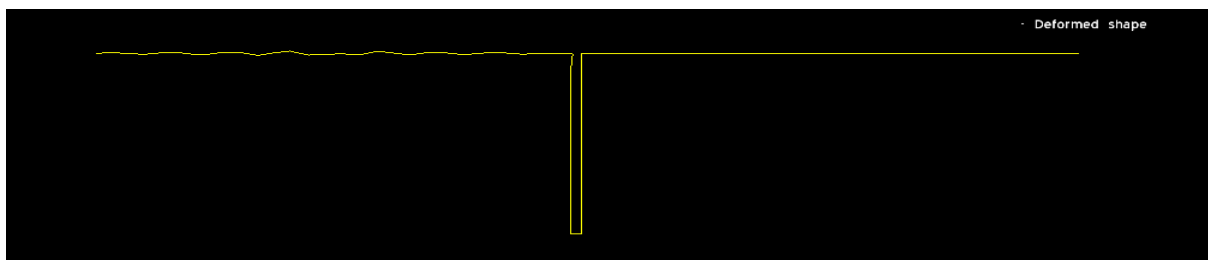
**Διάγραμμα 4.6.23:** Διάγραμμα μεταβολής του συντελεστή μείωσης εύρους σε όλο το μήκος του εδάφους για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 100\text{Hz}$  με βάθος ορύγματος  $h = 7,5\text{m}$ , μήκος ορύγματος  $c = 0,5\text{m}$  και μήκος στοιχείων  $l = 0,7\text{m}$



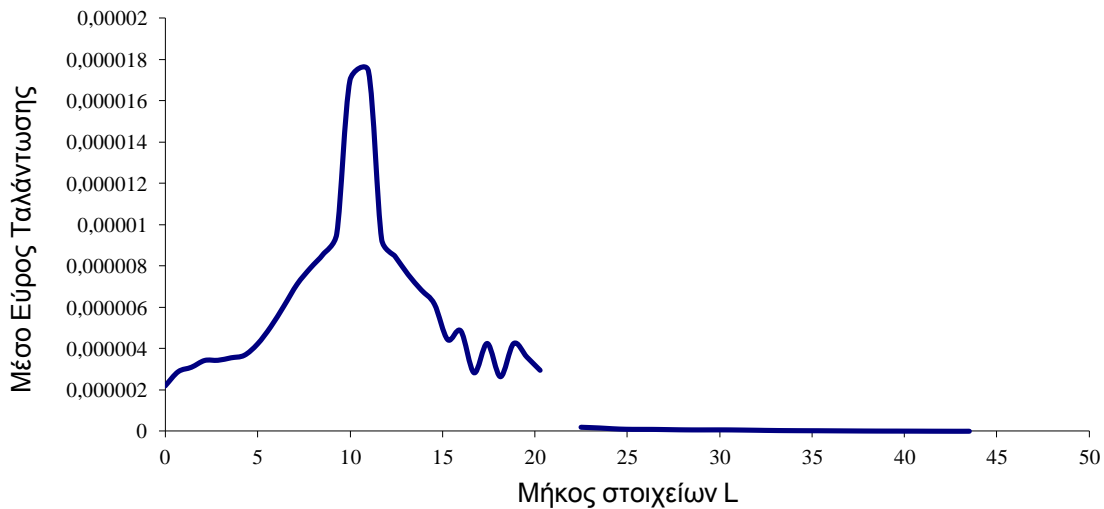
**Διάγραμμα 4.6.24:** Συγκριτικό διάγραμμα για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f=100\text{Hz}$  με βάθος ορύγματος  $h = 7,5\text{m}$ , μήκος ορύγματος  $c = 0,5\text{m}$  και μήκος στοιχείων  $l = 0,7\text{m}$



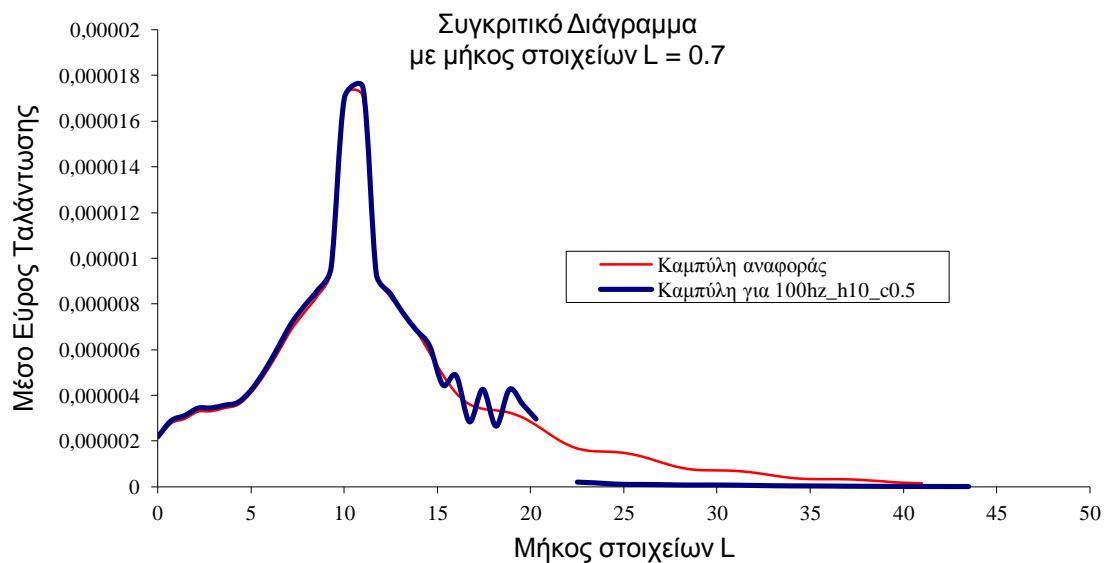
**Εικόνα 4.6.26:** Περίγραμμα μετατοπίσεων για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 100\text{Hz}$  με βάθος ορύγματος  $h = 10\text{m}$ , μήκος ορύγματος  $c = 0,5\text{m}$  και μήκος στοιχείων  $l = 0,7\text{m}$



**Εικόνα 4.6.27:** Παραμόρφωση του εδάφους για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 100\text{Hz}$  με βάθος ορύγματος  $h = 10\text{m}$ , μήκος ορύγματος  $c = 0,5\text{m}$  και μήκος στοιχείων  $l = 0,7\text{m}$



**Διάγραμμα 4.6.25:** Διάγραμμα μεταβολής του συντελεστή μείωσης εύρους σε όλο το μήκος του εδάφους για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 100\text{Hz}$  με βάθος ορύγματος  $h = 10\text{m}$ , μήκος ορύγματος  $c = 0,5\text{m}$  και μήκος στοιχείων  $l = 0,7\text{m}$



**Διάγραμμα 4.6.26:** Συγκριτικό διάγραμμα για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f=100\text{Hz}$  με βάθος ορύγματος  $h = 10\text{m}$ , μήκος ορύγματος  $c = 0,5\text{m}$  και μήκος στοιχείων  $l = 0,7\text{m}$

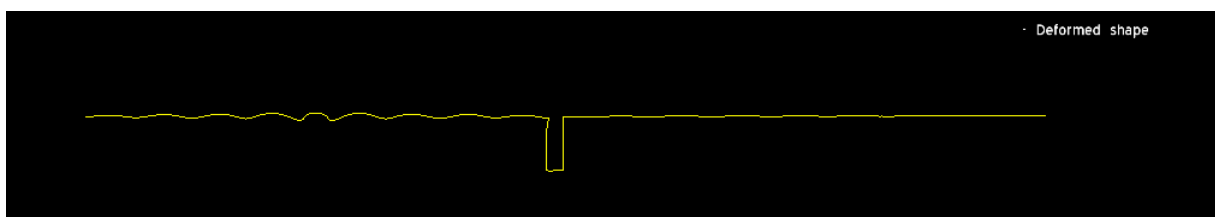
**Πίνακας 4.6.5:** Υπολογισμός του μέσου όρου του εύρους μετατόπισης των διαμήκη κυμάτων με κενό όρυγμα, για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 100\text{Hz}$  με διαφορετικά βάθη ορύγματος ( $h$ ), με μήκος ορύγματος  $c = 0,5\text{m}$  και με μήκος στοιχείων  $l = 0,7\text{m}$

ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ	ΒΑΘΟΣ ΟΡΥΓΜΑΤΟΣ (H)	ΜΗΚΟΣ ΟΡΥΓΜΑΤΟΣ (c)	ΜΕΣΗ ΜΕΤΑΤΟΠΗΣΗ ΚΥΜΑΤΩΝ ΠΡΟΣΤΑΤΕΥΜΕΝΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ	ΜΕΙΩΣΗ ΤΗΣ ΜΕΣΗΣ ΜΕΤΑΤΟΠΗΣΗΣ ΚΥΜΑΤΩΝ(%)	
100Hz	2,5m	0,5m	1,62E-07	76,00842	4,168128
100Hz	5m	0,5m	7,8E-08	88,46527	8,66947
100Hz	7,5m	0,5m	4,76E-08	92,95774	14,19999
100Hz	10m	0,5m	4,21E-08	93,7766	16,06838
100Hz (χωρίς όρυγμα)	0m	0m	6,76E-07		1

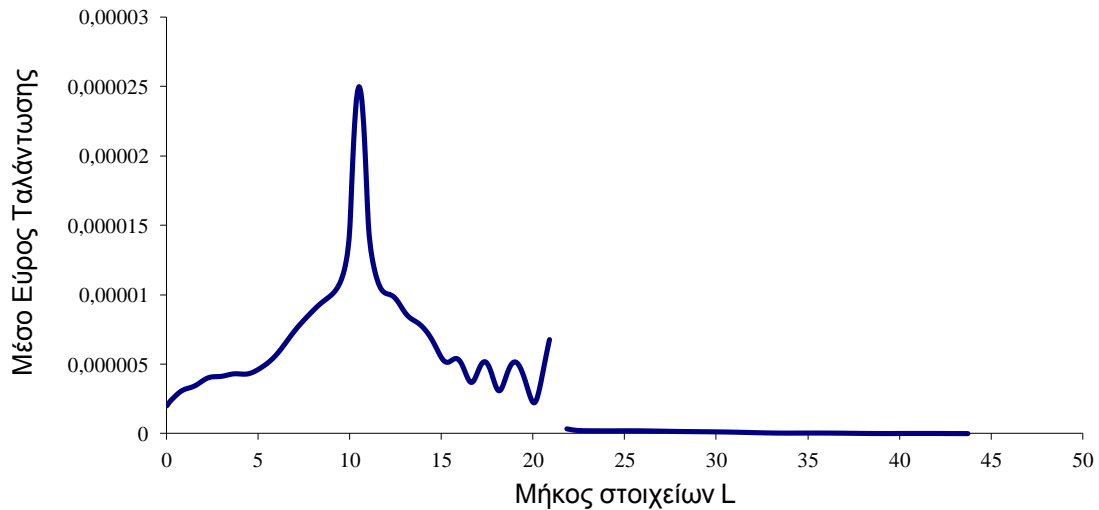
**4.6.3. Αποτελέσματα για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 100\text{Hz}$  με διαφορετικά βάθη ορύγματος, με πλάτος ορύγματος  $c = 0,75\text{m}$  και με μήκος στοιχείων  $L = 0,1\text{m}$ .**



