

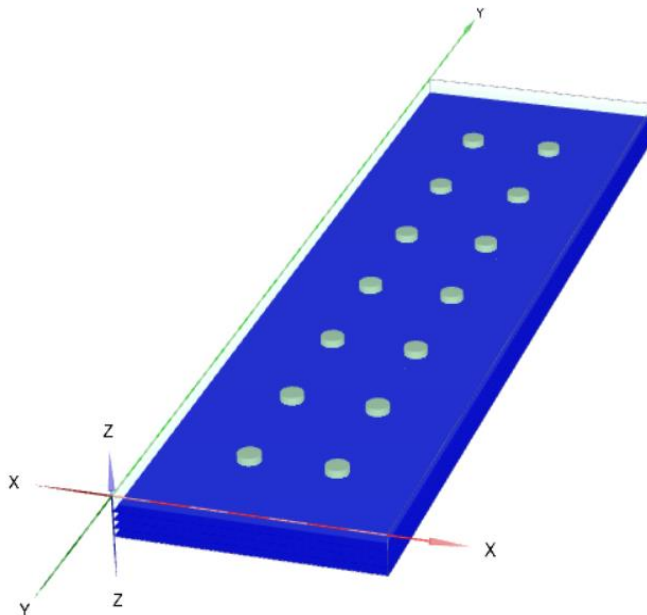


Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο  
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών  
Τομέας Γεωτεχνικής

National Technical University of Athens  
School of Civil Engineering  
Geotechnical Division

Διπλωματική εργασία  
**ΑΓΓΕΛΟΠΟΥΛΟΥ ΧΡΥΣΟΥΛΑ-ΜΑΡΙΑ**  
Επιβλέπων:  
Αναπληρωτής Καθηγητής Ν. Γερόλυμος

**Εφαρμογή Μεταϋλικών στη Θεμελίωση Μηχανών  
Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας για  
Δυναμική Φόρτιση**



**A Meta-material Layout for the Foundations of Turbine  
Machines against Dynamic Loading.**

Diploma Thesis by  
**Angelopoulou Chrysoula-Maria**  
Supervised by  
**Associate Professor N. Gerolymos**  
Μάρτιος 2024



## Ευχαριστίες...

Ολοκληρώνοντας την εκπόνηση της διπλωματικής μου εργασίας, νιώθω βαθιά την ανάγκη να ευχαριστήσω τους ανθρώπους που συνέβαλαν στη επίτευξη του στόχου αυτού.

Ευχαριστώ θερμά τον αναπληρωτή καθηγητή Ν. Γερόλυμο για την συνεργασία που αναπτύξαμε τους τελευταίους μήνες. Η βοήθεια, οι συμβουλές και οι υποδείξεις του αποτέλεσαν πολύτιμες πηγές βοήθειας για την εκπόνηση της εργασίας μου.

Επιπλέον, ευχαριστώ όλους τους ανθρώπους που υπήρξαν πηγή έμπνευσης στη ζωή μου για να ακολουθήσω την κατεύθυνση του Πολιτικού Μηχανικού και με στήριξαν σε αυτή την επιλογή μου.

Τέλος, δεν θα ήθελα να παραλείψω να ευχαριστήσω όλους τους συμφοιτητές και φίλους μου για τις σχέσεις που αναπτύξαμε κατά την διάρκεια των σπουδών μας.

Ολοκληρώνοντας, νιώθω βαθύτατα την ανάγκη να ευχαριστήσω περισσότερο απ' όλους τους γονείς μου Βασίλη, Νεκταρία και τον αδελφό μου Γιώργο για την διαρκή στήριξη που μου παρέχουν.





## Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία της Αγγελουπούλου Χρυσούλας-Μαρίας επικεντρώνεται στην εφαρμογή των σεισμικών μεταυλικών για τον έλεγχο της διάδοσης των κυμάτων. Η μελέτη αντλεί έμπνευση από προηγούμενες εργασίες σχετικά με τα μηχανικά μεταυλικά ως σεισμικές ασπίδες και τη σεισμική προστασία σε κατασκευαστικά έργα. Η έρευνα ενσωματώνει αριθμητικές προσομοιώσεις, ανάλυση διασποράς και τρισδιάστατες προσομοιώσεις για να καταδείξει την αποτελεσματικότητα των μηχανικών μεταυλικών στην εξασθένηση κυμάτων υψηλής συχνότητας.

Η μεθοδολογία της εργασίας περιλαμβάνει λύσεις δυναμικής ανάλυσης με τη χρήση του προγράμματος MathCad και αριθμητικά προσομοιώματα στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων PLAXIS 3D. Η εργασία διερευνά τη χρήση της απομόνωσης με βάση τα μεταυλικά, οδηγώντας στο σχεδιασμό, τη δοκιμή και την κατασκευή μοναδιαίων κυψελών για φυσική υλοποίηση. Το θεωρητικό υπόβαθρο καλύπτει καταστατικά μοντέλα, συμπεριλαμβανομένου του γραμμικού ελαστικού μοντέλου που βασίζεται στο νόμο του Hooke για την ισοτροπική ελαστικότητα.

Η διπλωματική αποτελείται από πέντε κύρια μέρη, με το δεύτερο κεφάλαιο να επικεντρώνεται σε μια βιβλιογραφική ανασκόπηση που παραπέμπει σε παρόμοιες έρευνες στο παρελθόν και χρησιμεύει ως βάση για τη δομή της διατριβής. Το τρίτο κεφάλαιο εμβαθύνει στο θεωρητικό υπόβαθρο, συζητώντας τη φύση των υλικών που χρησιμοποιούνται στο μοντέλο και τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιείται. Το τέταρτο κεφάλαιο διερευνά τη θεωρία της μονοδιάστατης πεπερασμένης αλυσίδας, ενώ το πέμπτο κεφάλαιο περιλαμβάνει τη μοντελοποίηση με βάση αναλυτικές εξισώσεις για τον έλεγχο της διάδοσης των κυμάτων.