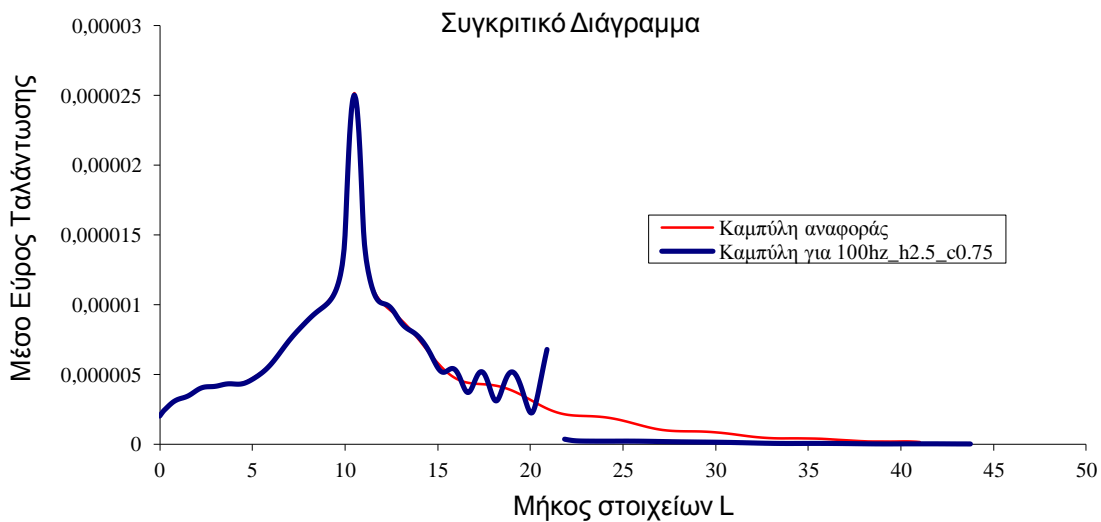
**Εικόνα 4.6.29:** Περίγραμμα μετατοπίσεων για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 100\text{Hz}$  με βάθος ορύγματος  $h = 2,5\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,75\text{m}$



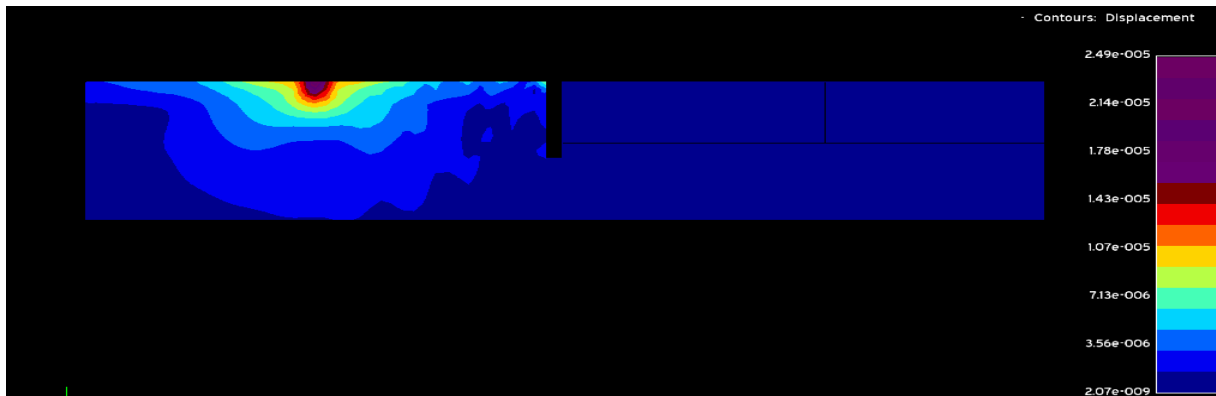
**Εικόνα 4.6.30:** Παραμόρφωση του εδάφους για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 100\text{Hz}$  με βάθος ορύγματος  $h = 2,5\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,75\text{m}$



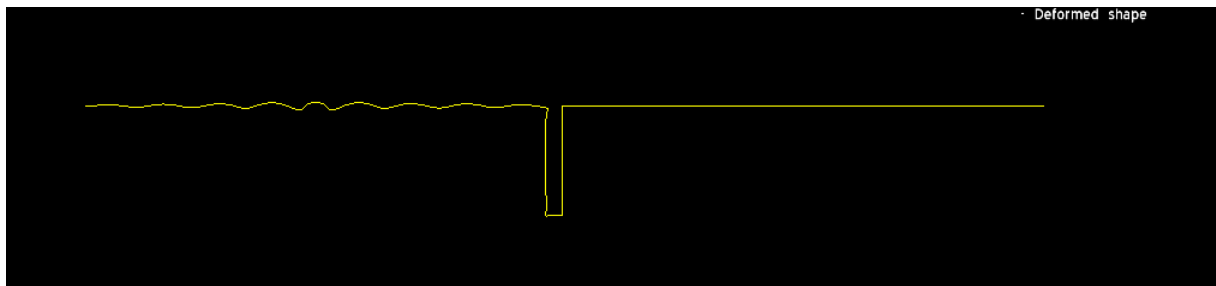
**Διάγραμμα 4.6.28:** Διάγραμμα μεταβολής του συντελεστή μείωσης εύρους σε όλο το μήκος του εδάφους για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 100\text{Hz}$  με βάθος ορύγματος  $h = 2,5\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,75\text{m}$



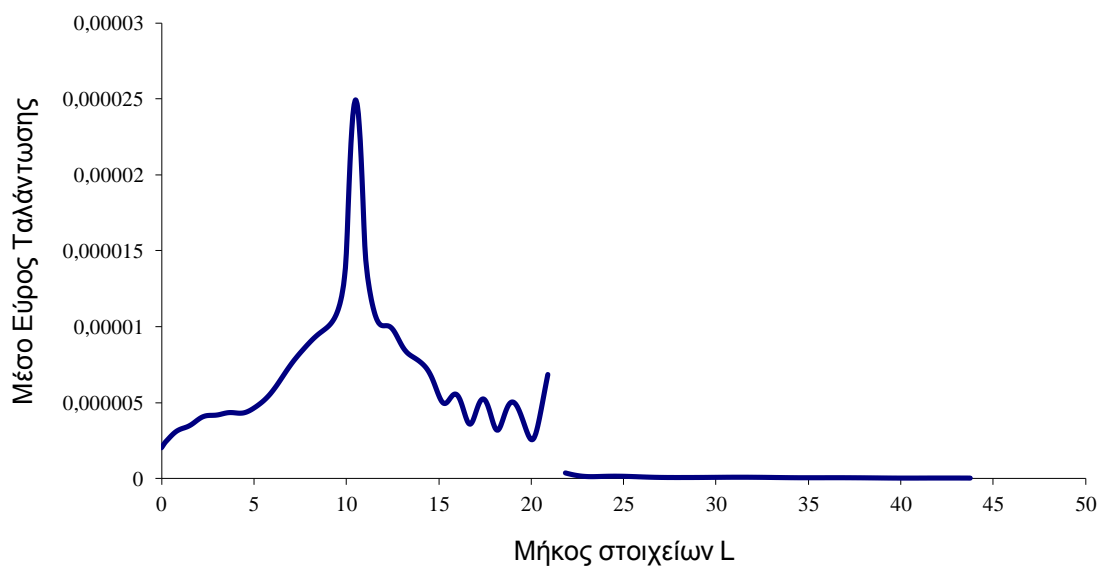
**Διάγραμμα 4.6.29:** Συγκριτικό διάγραμμα για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f=100\text{Hz}$  με βάθος ορύγματος  $h = 2,5\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,75\text{m}$



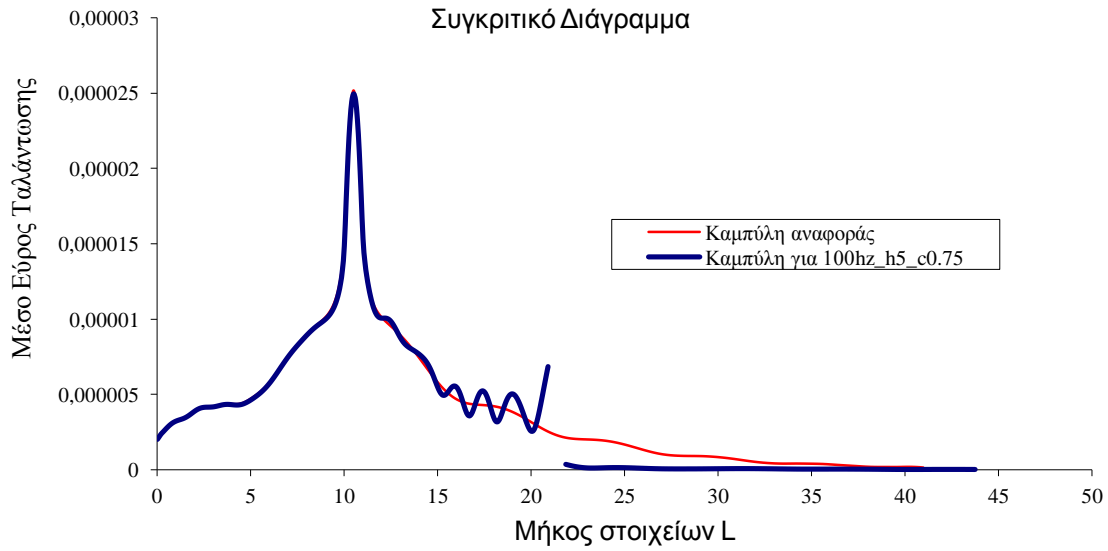
**Εικόνα 4.6.31:** Περίγραμμα μετατοπίσεων για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 100\text{Hz}$  με βάθος ορύγματος  $h = 5\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,75\text{m}$