Εξετάζεται η εφαρμογή των μεταυλικών στη θεμελίωση μηχανών παραγωγής ενέργειας για δυναμική φόρτιση. Η ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων στο πρόγραμμα Plaxis περιλαμβάνει τη διαμόρφωση τεσσάρων τελικών μοντέλων προς επίλυση, με την παραδοχή για πλάκες σκυροδέματος, με χάλυβα, ελαστομερή (αφρόλεξ) και ενδιάμεσες στρώσεις σιλόμερ. Στόχος της μελέτης είναι ο σχεδιασμός μεταυλικών δομών με διάκενα ζώνης στην περιοχή συχνοτήτων 30-60 Hz για την αποτελεσματική μείωση της διάδοσης των κυμάτων.

Συμπερασματικά, η εργασία εστιάζει στην αριθμητική ανάλυση και εφαρμογή του μοντέλου για την θεμελίωση μηχανών για δυναμική φόρτιση μεγάλων συχνοτήτων. Η έρευνα συμβάλλει στην ανάπτυξη καινοτόμων στρατηγικών μετριασμού των διεγέρσεων και στον έλεγχο και στην εξασθένηση των κυμάτων.

## Summary

The diploma thesis by Angelopoulou Chrysoula-Maria E.M.P. in 2024 focuses on the application of seismic metamaterials for wave propagation control. The study draws inspiration from previous works on mechanical metamaterials as seismic shields and seismic protection in construction projects. The research incorporates numerical simulations, dispersion analysis, and 3D simulations to demonstrate the effectiveness of engineering metamaterials in attenuating high frequency waves.

The methodology of the work involves dynamic analysis solutions using the MathCad program and numerical simulations in the PLAXIS 3D finite element program. The thesis explores the use of metamaterial-based isolation, leading to the design, testing, and fabrication of unit cells for physical realization. The theoretical background covers constitutive models, including the linear elastic model based on Hooke's law of isotropic elasticity.

The thesis consists of five main parts, with the second chapter focusing on a literature review that references similar research in the past and serves as the foundation for the thesis structure. The third chapter delves into the theoretical background, discussing the nature of materials used in the model and the finite element method employed. The fourth chapter explores the theory of the one-dimensional finite chain, while the fifth chapter involves modeling based on analytical equations for wave propagation control.

The application of metamaterials in the foundation of power generation machines for dynamic charging is discussed in the thesis. The finite element analysis in the Plaxis program involves the formulation of four final models for solution, with assumptions made for concrete slabs, steel placement, elastomeric foam, and intermediate layers of silomer. The study aims to design metamaterial structures with band gaps in the frequency range of 30-60 Hz to reduce wave propagation effectively.

In conclusion, the diploma thesis focuses on the numerical analysis and application of the model for the foundation of machines for high-frequency dynamic loading. The research contributes to the development of innovative excitation mitigation strategies and the advancement of metamaterial technology for wave control and attenuation.



## Περιεχόμενα

1. Εισαγωγή.....	10
1.1. Σκοπός εργασίας.....	10
1.2. Μεθοδολογία εργασίας.....	11
1.3. Διάρθρωση εργασίας.....	11
2. Βιβλιογραφική ανασκόπηση.....	12
2.1. Εισαγωγή.....	12
2.2. Συναφείς έρευνες.....	12
3. Θεωρητικό Υπόβαθρο.....	14
3.1. Μηχανές ηλεκτρικής παραγωγής ενέργειας.....	14
3.2. Η φύση των μεταλλικών.....	15
3.3. Ελαστομερή Υλικά.....	17
3.4. Αφρολέξ (foam).....	17
3.5. Πρόγραμμα Plaxis 3D.....	18
3.5.1. Τύπος πεπερασμένου στοιχείου.....	19
3.5.2. Constitutive models.....	20
3.5.3. Γραμμικό ελαστικό μοντέλο (LE).....	20
3.5.4. Μοντέλο Mohr Coulomb (MC).....	20
3.5.5. Ιδιότητες καννάβου.....	21
4. Θεωρία άπειρου μοντέλου και αναλυτικές σχέσεις.....	22
4.1. Τα μεταλλικά στις σεισμικές δονήσεις.....	22
4.2. Η διαμόρφωση κελιών μονάδας.....	23
4.2.1. Η θεώρηση μοντέλο άπειρου πλέγματος.....	24
4.2.2. Διαγράμματα διασποράς για το μοντέλο άπειρου πλέγματος.....	25
4.3. Μονοδιάστατη πεπερασμένη αλυσίδα.....	26
4.4. Αρχή λειτουργίας του συστήματος μάζας σε μάζα.....	27
4.5. Σύστημα εξισώσεων.....	28
4.6. Γεωμετρία και Υλικά μοντέλου.....	29
5. Μοντελοποίηση – παραμετροποίηση.....	30
5.1. Τύποι παραμετροποίησης υλικών.....	30
5.2. MathCad.....	32
5.2.1. Μοντελοποίηση βάση στρώσεων.....	32
5.2.2. Μοντελοποίηση με διαφορετικό αριθμό οπών.....	37
5.2.3. Μοντελοποίηση με διαφορετικά χαρακτηριστικά σκυροδέματος.....	44
5.2.4. Μοντελοποίηση με διαφορετικά χαρακτηριστικά ελαστομερούς μεταξύ των πλακών από σκυρόδεμα.....	54

5.2.5.	Μοντελοποίηση με διαφορετικά χαρακτηριστικά αφρολέξ-ελαστομερούς μεταξύ κυλίνδρων χάλυβα.....	61
5.2.6.	Τελικά μοντέλα αναλύσεων.....	69
6.	Ανάλυση με πεπερασμένα στο πρόγραμμα Plaxis.....	74
6.1.	Διαδικασία περιγραφής του μοντέλου στο Plaxis.....	74
6.2.	Μοντέλο 1.....	75
6.3.	Μοντέλο 2.....	78
6.4.	Μοντέλο 3.....	82
6.5.	Μοντέλο 4.....	86
7.	Συμπεράσματα.....	91
7.1.	Συμπεράσματα αναλυτικών εξισώσεων.....	91
7.2.	Συμπεράσματα πεπερασμένων στοιχείων.....	91
7.3.	Γενικά Συμπεράσματα και περαιτέρω διερεύνηση.....	92
	Βιβλιογραφία.....	93