**Εικόνα 4.6.32:** Παραμόρφωση του εδάφους για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 100\text{Hz}$  με βάθος ορύγματος  $h = 5\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,75\text{m}$



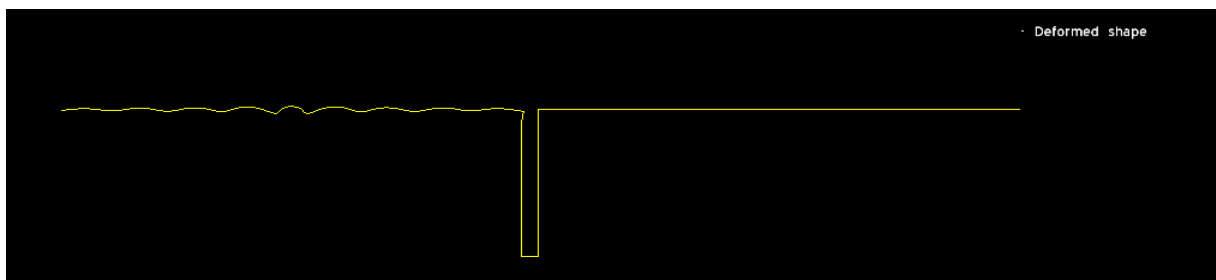
**Διάγραμμα 4.6.30:** Διάγραμμα μεταβολής του συντελεστή μείωσης εύρους σε όλο το μήκος του εδάφους για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 100\text{Hz}$  με βάθος ορύγματος  $h = 5\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,75\text{m}$



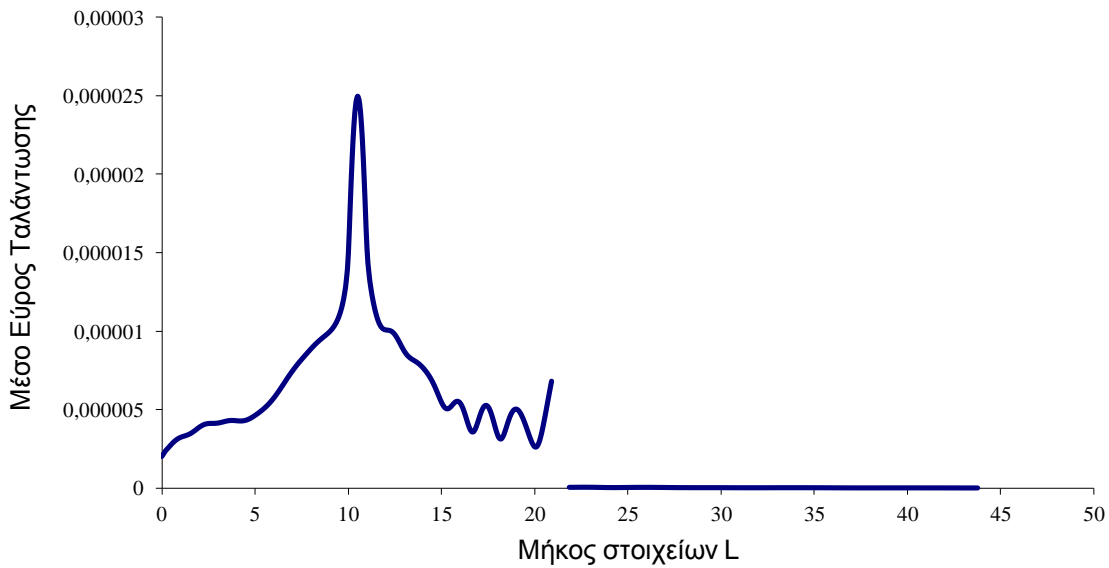
**Διάγραμμα 4.6.31:** Συγκριτικό διάγραμμα για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f=100\text{Hz}$  με βάθος ορύγματος  $h = 5\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,75\text{m}$



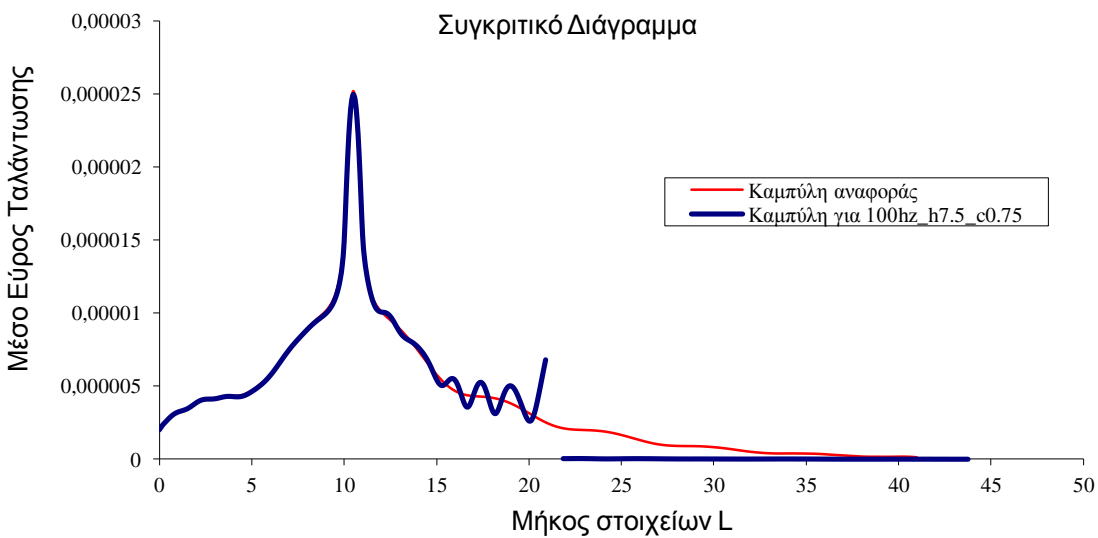
**Εικόνα 4.6.33:** Περίγραμμα μετατοπίσεων για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 100\text{Hz}$  με βάθος ορύγματος  $h = 7,5\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,75\text{m}$



**Εικόνα 4.6.34:** Παραμόρφωση του εδάφους για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 100\text{Hz}$  με βάθος ορύγματος  $h = 7,5\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,75\text{m}$

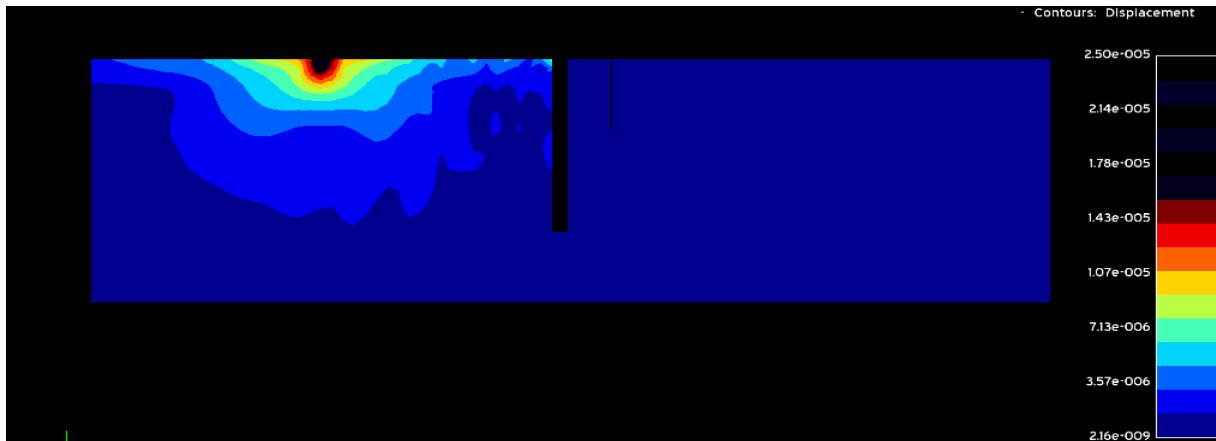


**Διάγραμμα 4.6.32:** Διάγραμμα μεταβολής του συντελεστή μείωσης εύρους σε όλο το μήκος του εδάφους για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 100\text{Hz}$  με βάθος ορύγματος  $h = 7,5\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,75\text{m}$

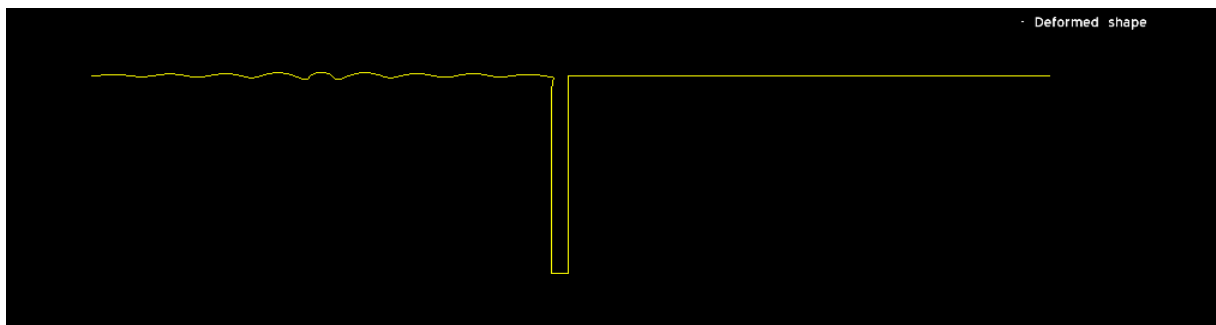


**Διάγραμμα 4.6.33:** Συγκριτικό διάγραμμα για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f=100\text{Hz}$  με βάθος ορύγματος  $h = 7,5\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,75\text{m}$