## 1. Εισαγωγή

### 1.1. Σκοπός εργασίας

Το αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας επικεντρώνεται στην δημιουργία ενός συστήματος ελέγχου ταλαντώσεων και απορρόφησης κυμάτων μεγάλης συχνότητας καθώς και στην διερεύνηση μίας νέας μεθόδου βελτίωσης της δυναμικής συμπεριφοράς κατασκευών. Συγκεκριμένα η έρευνα εστιάζει στην μελέτη κατασκευής μίας βάσης ηλεκτρικών μηχανών παραγωγής ενέργειας με την χρήση της θεωρίας των μεταϋλικών και της δυναμικής ενίσχυσης, τα οποία σχεδιάζονται λαμβάνοντας υπόψιν τους εν γένει περιορισμούς.

Στην παρούσα διπλωματική με αφορμή την μελέτη των Chatzi et al. για τον μετριασμό των σεισμικών κυμάτων στις κατασκευές, προτείνοντας μία μονάδα-κυψέλη μάζας σε μάζα, γίνεται ανάλυση της εφαρμογής του μοντέλου αυτού για την μείωση διάδοσης μηχανικών κυμάτων. Ο στόχος είναι να σχεδιαστεί μία δομή μεταϋλικών που εμφανίζουν κενά ζώνης, εντός του εύρους συχνοτήτων [30, 60] Hz. Με την εφαρμογή του μοντέλου μονάδα-κυψέλη μάζας σε μάζα κατασκευάζεται ένα φράγμα που προστατεύει τη δομή από προσπίπτοντα οριζόντια κύματα. Για την εξαγωγή των ιδιοτήτων του ίδιου του φραγμού, καθώς και της συνολικής απόκρισης του συστήματος, πραγματοποιείται μια προκαταρκτική παραμετρική ανάλυση χρησιμοποιώντας την αρχή λειτουργίας του συστήματος μάζα σε μάζα, που βασίζεται στη θεωρία του Bloch για μονοδιάστατα (1D) σε άπειρα πλέγματα, και με τη συμβατική θεωρία δονήσεων πραγματοποιείται περαιτέρω ανάλυση σε πεπερασμένα στοιχεία.

Τα συμβατικά μεταϋλικά με τοπικό συντονισμό φαίνονται πολλά υποσχόμενα στον τομέα του ελέγχου των ταλαντώσεων, όμως εξακολουθούν να υπάρχουν ορισμένοι κρίσιμοι περιορισμοί που απαιτούν επιστημονική προσοχή και περισσότερη μελέτη. Ένας από τους πιο σημαντικούς περιορισμούς είναι οι περιοχές συντονισμού της ταλαντευόμενης μάζας, που εμφανίζουν μεγάλες μετακινήσεις των εσωτερικά μεγάλων μαζών, που περιπλέκουν σημαντικά την εφαρμογή τους. Για τον σκοπό αυτό η σύγχρονη έρευνα επικεντρώνεται σε διάφορες διατάξεις μηχανισμών με σκοπό την τεχνητή αύξηση της αδράνειας της συντονιζόμενης μάζας καθώς και την ανάπτυξη ρεαλιστικών μοντέλων που μπορούν να επιτύχουν ευρυζωνική εξασθένησης των κυμάτων στην περιοχή ταλάντωσης των μηχανών.

Έχει νόημα να αναλύσουμε τη φύση των μεταϋλικών, τα οποία ουσιαστικά περιλαμβάνουν μια ειδική κατηγορία δομημένων (περιοδικών) υλικών που χαρακτηρίζονται από ένα δυναμικό φαινόμενο φιλτραρίσματος όταν τοποθετούνται κατά μήκος της διαδρομής των κυμάτων διάδοσης. Όταν η συχνότητα των εισερχόμενων κυμάτων πέφτει στην «τυφλή» ζώνη τους, η διάδοσή τους διακόπτεται, σχηματίζοντας έτσι ένα διάκενο ζώνης. Αυτή η ιδέα έχει αξιοποιηθεί για διάφορους τύπους κυμάτων, όπως υπερήχους, ακουστικά, ελαστικά, ακόμη και ηλεκτρομαγνητικά και θερμικά, με αποτέλεσμα δομές γνωστές ως φωνονικά ή ακουστικά μεταϋλικά (Hussein et al., 2014). Η πρώτη τους εφαρμογή έγινε στο πεδίο της ηλεκτρομαγνητικής διάδοσης κυμάτων.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν σύνθετα υλικά που περιλαμβάνουν τοπικά συντονισμένες μικροδομές, που τοποθετούνται περιοδικά στο υπόστρωμα (Lu et al., 2009, Sheng et al., 2003, Lu et al., 2005, Sheng et al., 2007). Η πρώτη πειραματική απόδειξη αυτής της ιδιότητας βρίσκεται στο Liu et al., ο οποίος κατασκεύασε ηχητικούς κρυστάλλους με μια απλή μονάδα μικροδομής που αποτελείται από μια σφαίρα μολύβδου με την επίστρωση ενός ελαστικά μαλακού υλικού (π.χ. καουτσούκ πυριπίου) που παρουσίασε μια περιοχή συχνότητας κύριας ζώνης διακοπής συντονισμένη κοντά στη συχνότητα συντονισμού των 400 Hz. Λειτουργώντας ως εσωτερικοί συντονιστές, οι μολύβδινες σφαίρες είχαν ένα σταθερό χωρικό πλέγμα που ήταν δύο τάξεις μεγέθους μικρότερο από το σχετικό μήκος κύματος στη συχνότητα συντονισμού. Η χρήση μεταϋλικών για τον

χειρισμό σεισμικών κυμάτων, τα οποία χαρακτηρίζονται από κύματα όγκου [πρωτεύοντα (P) και δευτερεύοντα (S)] και επιφανειακά (Rayleigh and Love), έχει αποδειχθεί σημαντική για κύματα τύπου Rayleigh μέσω μιας σειράς πειραμάτων πλήρους κλίμακας. Έχει αποδειχθεί ότι τα σεισμικά μεταυλικά με τοπικούς συντονιστές υπομήκους κύματος μπορούν να σχεδιαστούν ώστε να έχουν αρνητική πυκνότητα μάζας και (ή) αρνητικό συντελεστή Young ως τρόπος ελέγχου της διάδοσης ελαστικών κυμάτων εντός του εύρους συχνοτήτων των σεισμικών κυμάτων (<50 Hz). Παρόλη την εξέλιξη στην έρευνα, το μεγαλύτερο μέρος είναι θεωρητικής φύσεως και γίνεται προσπάθεια εφαρμογής τους.

Η δομή που μελετάται στη διπλωματική εργασία αποτελείται από μία μονάδα κυψέλης που έχει μία πλάκα σκυροδέματος, με οπές, που είναι πληρωμένες με κυλίνδρους χάλυβα με γύρο του αφρολέξ, και μεταξύ των πλακών ενδιάμεσες στρώσεις ελαστομερούς σιλομέρ. Τα ληφθέντα αποτελέσματα της μελέτης αυτής υποδεικνύουν ότι η απομόνωση με βάση τα μεταυλικά είναι πράγματι εφικτή, παρακινώντας τον σχεδιασμό, τη δοκιμή και την κατασκευή κυψελών μονάδας που μπορούν να πραγματοποιηθούν με φυσικό τρόπο.

### 1.2. Μεθοδολογία εργασίας

Για την μεθοδολογία της εργασίας, αρχικά πραγματοποιήθηκε μία σειρά επίλυσης δυναμικών αναλύσεων, μέσω δυναμικών εξισώσεων, κάνοντας χρήση του προγράμματος MathCad. Με την ανάλυση αυτή έγινε η τελική διαμόρφωση των ευνοϊκών ορίων του μοντέλου της κατασκευής. Μετά τον καθορισμό αυτό, προχωρήσαμε σε αριθμητική προσομοίωση στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων PLAXIS 3D και τα αποτελέσματα που προέκυψαν συγκρίθηκαν με τις λύσεις των εξισώσεων.

Πιο αναλυτικά, αρχικά έγινε η επίλυση των δυναμικών εξισώσεων, με την θεώρηση πακτώσεως του εδάφους. Δημιουργήθηκαν τα διάφορα συστήματα εξισώσεων με βάση τις στρώσεις του μοντέλου. Κάθε στρώση αποτελείται από συνδυασμό μπετόν, χάλυβα και ελαστομερών. Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε για τρεις έως οκτώ στρώσεις των παραπάνω, με τις ανάλογες μετατοπίσεις (μία εξωτερική και μία εσωτερική για κάθε στρώμα μπετόν). Σύμφωνα με τα αποτελέσματα έγινε περιορισμός των διαστάσεων του μοντέλου, όπου οδήγησε στις τελικές εξισώσεις προς επίλυση και διευρέυνση.

Μετά την επίλυση των εξισώσεων, γίνεται σύγκριση του μοντέλου με το αντίστοιχο ίδιου μεγέθους από τις σύνηθες κατασκευές μέχρι τώρα. Συγκεκριμένα γίνεται σύγκριση μιας απλής βάσης από μπετόν με το ίδιο πάχος των στρώσεων του μοντέλου μας. Έπειτα παίρνουμε τον λόγο αυτών των δύο και δημιουργούμε το διάγραμμα μετατοπίσεων και συχνότητας. Η προσοχή μας επικεντρώνεται στα αποτελέσματα των υψηλών συχνοτήτων, μεταξύ 30-60Hz και βάση των αποτελεσμάτων γίνεται η παραμετροποίηση των χαρακτηριστικών του μοντέλου για την καλύτερη απόδοση.

Στο τελικό στάδιο της έρευνας, πραγματοποιήθηκε η προσομοίωση του μοντέλου στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων PLAXIS 3D. Με αυτό τον τρόπο μπορούμε να αναπαραστήσουμε πραγματικά δεδομένα χώρου στο μοντέλο μας και να τα συγκρίνουμε με τις μέχρι τώρα μεθόδους. Καταλήγοντας έτσι, σε ένα τελικό μοντέλο διαμόρφωσης για καλύτερη απόδοση.

### 1.3. Διάρθρωση εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελείται από πέντε κύρια μέρη. Μια σύντομη περιγραφή του κάθε κεφαλαίου δίνετε παρακάτω:

Στο πρώτο κεφάλαιο αναφέρεται ο σκοπός της εργασίας και περιγράφεται περιληπτικά η μεθοδολογία που θα ακολουθηθεί.

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζεται μία συνοπτική βιβλιογραφική ανασκόπηση. Γίνεται αναφορά σε παρόμοιες έρευνες του παρελθόντος και στην πηγή έμπνευσης της παρούσας δομής, της βάσης θεμελίωσης, της διπλωματικής εργασίας.

Στο τρίτο κεφάλαιο αναλύεται το θεωρητικό υπόβαθρο. Γίνεται μία περιληπτική αναφορά της φύσης των υλικών που χρησιμοποιούμε στο μοντέλο μας. Τέλος γίνεται μία

## **Εφαρμογή Μεταϋλικών στη Θεμελίωση Μηχανών Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας για Δυναμική Φόρτιση**

σύντομη περιγραφή της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιείται στην συνέχεια, των καταστατικών προσομοιωμάτων και των λογισμικών που χρησιμοποιήθηκαν στην εργασία (PLAXIS) .

Στο τέταρτο κεφάλαιο αναλύεται η θεωρία της μονοδιάστατης πεπερασμένης αλυσίδας, όπου βάση αυτής προκύπτουν και οι αναλυτικές εξισώσεις που χρησιμοποιούνται στην διπλωματική εργασία. Τέλος, παρουσιάζεται αναλυτικά η διαμόρφωση του μοντέλου που θα ακολουθηθεί.