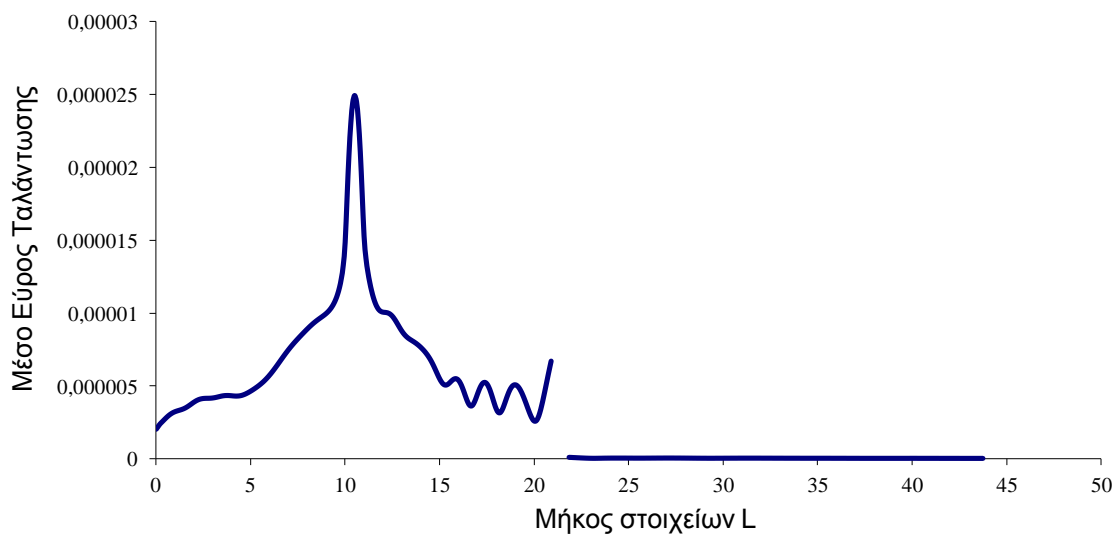




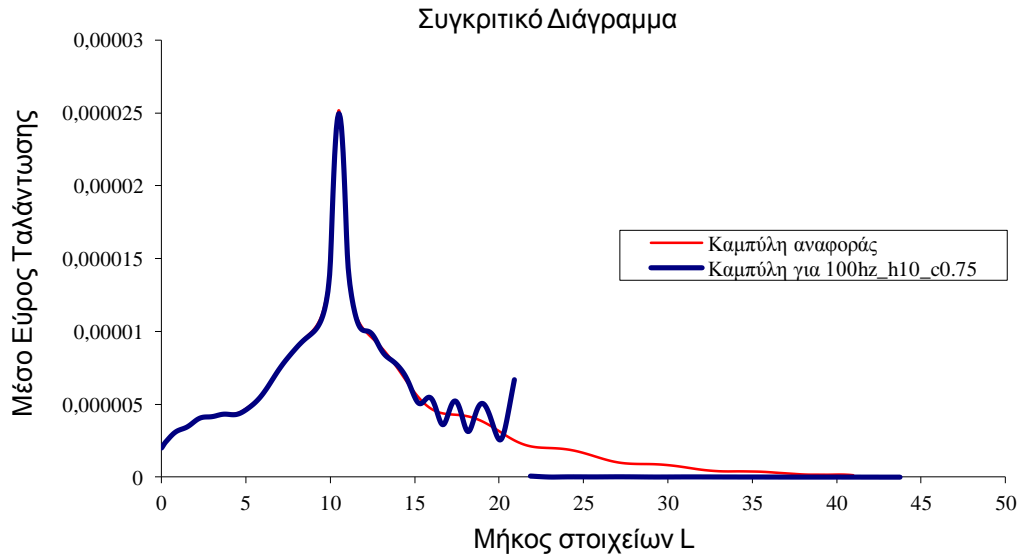
**Εικόνα 4.6.35:** Περίγραμμα μετατοπίσεων για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 100\text{Hz}$  με βάθος ορύγματος  $h = 10\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,75\text{m}$



**Εικόνα 4.6.36:** Παραμόρφωση του εδάφους για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 100\text{Hz}$  με βάθος ορύγματος  $h = 10\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,75\text{m}$



**Διάγραμμα 4.6.34:** Διάγραμμα μεταβολής του συντελεστή μείωσης εύρους σε όλο το μήκος του εδάφους για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 100\text{Hz}$  με βάθος ορύγματος  $h = 10\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,75\text{m}$



**Διάγραμμα 4.6.35:** Συγκριτικό διάγραμμα για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f=100\text{Hz}$  με βάθος ορύγματος  $h=10\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c=0,75\text{m}$

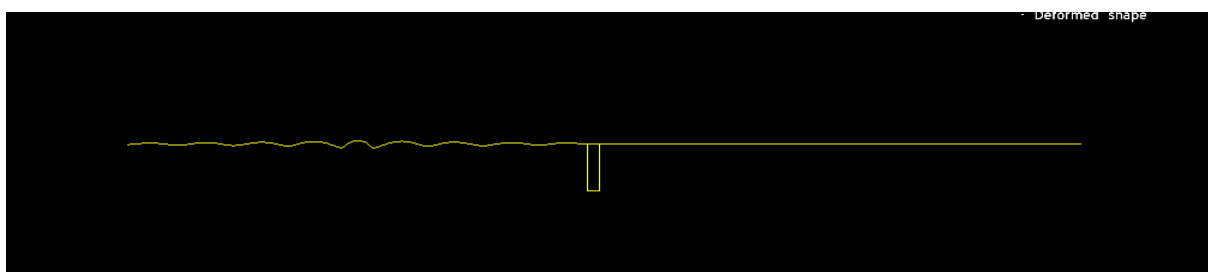
**Πίνακας 4.6.6:** Υπολογισμός του μέσου όρου του εύρους μετατόπισης των διαμήκη κυμάτων με κενό όρυγμα, για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f=100\text{Hz}$  με διαφορετικά βάθη ορύγματος ( $h$ ) και με μήκος ορύγματος  $c=0,75\text{m}$

ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ	ΒΑΘΟΣ ΟΡΥΓΜΑΤΟΣ (H)	ΜΗΚΟΣ ΟΡΥΓΜΑΤΟΣ (c)	ΜΕΣΗ ΜΕΤΑΤΟΠΗΣΗ ΚΥΜΑΤΩΝ ΠΡΟΣΤΑΤΕΥΜΕΝΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ	ΜΕΙΩΣΗ ΤΗΣ ΜΕΣΗΣ ΜΕΤΑΤΟΠΗΣΗΣ ΚΥΜΑΤΩΝ(%)	
100Hz	2,5m	0,75m	1,29388E-07	80,14	5,03
100Hz	5m	0,75m	7,94442E-08	87,80	8,20
100Hz	7,5m	0,75m	2,21658E-08	96,60	29,39
100Hz	10m	0,75m	1,77823E-08	97,27	36,63
100Hz (χωρίς όρυγμα)	0m	0m	6,51381E-07		1

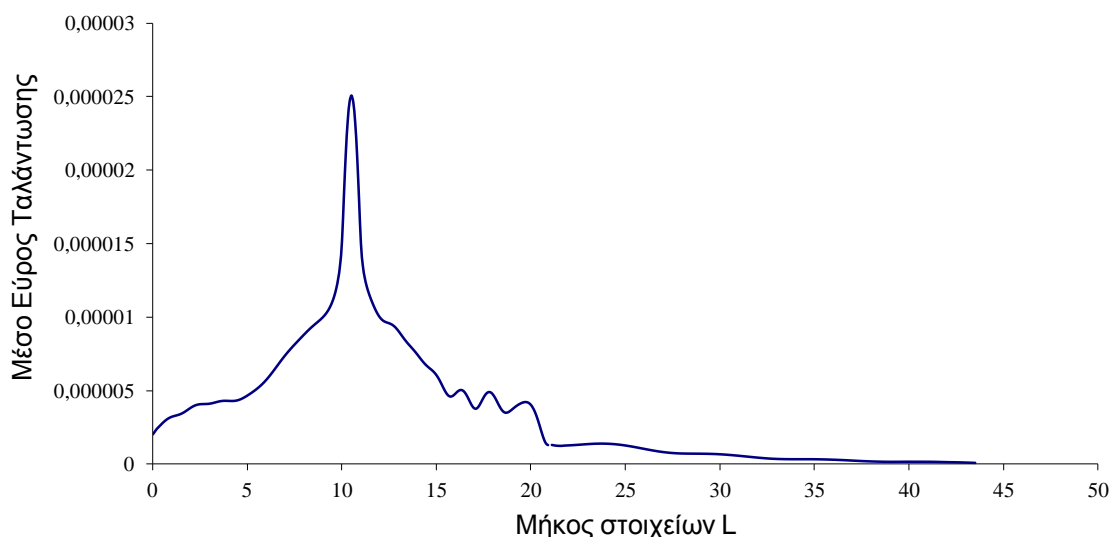
**4.6.4. Αποτελέσματα για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f=100\text{Hz}$  με διαφορετικά βάθη ορύγματος επικαλυμμένου με σκυρόδεμα και με πλάτος ορύγματος  $c=0,5\text{m}$ .**



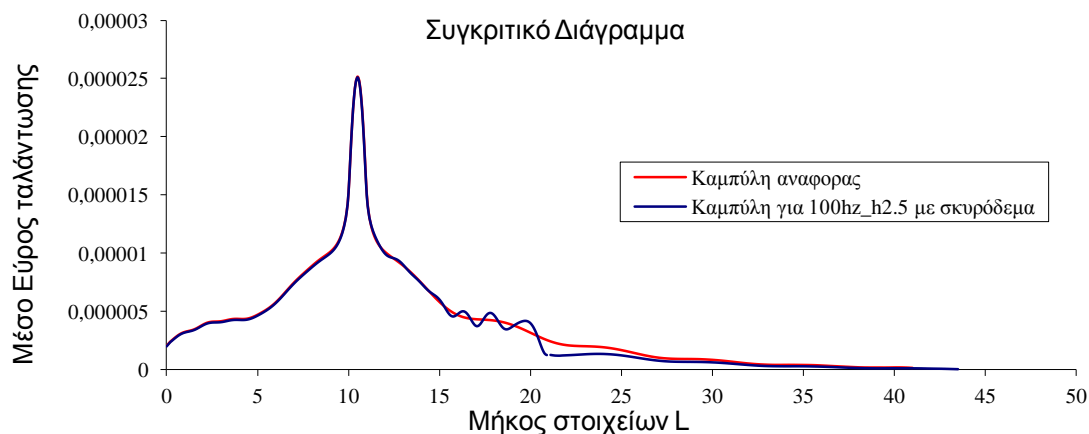
**Εικόνα 4.6.37:** Περίγραμμα μετατοπίσεων για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 100\text{Hz}$  με βάθος επικαλυμμένου με σκυρόδεμα ορύγματος  $h = 2,5\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,5\text{m}$