Στο πέμπτο κεφάλαιο της εργασίας γίνεται επίλυση των αναλυτικών εξισώσεων και η παραμετροποίηση-μοντελοποίηση της βάσης. Η επίλυση των εξισώσεων γίνεται με την βοήθεια του προγράμματος MathCad. Βάση των χαρακτηριστικών των υλικών του μοντέλου υπολογίζονται οι μετακινήσεις σε σχέση με τον χρόνο. Στην συνέχεια συγκρίνονται αυτές οι τιμές με αυτές που προκύπτουν από την ίδια διέγερση, για μία απλή πλάκα έδρασης, για την σύγκριση των αποτελεσμάτων. Βάση των αποτελεσμάτων των επιμέρους αναλύσεων γίνεται σχολιασμός για την καλύτερη διαμόρφωση του μοντέλου. Τέλος , γίνεται διάκριση των καλύτερων μοντέλων για επιμέρους ανάλυση στο πρόγραμμα πεπερασμένων.

Στο έκτο κεφάλαιο γίνεται επίλυση των καλύτερων μοντέλων στο πεπερασμένο πρόγραμμα Plaxis. Βάση των μοντέλων που προέκυψαν στο παραπάνω κεφάλαιο γίνεται η ορθή περιγραφή τους στο πρόγραμμα πεπερασμένων. Τα αποτελέσματα αξιολογούνται με τον ίδιο τρόπο όπως παραπάνω. Στο τέλος, σχολιάζονται οι αναλύσεις και καταλήγουμε σε μία τελική διαμόρφωσή τους. Στο τέλος των αναλύσεων γίνεται σχολιασμός αυτών και κατάληξη σε μία τελική διαμόρφωση.

Στο έβδομο και τελευταίο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στα γενικά συμπεράσματα που προέκυψαν βάση των ανωτέρω κεφαλαίων. Παρουσιάζονται συνοπτικά όλα τα επιμέρους συμπεράσματα και η μορφοποίηση που πρέπει να έχει κάθε μοντέλο έδρασης για την καλύτερη απόκριση. Τέλος, δίνονται ιδέες για περαιτέρω επιμέρους έρευνες, που θα μπορούσαν να διεξαχθούν.

## **2. Βιβλιογραφική ανασκόπηση**

### **2.1. Εισαγωγή**

Η παρούσα βιβλιογραφική ανασκόπηση αφορά τα μεταϋλικά υλικά και τη χρήση τους στη δυναμική απόκριση, ανοίγοντας ένα φάσμα ευρείας κατανόησης σχετικά με τις τεχνολογικές, μηχανικές και γεωτεχνικές πτυχές του θέματος. Τα μεταϋλικά υλικά, λόγω των εξαιρετικών τους μηχανικών ιδιοτήτων, εξετάζονται σε ποικίλους τομείς, ανάμεσα τους και η γεωτεχνική μηχανική.

Επικεντρώνεται κυρίως στις μηχανικές ιδιότητες των μεταϋλικών υλικών, συμπεριλαμβανομένης της αντοχής στην τάση, της επιμήκυνσης, και της επιστροφής στην αρχική τους μορφή. Εξετάζεται επίσης η συμπεριφορά τους υπό δυναμικά φορτία, οι διάφορες χρήσεις τους στη γεωτεχνική μηχανική, με εστίαση στη στήριξη των δομικών κατασκευών, που επηρεάζουν τη δυναμική απόκριση του εδάφους. Τέλος, παρουσιάζονται μέθοδοι ανάλυσης και αξιολόγησης της δυναμικής απόκρισης σε διάφορα πεδία εφαρμογής.

Το κεφάλαιο αυτό συνοψίζει τις κύριες σημαντικές εξελίξεις, ανοίγοντας τον δρόμο για περαιτέρω έρευνα και εφαρμογές στον τομέα της χρήσης των μεταϋλικών υλικών στη γεωτεχνική μηχανική. Η εξέλιξη της τεχνολογίας στον τομέα αυτό ανοίγει νέες προοπτικές για τη βελτίωση της απόδοσης και της ασφάλειας των δομικών έργων.

### **2.2. Συναφείς έρευνες**

Στη διεθνή βιβλιογραφία υπάρχουν πολλά επιστημονικά άρθρα ανάλυσης των μεταϋλικών και την χρήση τους σε διάφορους τομείς. Στην ενότητα αυτή παρατίθενται 4



συναφείς έρευνες , με βασικό τους γνώμονα η ανάλυση των μεταυλικών στην δυναμική απόκριση.

Η εργασία, με τίτλο «On the feasibility of structural metamaterials for seismic-induced vibration mitigation», των Chatzi et al. , διερευνά τον σχεδιασμό μεταυλικών για τη σεισμική απομόνωση δομικών κατασκευών. Η μελέτη επικεντρώνεται στη δημιουργία μεγάλου εύρους ζωνών χάσματος στην περιοχή χαμηλών συχνοτήτων Hz για τον μετριασμό των σεισμικών δονήσεων. Προτείνεται μια διαμόρφωση μοναδιαίας κυψελίδας μάζας σε μάζα, για την κατασκευή ενός φράγματος που θωρακίζει τις δομές από τα οριζόντια κύματα. Η έρευνα περιλαμβάνει παραμετρικές αναλύσεις με χρήση της θεωρίας του Bloch σε 1D και 2D άπειρα πλέγματα, καθώς και συμβατική θεωρία ταλάντωσης σε συστήματα πεπερασμένων πλεγμάτων. Η ανάλυση δίνει έμφαση στην εξασθένηση των επιφανειακών σεισμικών κυμάτων, που είναι σημαντικά για την προστασία των κατασκευών από καταστροφικές εδαφικές κινήσεις. Η μελέτη παρέχει πληροφορίες σχετικά με τις παραμέτρους σχεδιασμού και τη σκοπιμότητα κατασκευής συστημάτων σεισμικής απομόνωσης με βάση τα μεταυλικά.