**Εικόνα 4.6.38:** Παραμόρφωση του εδάφους για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 100\text{Hz}$  με βάθος επικαλυμμένου με σκυρόδεμα ορύγματος  $h = 2,5\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,5\text{m}$



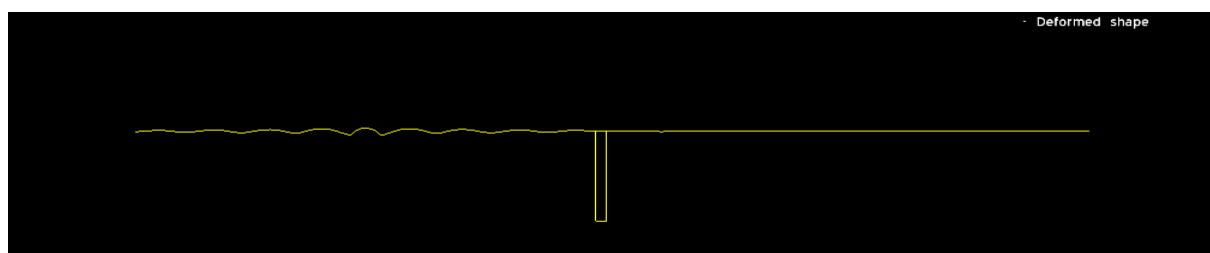
**Διάγραμμα 4.6.36:** Διάγραμμα μεταβολής του συντελεστή μείωσης εύρους σε όλο το μήκος του εδάφους για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 100\text{Hz}$  με βάθος επικαλυμμένου με σκυρόδεμα ορύγματος  $h = 2,5\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,5\text{m}$



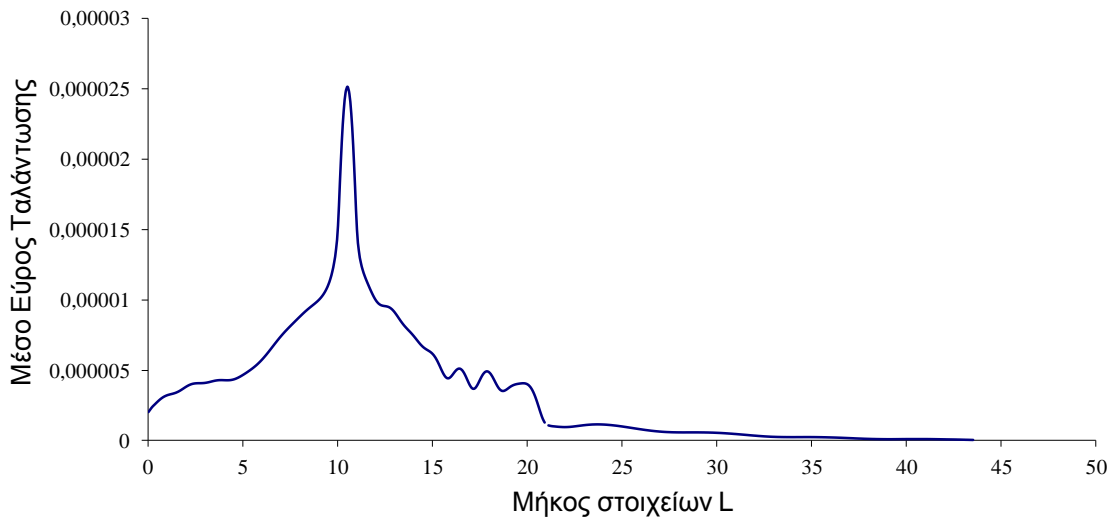
**Διάγραμμα 4.6.37:** Συγκριτικό διάγραμμα για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f=100\text{Hz}$  με βάθος επικαλυμμένου με σκυρόδεμα ορύγματος  $h = 2,5\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,5\text{m}$



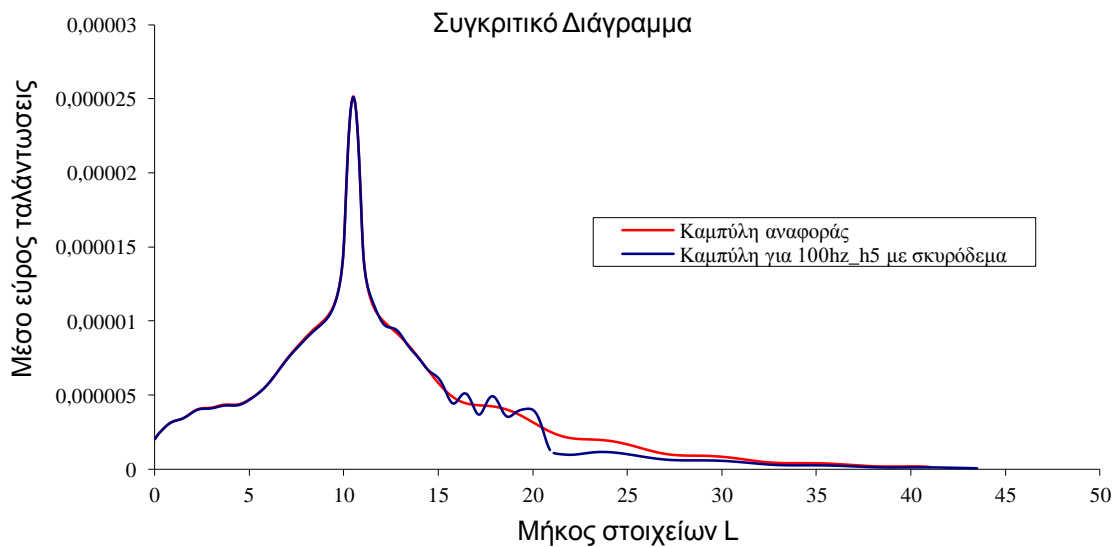
**Εικόνα 4.6.39:** Περίγραμμα μετατοπίσεων για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 100\text{Hz}$  με βάθος επικαλυμμένου με σκυρόδεμα ορύγματος  $h = 5\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,5\text{m}$



**Εικόνα 4.6.40:** Παραμόρφωση του εδάφους για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 100\text{Hz}$  με βάθος επικαλυμμένου με σκυρόδεμα ορύγματος  $h = 5\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,5\text{m}$



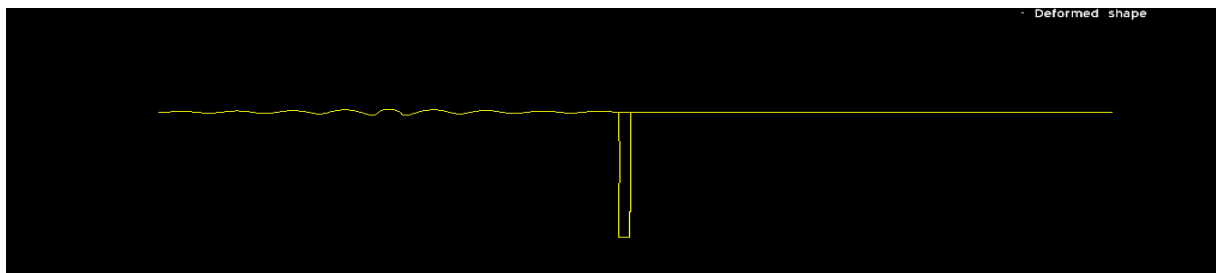
**Διάγραμμα 4.6.38:** Διάγραμμα μεταβολής του συντελεστή μείωσης εύρους σε όλο το μήκος του εδάφους για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 100\text{Hz}$  με βάθος επικαλυμμένου με σκυρόδεμα ορύγματος  $h = 5\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,5\text{m}$



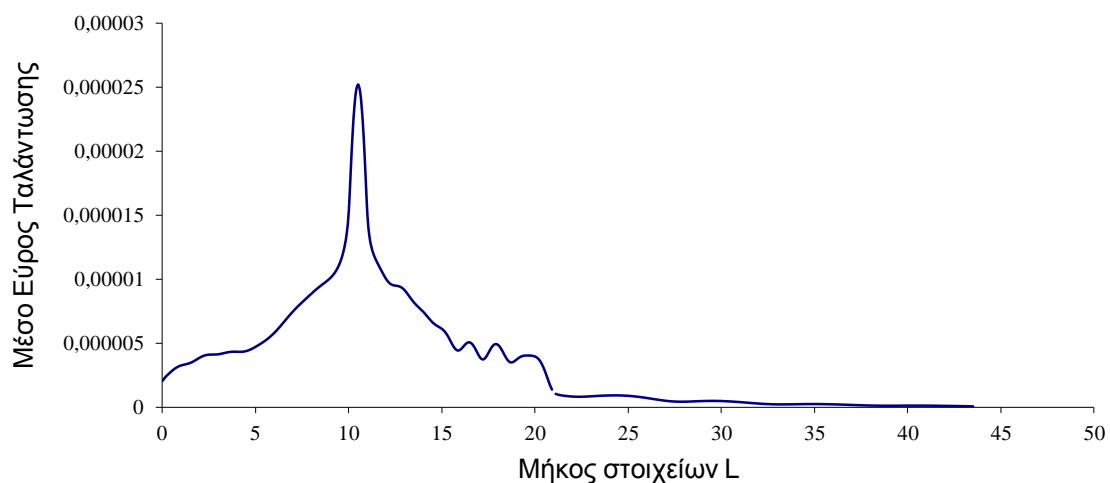
**Διάγραμμα 4.6.39:** Συγκριτικό διάγραμμα για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f=100\text{Hz}$  με βάθος επικαλυμμένου με σκυρόδεμα ορύγματος  $h = 5\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,5\text{m}$



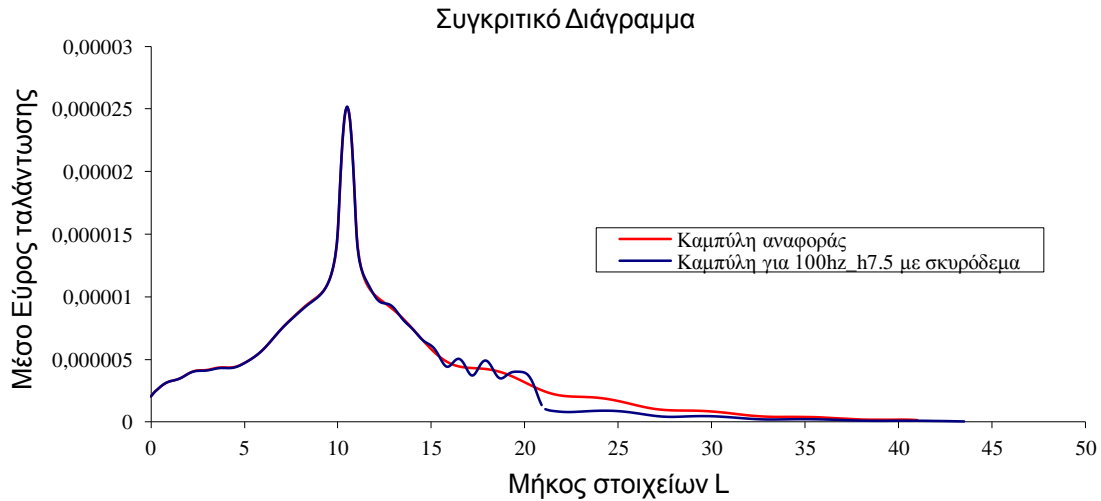
**Εικόνα 4.6.41:** Περίγραμμα μετατοπίσεων για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 100\text{Hz}$  με βάθος επικαλυμμένου με σκυρόδεμα ορύγματος  $h = 7,5\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,5\text{m}$



**Εικόνα 4.6.42:** Παραμόρφωση του εδάφους για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 100\text{Hz}$  με βάθος επικαλυμμένου με σκυρόδεμα ορύγματος  $h = 7,5\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,5\text{m}$



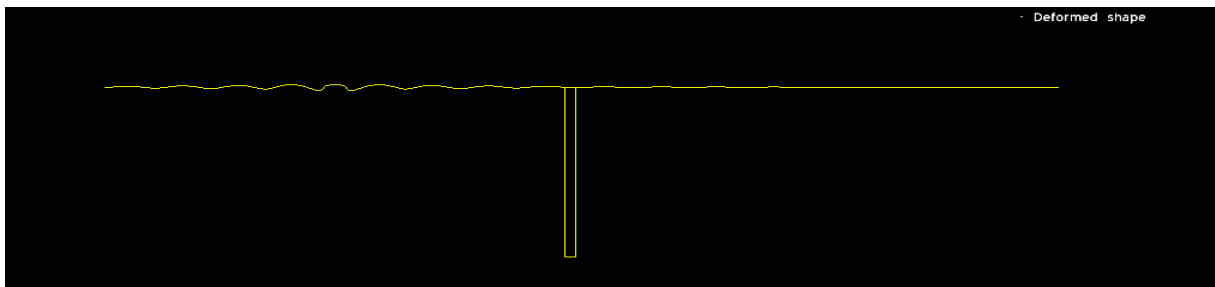
**Διάγραμμα 4.6.40:** Διάγραμμα μεταβολής του συντελεστή μείωσης εύρους σε όλο το μήκος του εδάφους για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 100\text{Hz}$  με βάθος επικαλυμμένου με σκυρόδεμα ορύγματος  $h = 7,5\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,5\text{m}$



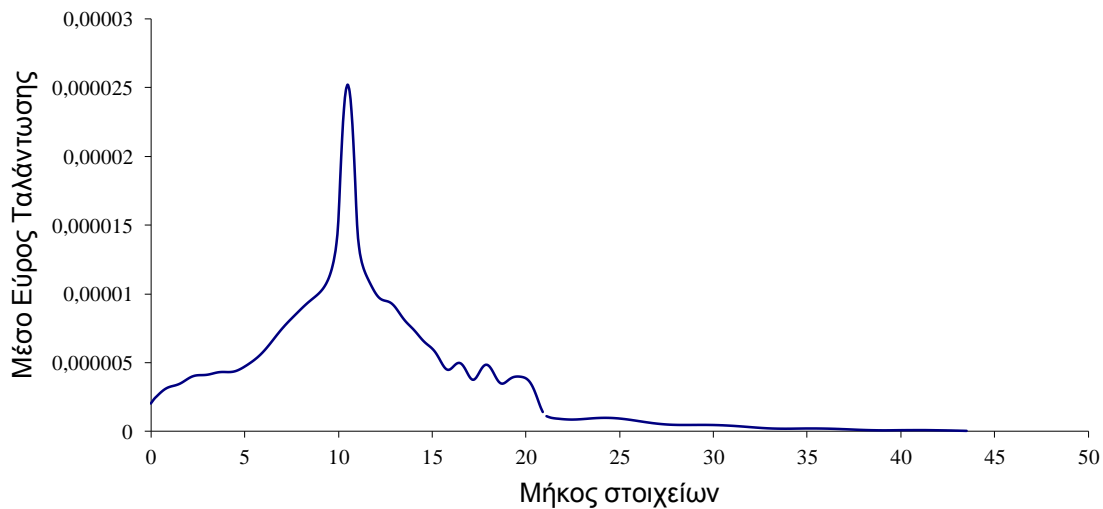
**Διάγραμμα 4.6.41:** Συγκριτικό διάγραμμα για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f=100\text{Hz}$  με βάθος επικαλυμμένου με σκυρόδεμα ορύγματος  $h=7,5\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c=0,5\text{m}$



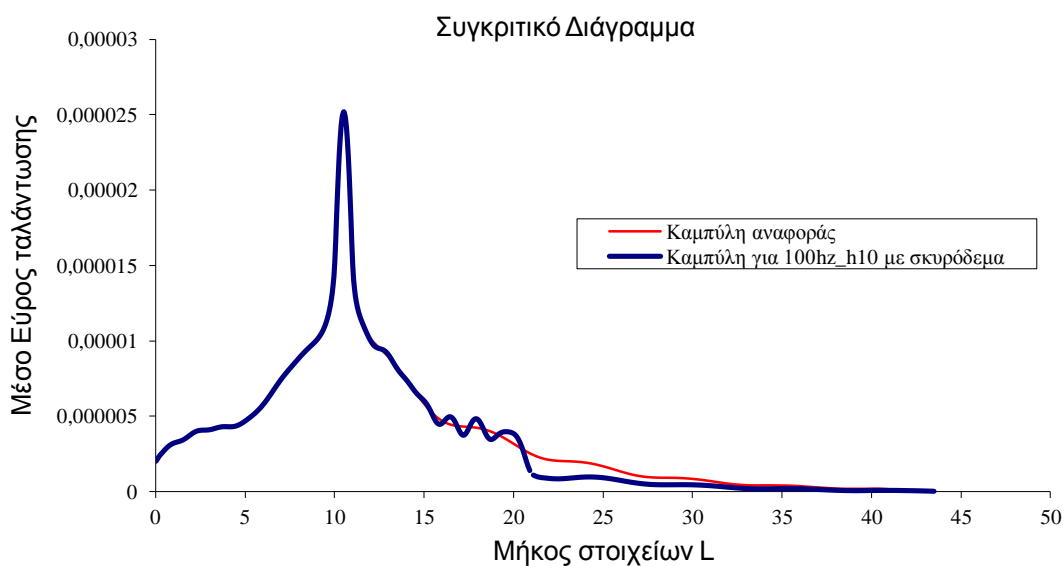
**Εικόνα 4.6.43:** Περίγραμμα μετατοπίσεων για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f=100\text{Hz}$  με βάθος επικαλυμμένου με σκυρόδεμα ορύγματος  $h=10\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c=0,5\text{m}$



**Εικόνα 4.6.44:** Παραμόρφωση του εδάφους για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f=100\text{Hz}$  με βάθος επικαλυμμένου με σκυρόδεμα ορύγματος  $h=10\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c=0,5\text{m}$



**Διάγραμμα 4.6.46:** Διάγραμμα μεταβολής του συντελεστή μείωσης εύρους σε όλο το μήκος του εδάφους για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 100\text{Hz}$  με βάθος επικαλυμμένου με σκυρόδεμα ορύγματος  $h = 10\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,5\text{m}$



**Διάγραμμα 4.6.47:** Συγκριτικό διάγραμμα για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f=100\text{Hz}$  με βάθος επικαλυμμένου με σκυρόδεμα ορύγματος  $h = 10\text{m}$  και μήκος ορύγματος  $c = 0,5\text{m}$



**Πίνακας 4.6.7:** Υπολογισμός του μέσου όρου του εύρους μετατόπισης των διαμήκη κυμάτων επικαλυμμένου με σκυρόδεμα ορύγματος, για συχνότητα αρμονικής δύναμης  $f = 100\text{Hz}$  με διαφορετικά βάθη ορύγματος ( $h$ ) και με μήκος ορύγματος  $c = 0,5\text{m}$

ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ	ΒΑΘΟΣ ΟΡΥΓΜΑΤΟΣ (H)	ΜΗΚΟΣ ΟΡΥΓΜΑΤΟΣ (c)	ΜΕΣΗ ΜΕΤΑΤΟΠΗΣΗ ΚΥΜΑΤΩΝ ΠΡΟΣΤΑΤΕΥΜΕΝΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ	ΜΕΙΩΣΗ ΤΗΣ ΜΕΣΗΣ ΜΕΤΑΤΟΠΗΣΗΣ ΚΥΜΑΤΩΝ(%)	
100Hz	2,5m	0,5m	3,81997E-07	41,36	1,705199
100Hz	5m	0,5m	3,23678E-07	50,31	2,012435
100Hz	7,5m	0,5m	2,71013E-07	58,39	2,403505
100Hz	10m	0,5m	2,85680E-07	56,14	2,280107
100Hz (χωρίς όρυγμα)	0m	0m	6,51381E-07		1

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Αρχικά από την βιβλιογραφική ανασκόπηση, τα συμπεράσματα που διεξήχθησαν, αναφέρονται στις εδαφικές ταλαντώσεις, στα προστατευτικά ορύγματα και στη Μέθοδο των Συνοριακών Στοιχείων.

Αναλυτικότερα, όσον αφορά τις εδαφικές ταλαντώσεις, το πρόβλημα που αυτές δημιουργούν κρίνεται σοβαρό για την καθημερινότητα του ανθρώπου, οπότε και η επίλυσή του καθίσταται αναγκαία. Εν συνεχεία, η χρήση των προστατευτικών ορυγμάτων, παρόλα τα μειονεκτήματά της, θεωρείται ως η αποτελεσματικότερη και η οικονομικότερη μέθοδος απομόνωσης των εδαφικών επιφανειακών ταλαντώσεων. Το επόμενο συμπέρασμα είναι πως η Μέθοδος των Συνοριακών Στοιχείων, όπως πηγάζει από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση, είναι η καταλληλότερη μέθοδος για την επίλυση τέτοιου είδους προβλημάτων.