Η εργασία με τίτλο «Seismic isolation of buildings using composite foundations based on metamaterials», των O. Casablanca et al. εισάγει μια νέα προσέγγιση για τη σεισμική απομόνωση συνδυάζοντας τις ιδιότητες των σεισμικών μεταυλικών με τις συνήθεις θεμελιώσεις. Η μελέτη χρησιμοποιεί τον τοπικό συντονισμό και μια δομή διπλής ακαμψίας για την αντιμετώπιση των φαινομένων συμπίεσης και διάτμησης. Πειραματικά αποτελέσματα από ένα επιδεικτικό μηχάνημα δείχνουν ένα φασματικό χάσμα ζώνης που ξεκινά από τα 4,5 Hz, φιλτράροντας αποτελεσματικά πάνω από το 50% της σεισμικής ενέργειας. Τα σύνθετα θεμέλια λειτουργούν ως εσωτερικοί συντονιστές για τον χειρισμό των κυμάτων, παρουσιάζοντας πολλά υποσχόμενα αποτελέσματα για τη σεισμική ανθεκτικότητα των κτιρίων. Η έρευνα γεφυρώνει το χάσμα μεταξύ των σεισμικών μεταυλικών και των πρακτικών εφαρμογών στη δομική μηχανική.

Οι δύο παραπάνω εργασίες αποτελούν τις κύριες πηγές της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Κάποιες επιπλέον εργασίες σχετικά με τα μεταυλικά παρατίθενται παρακάτω.

Η έρευνα με τίτλο «Large scale mechanical metamaterials as seismic shields» των Miniaci et al. (2016) διερευνούν τα μηχανικά μεταυλικά μεγάλης κλίμακας ως σεισμικές ασπίδες. Οι έρευνες στον τομέα της σεισμικής μηχανικής, με παραδείγματα τους Duggal (2007) και Bilham (2010), υπογραμμίζουν την κρίσιμη ανάγκη για σεισμική προστασία στα κατασκευαστικά έργα. Οι μελέτες δομικού ελέγχου των Spencer και Nagarajaiah (2003) και οι τεχνικές μείωσης της κυματικής ενέργειας (Shi and Huang, 2013) υπογραμμίζουν τη σημασία των καινοτόμων στρατηγικών μετριασμού του σεισμικού κινδύνου. Η μελέτη των Miniaci et al. ενσωματώνει αριθμητικές προσομοιώσεις, ανάλυση διασποράς και τρισδιάστατες προσομοιώσεις μεταβατικής μετάδοσης κυμάτων για να καταδείξουν την αποτελεσματικότητα των μηχανικών μεταυλικών στην εξασθένηση των σεισμικών κυμάτων. Αξιοποιώντας αυτές τις καινοτόμες προσεγγίσεις, η έρευνα προάγει τις στρατηγικές σεισμικής προστασίας και εμπλουτίζει τον τομέα της σεισμικής μηχανικής.

Στην εργασία των Martakis et al. (2021) με τίτλο «Nonlinear periodic foundations for seismic protection: Practical design, realistic evaluation and stability considerations» παρουσιάζεται ένας νέος μη γραμμικός περιοδικός σχεδιασμός θεμελίωσης για σεισμική προστασία, που συνδυάζει έδρανα από μολύβδινο καουτσούκ και πλάκες σκυροδέματος για την παρεμπόδιση της διάδοσης των κυμάτων μέσω σκέδασης Bragg. Βασιζόμενη σε προηγούμενες έρευνες των Mylonakis and Gazetas (2000), Naeim (1989) και Narisetti et al. (2010), η μελέτη προάγει την κατανόηση της σεισμικής απομόνωσης και της δομικής δυναμικής. Πρακτικές οδηγίες σχεδιασμού από την Εταιρεία Σεισμολογίας της Νέας Ζηλανδίας και γνώσεις από τους Novak και Henderson ενημερώνουν την ανάλυση της δομικής απόκρισης υπό σεισμική φόρτιση. Πραγματοποιώντας μη γραμμικές αναλύσεις ιστορικού απόκρισης και μοντελοποιώντας τη συμπεριφορά των εδράνων από μολύβδινο

καουτσούκ, οι συγγραφείς αποδεικνύουν την ανώτερη απόδοση της προτεινόμενης θεμελίωσης σε σχέση με τις συμβατικές μεθόδους. Η έρευνα συμβάλλει στον τομέα προσφέροντας μια ολοκληρωμένη αξιολόγηση της μη γραμμικής περιοδικής μεταθεμελίωσης μέσα σε ένα ρεαλιστικό δομικό σύστημα, αναδεικνύοντας τις ικανότητες διάχυσης ενέργειας και τη βελτιωμένη σεισμική ανθεκτικότητα. Συνολικά, η μελέτη παρέχει πολύτιμες πληροφορίες για την ενίσχυση της σεισμικής προστασίας μέσω καινοτόμων διαμορφώσεων θεμελίωσης.

Η διδακτορική διατριβή του Μωρίς Καλδερών στο ΕΜΠ με τίτλο «Καινοτόμες διατάξεις απορρόφησης κραδασμών και μεταλλικών για τον έλεγχο χαμηλόσυχων κυμάτων» διερευνά καινοτόμες έννοιες στον έλεγχο των κραδασμών και τον μετρίασμό του θορύβου χρησιμοποιώντας φωνονικά και τοπικά συντονισμένα μεταλλικά, μαζί με μηχανικούς ενισχυτές. Η μελέτη παρουσιάζει πειραματικά πρωτότυπα που επικυρώνουν τα προτεινόμενα συστήματα, αποδεικνύοντας την αποτελεσματικότητά τους στον μετρίασμό του ήχου χαμηλών συχνοτήτων. Οι βασικές συνεισφορές περιλαμβάνουν την εισαγωγή του μηχανισμού δυναμικής κατευθυντικής ενίσχυσης (DDA) για την ενίσχυση των δυναμικών ιδιοτήτων, των απορροφητών KDamper για την εξασθένιση του θορύβου και των στοιχείων αρνητικής δυσκαμψίας για τον έλεγχο των κραδασμών. Η έρευνα δίνει έμφαση στη σκοπιμότητα ρεαλιστικών σχεδίων πλήρους κλίμακας και επικυρώνει αναλυτικά και αριθμητικά μοντέλα μέσω πειραματικών δοκιμών. Συνδυάζοντας προηγμένους απορροφητές με συστήματα ενίσχυσης αδράνειας, η διατριβή προσφέρει ιδέες για τη βελτιστοποίηση της απώλειας μετάδοσης ήχου σε συγκεκριμένες περιοχές συχνοτήτων. Συνολικά, η διατριβή συνεισφέρει πολύτιμες γνώσεις στον τομέα του ακουστικού ελέγχου και του ελέγχου των κραδασμών, αναδεικνύοντας τις δυνατότητες των δομών μεταλλικών και των μηχανισμών ενίσχυσης σε πρακτικές εφαρμογές για τη μείωση του θορύβου και τον έλεγχο των κραδασμών.

### 3. Θεωρητικό Υπόβαθρο

#### 3.1. Μηχανές ηλεκτρικής παραγωγής ενέργειας

Η στροβιλογεννήτρια είναι μια μηχανή ηλεκτρικής γεννήτριας που συνδέεται με τον άξονα ενός ατμοστροβίλου ή αεροστροβίλου για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, η γεννήτρια αποτελεί μια συσκευή που μετατρέπει την ενέργεια που βασίζεται στην κίνηση (δυναμική και κινητική ενέργεια) ή την ενέργεια που βασίζεται στα καύσιμα (χημική ενέργεια) σε ηλεκτρική ενέργεια για χρήση σε ένα εξωτερικό κύκλωμα. Οι πηγές μηχανικής ενέργειας περιλαμβάνουν ατμοστροβίλους, αεροστροβίλους, υδροστροβίλους, μηχανές εσωτερικής καύσης, ανεμογεννήτριες ακόμη και χειροκίνητους μοχλούς. Η πρώτη ηλεκτρομαγνητική γεννήτρια, ο δίσκος Faraday, εφευρέθηκε το 1831 από τον Βρετανό επιστήμονα Michael Faraday. Οι γεννήτριες παρέχουν σχεδόν όλη την ενέργεια για τα ηλεκτρικά δίκτυα.

Οι μεγάλες ατμοκίνητες στροβιλογεννήτριες παρέχουν την πλειονότητα της παγκόσμιας ηλεκτρικής ενέργειας και χρησιμοποιούνται επίσης από ατμοκίνητα στροβιλοηλεκτρικά πλοία. Μικρές στροβιλογεννήτριες που κινούνται από αεροστροβίλους χρησιμοποιούνται συχνά ως βοηθητικές μονάδες ισχύος (APU, κυρίως για αεροσκάφη).

Η χρήση των στροβιλογεννητριών πραγματοποιείται για υψηλές ταχύτητες περιστροφής του άξονα, χαρακτηριστικές των ατμοστροβίλων και των αεροστροβίλων. Ο ρότορας μιας στροβιλογεννήτριας, που ονομάζεται το τμήμα μιας συσκευής ή (ηλεκτρικής) μηχανής που στρέφεται, είναι τύπου μη αλατούχου πόλου συνήθως με δύο πόλους.

Η κανονική ταχύτητα μιας γεννήτριας στροβίλου κυμαίνεται μεταξύ των 1500 με 3000 στροφές ανά λεπτό με τέσσερις ή δύο πόλους στα 50 Hz (1800 ή 3600 στροφές ανά λεπτό με τέσσερις ή δύο πόλους στα 60 Hz). Τα περιστρεφόμενα μέρη μιας γεννήτριας turbo υπόκεινται σε υψηλές μηχανικές καταπονήσεις λόγω της υψηλής ταχύτητας λειτουργίας.

Για να καταστεί ο ρότορας μηχανικά ανθεκτικός στις μεγάλες στροβιλογεννήτριες, σφουρηλατείται συνήθως από συμπαγή χάλυβα ενώ παράλληλα γίνεται χρήση κραμάτων όπως αποτελεί ο χάλυβας χρωμίου-νικελίου ή χρωμίου-νικελίου-μολυβδαινίου. Η προεξοχή των περιελίξεων στην περιφέρεια ασφαρίζεται με χαλύβδινους δακτυλίους συγκράτησης. Βαριές μη μαγνητικές μεταλλικές σφήνες στην κορυφή των σχισμών συγκρατούν τα τυλίγματα πεδίου έναντι φυγοκεντρικών δυνάμεων. Στις αυλακώσεις του ρότορα χρησιμοποιούνται συνήθως μονωτικά υλικά σκληρής σύνθεσης, όπως ο μαρμαρυγίας και ο αμίαντος. Αυτά τα υλικά αντέχουν σε υψηλές θερμοκρασίες και υψηλές δυνάμεις σύνθλιψης.

Η βάση των μεγάλων στροβιλογεννητριών μπορεί να αποτελείται από δύο ή περισσότερα μέρη, ενώ στις μικρότερες στροβιλογεννήτριες κατασκευάζεται σε ένα πλήρες κομμάτι (π.χ. σκυρόδεμα).

Οι πρώτες στροβιλογεννήτριες ήταν ηλεκτρικές γεννήτριες που τροφοδοτούνταν από υδροστρόβιλους. Ο πρώτος ουγγρικός υδροστρόβιλος σχεδιάστηκε από τους μηχανικούς του εργοστασίου Ganz το 1866 και η παραγωγή σε βιομηχανική κλίμακα με δυναμογεννήτριες ξεκίνησε μόλις το 1883. Ο μηχανικός Charles Algernon Parsons παρουσίασε μια ατμοκίνητη στροβιλογεννήτρια συνεχούς ρεύματος με χρήση δυναμογεννήτριας το 1887[3] και μέχρι το 1901 είχε προμηθεύσει την πρώτη μεγάλη βιομηχανική στροβιλογεννήτρια εναλλασσόμενου ρεύματος ισχύος μεγαβάτ σε ένα εργοστάσιο στο Eberfeld της Γερμανίας.