Κατόπιν, σύμφωνα με τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την προσομοίωση, τα συμπεράσματα που προκύπτουν αφορούν τη συχνότητα της αρμονικής δύναμης συναρτήσει των εδαφικών επιφανειακών ταλαντώσεων, το βάθος και το πλάτος του ορύγματος συναρτήσει αυτών των ταλαντώσεων, καθώς και τα κενά ορύγματα και τα ορύγματα που είναι επικαλυμμένα με σκυρόδεμα.

Πιο συγκεκριμένα, αυξάνοντας τη συχνότητα της αρμονικής δύναμης παρατηρήθηκε η ανοδική πορεία των εδαφικών επιφανειακών ταλαντώσεων. Ένα άλλο συμπέρασμα, είναι πως το βάθος του ορύγματος παίζει καθοριστικό ρόλο στη μείωση των εδαφικών επιφανειακών ταλαντώσεων. Αυτό συμβαίνει, καθώς διαπιστώνεται πως αυξάνοντας το βάθος του ορύγματος επιτυγχάνεται μεγαλύτερη μείωση αυτών των ταλαντώσεων

Ακόμη, παρατηρείτε ότι το πλάτος του ορύγματος επιτυγχάνει αμελητέα μείωση των εδαφικών ταλαντώσεων. Επιπλέον, μέσω των κενών ορυγμάτων, επιτυγχάνεται μείωση των εδαφικών επιφανειακών ταλαντώσεων, η οποία ανέρχεται περίπου έως 90%. Ακολούθως, μέσω των ορυγμάτων, που είναι επικαλυμμένα με σκυρόδεμα, επιτυγχάνεται μείωση των εδαφικών επιφανειακών ταλαντώσεων, η οποία ανέρχεται περίπου έως 44%.

Τέλος, μέσω της προσομοίωσης του συγκεκριμένου προβλήματος και συγκρίνοντας τις τιμές, συμπεραίνεται ότι το καταλληλότερο βάθος του ορύγματος είναι αυτό των 7,5 μέτρων. Με αυτό το βάθος επιτυγχάνεται μεγάλη μείωση των εδαφικών επιφανειακών ταλαντώσεων, η μείωση αυτή είναι περίπου ίση με τη μέγιστη τιμή μείωσης, η οποία είναι αυτή που επιτυγχάνεται με βάθος ορύγματος 100 μέτρα. καταλήγουμε, λοιπόν, πως με βάθος ορύγματος 7,5 μέτρων έχουμε μέγιστη μείωση ταλαντώσεων με μικρότερο κόστος και μικρότερο χρόνο εργασίας

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

### Ελληνόγλωσση Βιβλιογραφία

1. Αθανασόπουλος, Α. Γ., Ιωάννου, Ν. Σ (2006) «Σεισμική Μόνωση Θεμελιώσεων Έναντι Ανθρωπογενών Εδαφικών Ταλαντώσεων – Η Μέθοδος του Τεχνητού Υπόβαθρου», 5<sup>ο</sup> πανελλήνιο Συνέδριο Γεωτεχνικής & Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής, ΤΕΕ, Ξάνθη, 31/5 – 2/6/2006 στο [http://library.tee.gr/digital/m2134/m2134\\_athanasopoulos.pdf](http://library.tee.gr/digital/m2134/m2134_athanasopoulos.pdf) [Πρόσβαση στις 4/12/2013]
2. Καπής, Σ. Ε., (1997) Αριθμητική Επίλυση Προβλημάτων Απομόνωσης Κατασκευών από Επιφανειακά Ελαστικά Κύματα, αδημοσίευτη διδακτορική διατριβή, Πανεπιστήμιο Πατρών
3. Κατσικαδέλης, Ι. (2012) *Συνοριακά Στοιχεία: Θεωρία και Εφαρμογές*, Αθήνα: Συμμετρία
4. Κρητικάκης, Γ. (2010) *Επιφανειακά Κύματα: Εφαρμογές σε Περιβαλλοντικά και Γεωτεχνικά Προβλήματα*, αδημοσίευτη διδακτορική διατριβή, πολυτεχνείο Κρήτης στο <http://poseidon.library.tuc.gr/artemis/PD2010-0014/PD2010-0014.pdf> [Πρόσβαση στις 14/2/2014]
5. Παναγιωτόπουλος, Χ. (2009) *Η Μέθοδος των Συνοριακών Στοιχείων διατυπωμένη με θεώρημα αμοιβαιότητας σε όρους ταχυτήτων: Θεωρητική προσέγγιση και προγραμματισμός σε Η/Υ*, αδημοσίευτη διδακτορική διατριβή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης στο <http://invenio.lib.auth.gr/record/114282/files/PanagiotopoulosDissertation.pdf> [Πρόσβαση στις 20/9/2014]
6. Hamdan, H. (2004) *Ανάπτυξη Μεθόδου Εξασθένησης Πολλαπλών Ανακλώμενων κυμάτων σε Καταγραφές Γεωραντάρ και Εφαρμογή σε Περιβαλλοντικά Προβλήματα*, αδημοσίευτη μεταπτυχιακή εργασία, πολυτεχνείο Κρήτης στο <http://dias.library.tuc.gr/view/16233> [Πρόσβαση στις 14/01/2014]

### Ξενόγλωσση Βιβλιογραφία

1. Adam M., Estorff O., (2004) «Reduction of train-induced building vibrations by using open and filled trenches», *Computers and Structures* vol.83, (2005), pp 11–24 στο [http://bu.edu.eg/portal/uploads/Engineering,%20Shoubra/Civil%20Engineering/2431/publications/Maher%20Abd%20El-Rahman%20Ibrahim%20Adam\\_PAPER\\_03.pdf](http://bu.edu.eg/portal/uploads/Engineering,%20Shoubra/Civil%20Engineering/2431/publications/Maher%20Abd%20El-Rahman%20Ibrahim%20Adam_PAPER_03.pdf) [Πρόσβαση στις 4/12/2013]
2. Boo Hyun Nam et al, (2013) «A Review on the Effects of Earthborne Vibrations and the Mitigation Measures», *IJR International Journal of Railway* Vol. 6, No. 3 / September 2013, pp. 95-106 στο [http://www.ijr.or.kr/On\\_line/admin/files/\(095-106\)-13-010.pdf](http://www.ijr.or.kr/On_line/admin/files/(095-106)-13-010.pdf) [Πρόσβαση στις 4/12/2013]

3. Boundary Element Method Software & services, (2012) στο [http://www.bemsands.com/index.php?option=com\\_content&task=view&id=54&Itemid=56](http://www.bemsands.com/index.php?option=com_content&task=view&id=54&Itemid=56) [Πρόσβαση στις 22/8/2014]
4. Celebi, E., Schmid G. (2005) «Investigation of ground vibrations induced by moving loads», *Engineering Structures* 27 (2005) 1981–1998 στο <http://web.sakarya.edu.tr/~ecelebi/5111.pdf> [Πρόσβαση στις 6/12/2013]
5. Porbaha, A., Kim, J. (2003) «Deep Mixing Technology to Mitigate Ground Vibration Induced by High – Speed Trains», *Transportation Research Board* στο [http://www.ltrc.lsu.edu/TRB\\_82/TRB2003-002212.pdf](http://www.ltrc.lsu.edu/TRB_82/TRB2003-002212.pdf) [Πρόσβαση στις 27/12/2013]
6. Guang Yun et al.,(2008) «3D analysis of in-filled trench as passive barriers for ground vibration isolation» *Science in China Series G: Physics, Mechanics & Astronomy* , October 2008, Volume 51, Issue 10, pp 1573-1585 στο <http://phys.scichina.com:8083/sciGe/fileup/PDF/08yg1573.pdf> [Πρόσβαση στις 29/12/2013]
7. Jain, Soni, D. K., (2007) «Foundation Vibration Isolation Methods», *3rd WSEAS International Conference on Applied and Theoretical Mechanics*, Spain, December 14-16, 2007 στο <http://www.wseas.us/e-library/conferences/2007tenerife/papers/572-459.pdf> [Πρόσβαση στις 15/01/2014]
8. Jesmani et al, (2011) «Study of Passive Isolation of Deep Foundations in Sandy Soil by Rectangular Trenches», *Ejge* Vol. 16 , 2011, Bund. Q, pp 1297 – 1318 στο <http://www.ejge.com/2011/Ppr11.151/Ppr11.151alr.pdf> [Πρόσβαση στις 17/01/2014]
9. Orehov, V. V. et al (2012) «Investigation Effects of Trench Barrier on the Reducing Energy of Surface Waves in Soils », *World Conference on Earthquake Engineering*, Lisboa, 2012 στο [http://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/WCEE2012\\_5519.pdf](http://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/WCEE2012_5519.pdf) [Πρόσβαση στις 24/1/2014]
10. Polyzos, D. , (2012), «Research project», *University of Patras* στο [http://www.aml.mech.upatras.gr/attachments/article/78/new-polyzos\\_english\\_cv\\_June2012.pdf](http://www.aml.mech.upatras.gr/attachments/article/78/new-polyzos_english_cv_June2012.pdf) [Πρόσβαση στις 22/08/2014]
11. Rahman, E., Orr, L. L. (2006) « A Parametric Study of Backfilled Trench for Reduction of TBM Induced Ground Vibrations», *The Thirteenth International Congress on Sound Vibration* ,Vienna, 2 – 6 July, 2006 στο [http://www.iiav.org/archives\\_icsv/2006\\_icsv13/pdf/icsv13final00258.pdf](http://www.iiav.org/archives_icsv/2006_icsv13/pdf/icsv13final00258.pdf) [Πρόσβαση στις 23/03/2014]
12. Venkatramaiah, C. (2006) *Geotechnical Engineering*, Third Edition, New Age International Publishers στο <http://books.google.gr/books?id=ftzs8hDiAJgC&pg=PA856&lpg=PA856&dq=barkan+1962&source=bl&ots=IzHNtbYqRV&sig=HiCGwFeRhuGjaPtQyQVczdlniA&hl=el&sa=X&ei=5d9iUuP8E4TNswaHloC4Ag&ved=0CD8Q6AEwAg#v=onepage&q=barkan%201962&f=false> [Πρόσβαση στις 18/03/2014]
13. Wu, B.S.,(1997) *Finite Element Study of Vibration Isolation Using an Underground Trench*, a dissertation, Texas Tech University στο <http://repositories.tdl.org/ttu-ir/bitstream/handle/2346/21269/31295012202619.pdf?sequence=1> [Πρόσβαση στις 16/02/2014]

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Ολόκληρο το πρόγραμμα προσομοίωσης για συχνότητα αρμονικής δύναμης 25hz, βάθος ορύγματος  $h = 2,5\text{m}$  και πλάτος ορύγματος  $c = 0,5\text{m}$

```
#-----
# model1 - 25 - 11 - 2013. 1o modelo gia syxnothta 25hz,vathos 2,5m kai
# platos 0,5m
# Doyleyw se m, N, sec
#-----

##### Problem Parameters
# Geomertia
a = 1.0
b = 10.0
c = 0.5
d = 14.0
e = 10.0
d = c/2 + e /2 + 2.0
h = 2.5
g = 4.0
k = 10.
l = 10.
m = 2.0
p = 4.0

# Syxnotita fortioy
freq = 25. # Hz
omega = 2.0 * 3.1415 * freq

# Megethos dynamis
loadp = 10000.0
t0 = loadp / a

# Idiotites edafous
eyoung = 330.0e6 # mesis pyknotita ammodes
poisson = 0.25
density = 1750.0
damping = 0.06

# mikos stoixeiou poy tha ftiaxtei
divlen = 0.1 # na to ftiakseis aytomata me vasi to omega,
ndivperwavelength
divlen_int = 0.5 # na to ftiakseis aytomata me vasi to omega,
ndivperwavelength
elem_type = EL2LL ## elem_type = EL3QL

# create points
x_temp = 0.0
y_temp = 0.0
pt1=ptCreateCoord(0, x_temp, y_temp, 0)
x_temp = k
pt2=ptCreateCoord(0, x_temp, y_temp, 0)
x_temp = x_temp + a
pt3=ptCreateCoord(0, x_temp, y_temp, 0)
x_temp = x_temp + b
pt4=ptCreateCoord(0, x_temp, y_temp, 0)
y_temp = y_temp - h
```

```

pt5=ptCreateCoord(0, x_temp, y_temp, 0)
x_temp = x_temp + c
pt6=ptCreateCoord(0, x_temp, y_temp, 0)
y_temp = y_temp + h
pt7=ptCreateCoord(0, x_temp, y_temp, 0)
x_temp = x_temp + m
pt8=ptCreateCoord(0, x_temp, y_temp, 0)
x_temp = x_temp + e
pt9=ptCreateCoord(0, x_temp, y_temp, 0)
x_temp = x_temp + l
pt10=ptCreateCoord(0, x_temp, y_temp, 0)
x_temp = 0.0
y_temp = - 0.01
pt11=ptCreateCoord(0, x_temp, y_temp, 0)
y_temp = y_temp- h - p
pt12=ptCreateCoord(0, x_temp, y_temp, 0)
x_temp = x_temp + k + a + b - 0.01
pt13=ptCreateCoord(0, x_temp, y_temp, 0)
x_temp = x_temp + c + 0.02
pt14=ptCreateCoord(0, x_temp, y_temp, 0)
x_temp= + k + a + b - 0.01
y_temp= - 0.01
pt15=ptCreateCoord(0, x_temp, y_temp, 0)
x_temp=+ k + a + b + c + 0.01
pt16=ptCreateCoord(0, x_temp, y_temp, 0)
y_temp= y_temp - h
pt17=ptCreateCoord(0, x_temp, y_temp, 0)
x_temp= + k + a + b - 0.01
pt18=ptCreateCoord(0, x_temp, y_temp, 0)
x_temp= + k + a + b + c + m
y_temp= - 0.01
pt19=ptCreateCoord(0, x_temp, y_temp, 0)
y_temp= - g
pt20=ptCreateCoord(0, x_temp, y_temp, 0)
y_temp= - g - 0.01
x_temp= x_temp - 0.01
pt21=ptCreateCoord(0, x_temp, y_temp, 0)
y_temp= - 0.01
pt22=ptCreateCoord(0, x_temp, y_temp, 0)
x_temp= + k + a + b + c + 0.01
y_temp= y_temp - g
pt23=ptCreateCoord(0, x_temp, y_temp, 0)
y_temp= - g
x_temp= + k + a + b + c + m + e
pt24=ptCreateCoord(0, x_temp, y_temp, 0)
y_temp= - 0.01
pt25=ptCreateCoord(0, x_temp, y_temp, 0)
x_temp= x_temp + 0.01
pt26=ptCreateCoord(0, x_temp, y_temp, 0)
y_temp= - g
pt27=ptCreateCoord(0, x_temp, y_temp, 0)
x_temp= x_temp + l - 0.01
pt28=ptCreateCoord(0, x_temp, y_temp, 0)
y_temp= - 0.01
pt29=ptCreateCoord(0, x_temp, y_temp, 0)
y_temp= y_temp - g
pt30=ptCreateCoord(0, x_temp, y_temp, 0)
y_temp= - h - g - 0.01
x_temp= + k + a + b + c + m + e + l
pt31=ptCreateCoord(0, x_temp, y_temp, 0)

```

```

# create lines
ln1=strlnCreatePt(0, pt1, pt2)
ln2=strlnCreatePt(0, pt2, pt3)
ln3=strlnCreatePt(0, pt3, pt4)
ln4=strlnCreatePt(0, pt4, pt5)
ln5=strlnCreatePt(0, pt5, pt6)
ln6=strlnCreatePt(0, pt6, pt7)
ln7=strlnCreatePt(0, pt7, pt8)
ln8=strlnCreatePt(0, pt8, pt9)
ln9=strlnCreatePt(0, pt9, pt10)

ln10=strlnCreatePt(0, pt11, pt12)
ln11=strlnCreatePt(0, pt12, pt13)
ln12=strlnCreatePt(0, pt15, pt11)

ln13=strlnCreatePt(0, pt13, pt18)
ln14=strlnCreatePt(0, pt18, pt15)
ln15=strlnCreatePt(0, pt13, pt14)
ln16=strlnCreatePt(0, pt14, pt23)
ln17=strlnCreatePt(0, pt23, pt17)
ln18=strlnCreatePt(0, pt16, pt17)
ln19=strlnCreatePt(0, pt16, pt22)
ln20=strlnCreatePt(0, pt22, pt21)
ln21=strlnCreatePt(0, pt18, pt17)
ln22=strlnCreatePt(0, pt23, pt21)

ln23=strlnCreatePt(0, pt20, pt24)
ln24=strlnCreatePt(0, pt24, pt25)
ln25=strlnCreatePt(0, pt25, pt19)
ln26=strlnCreatePt(0, pt19, pt20)

ln27=strlnCreatePt(0, pt27, pt28)
ln28=strlnCreatePt(0, pt28, pt29)
ln29=strlnCreatePt(0, pt29, pt26)
ln30=strlnCreatePt(0, pt26, pt27)

ln31=strlnCreatePt(0, pt14, pt31)
ln32=strlnCreatePt(0, pt31, pt30)
ln33=strlnCreatePt(0, pt30, pt21)

#ftiaxnw epifanies

# surface 1

srfid1 = plnSrfCreateLn(0, (ln10,ln11, ln13, ln14, ln12))
ipCreateAutoOnSurface (srfid1, divlen_int)

# surface 2

srfid2 = plnSrfCreateLn(0, (ln13,ln15, ln16, ln17,ln21))
ipCreateAutoOnSurface (srfid2, divlen_int)

# surface 3

srfid3 = plnSrfCreateLn(0, (ln16,ln31, ln32, ln33,ln22))
ipCreateAutoOnSurface (srfid3, divlen_int)

# surface 4

srfid4 = plnSrfCreateLn(0, (ln17,ln22, ln20, ln19,ln18))
ipCreateAutoOnSurface (srfid4, divlen_int)

```

```

# surface 5

srfid5 = plnSrfCreateLn(0, (ln26,ln23, ln24, ln25))
ipCreateAutoOnSurface (srfid5, divlen_int)

# surface 6

srfid6 = plnSrfCreateLn(0, (ln30,ln27, ln28, ln29))
ipCreateAutoOnSurface (srfid6, divlen_int)

# Antistrofi epifaniwn
srfReverse(1)
srfReverse(3)
srfReverse(5)
srfReverse(6)

modelSet2dInplane() # set model as 2d

# create the material
matid = matCreate(0, "soil", LINEAR_ELASTIC, (eyoung, poisson,
density,damping))

# create the region
regid = 1
regid=regCreate(regid, "soil", matid)

# attach the lines to the region
lines = getSelected(LINES)
regAttachLine (regid, lines)

# attach the internal point surface into the region
regAttachSurface (regid, srfid1)
regAttachSurface (regid, srfid2)
regAttachSurface (regid, srfid3)
regAttachSurface (regid, srfid4)
regAttachSurface (regid, srfid5)
regAttachSurface (regid, srfid6)

## set the mesh size to the lines

lines = getSelected(LINES)
lnMeshSetSize(( 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 ), divlen)

# mesh the lines
lines = getSelected(LINES)
lnMesh( 1, elem_type)
lnMesh( 2, elem_type)
lnMesh( 3, elem_type)
lnMesh( 4, elem_type)
lnMesh( 5, elem_type)
lnMesh( 6, elem_type)
lnMesh( 7, elem_type)
lnMesh( 8, elem_type)
lnMesh( 9, elem_type)

lnReverse (lines, True)

## merge the possible double nodes

```

```

ndMerge()
## renumber nodes
ndRenumber()

## create a load case
loadcaseid = 1
# mainLC = loadCaseCreateStatic(loadcaseid, "Static Case")
mainLC = loadCaseCreateHarmonic(loadcaseid, "HarmonicCase", (omega,),
(0.0,))
loadCaseSetDefaultZeroField(loadcaseid, FIELD_T)

#
# Attach the region to the loadcase
loadCaseAttachReg(loadcaseid, regid)
#
# Set BCs
selectById(LINES, ln2, ln2 )
selectAttachedTo(ELEMENTS, LINES)
elemlist=getSelected(ELEMENTS)

value_im = 0.0
y_dir=1
loadCaseApplyElemBC (loadcaseid, 0, 0, elemlist, FIELD_T, y_dir, t0,
value_im)

####
selectAllEntities()
loadCaseSetActive(mainLC)
#loadCaseSolveActive( False )
#loadCaseReadResultsActive()

```