Οι στροβιλογεννήτριες χρησιμοποιήθηκαν επίσης σε ατμομηχανές ως πηγή ενέργειας για τον φωτισμό των βαγονιών και τις αντλίες νερού για τα συστήματα θέρμανσης.

Κεντρικό ζήτημα στην παρούσα διπλωματική εργασία θα αποτελέσει η απόκριση μίας βάσης από μεταλλικά για την περιοχή ταχύτητας της στροβιλογεννήτριας, όπου κυμαίνεται από 30 με 60 Hz.

### 3.2. Η φύση των μεταλλικών

Τα μεταλλικά είναι δομές υλικών που έχουν σχεδιαστεί για να διαθέτουν καλύτερα χαρακτηριστικά από τα συνήθη μέχρι τώρα υλικά. Ο όρος μεταλλικό προέρχεται από την ελληνική λέξη μετά (meta), που σημαίνει "πέρα" ή "μετά", και τη λατινική λέξη materia, που σημαίνει "ύλη" ή "υλικό". Κατασκευάζονται από σύνθετα υλικά, όπως μέταλλα και πολυμερή, χρησιμοποιώντας συναρμολόγηση διαφόρων στοιχείων. Το μέγεθος τους είναι συνήθως σε μικρές κλίμακες και τα υλικά αυτά είναι οργανωμένα σε επαναλαμβανόμενα μοτίβα. Οι νεοδημιουργηθείσες δομές των μεταλλικών, τους προσδίδουν νέες ιδιότητες πέραν από εκείνες των βασικών υλικών.

Η ικανότητά τους να χειρίζονται τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα μέσω του ακριβούς σχήματος, της γεωμετρίας, του μεγέθους, του προσανατολισμού και της διάταξης τους παρέχει έξυπνες ιδιότητες που τους επιτρέπουν να επιτυγχάνουν οφέλη πέραν εκείνων των συνηθισμένων υλικών. Αυτές οι ικανότητες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παρεμπόδιση, την απορρόφηση, την ενίσχυση ή την κάμψη των κυμάτων.

Τα μεταλλικά που είναι κατάλληλα κατασκευασμένα έχουν την ικανότητα να τροποποιούν την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία ή τα ηχητικά κύματα με τρόπους που δεν παρατηρούνται σε συνηθισμένα υλικά. Αναφερόμαστε σε αυτά τα υλικά ως μεταλλικά με αρνητικό δείκτη διάθλασης για συγκεκριμένα μήκη κύματος.

Οι πιθανές εφαρμογές των μεταλλικών είναι ποικίλες και περιλαμβάνουν οπτικά φίλτρα, ιατρικές συσκευές, απομακρυσμένες αεροδιαστημικές εφαρμογές, ανίχνευση αισθητήρων και παρακολούθηση υποδομών, έξυπνη διαχείριση της ηλιακής ενέργειας, λείζερ, έλεγχο του πλήθους, ραδιοκύματα, επικοινωνία σε πεδία μάχης υψηλής συχνότητας και φακούς για κεραίες υψηλού κέρδους, βελτίωση αισθητήρων υπερήχων, ακόμη και θωράκιση κατασκευών από σεισμούς. Τα μεταλλικά προσφέρουν τη δυνατότητα δημιουργίας υπερφακών. Ένας τέτοιος φακός μπορεί να επιτρέψει την απεικόνιση κάτω από το όριο

## Εφαρμογή Μεταϋλικών στη Θεμελίωση Μηχανών Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας για Δυναμική Φόρτιση

---

περίθλασης, δηλαδή την ελάχιστη ανάλυση  $d=\lambda/(2NA)$  που μπορεί να επιτευχθεί με συμβατικούς φακούς με αριθμητικό άνοιγμα  $NA$  και με μήκος κύματος φωτισμού  $\lambda$ . Τα οπτικά μεταϋλικά κάτω του μήκους κύματος, όταν ενσωματώνονται με οπτικά μέσα εγγραφής, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την επίτευξη οπτικής πυκνότητας δεδομένων υψηλότερης από αυτή που περιορίζεται από την περίθλαση. Επιπλέον, υπάρχει έρευνα για τα μεταϋλικά στις σεισμικές και ακουστικές κατασκευές

Η ηλεκτρική μηχανική, η ηλεκτρομαγνητική, η κλασική οπτική, η φυσική στερεάς κατάστασης, η μηχανική μικροκυμάτων και κεραιών, η οπτοηλεκτρονική, οι επιστήμες των υλικών, η νανοεπιστήμη και η μηχανική ημιαγωγών είναι μεταξύ των πολλών τομέων της επιστήμης που εμπλέκονται στην έρευνα των μεταϋλικών.

Προς το τέλος της δεκαετίας του 1800, άρχισε η έρευνα για συνθετικά υλικά με σκοπό τον χειρισμό ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Η έρευνα του 1898 σε ενώσεις με χειρικές ιδιότητες από τον Jagadish Chandra Bose οδήγησε στη μελέτη μερικών από τις πρώτες δομές που μπορούν να θεωρηθούν ως μεταϋλικά. Στις αρχές της δεκαετίας του 1900, ο Karl Ferdinand Lindman διεξήγαγε έρευνα για την αλληλεπίδραση των κυμάτων χρησιμοποιώντας μεταλλικές έλικες ως τεχνητά μέσα.

Στα τέλη της δεκαετίας του 1940, ο Winston E. Kock των εργαστηρίων AT&T Bell Laboratories δημιούργησε υλικά με ιδιότητες που μοιάζουν με εκείνες των μεταϋλικών. Τεχνητά διηλεκτρικά ερευνήθηκαν για ελαφρές κεραιές μικροκυμάτων στις δεκαετίες του 1950 και του 1960. Ακόμη, τη δεκαετία του 1980 και του 1990 μελετήθηκε η χρήση τεχνητών χειρόμορφων μέσων σε απορροφητές μικροκυματικών ραντάρ. Ο Victor Veselago διατύπωσε αρχικά μια θεωρητική περιγραφή των υλικών αρνητικού δείκτη το 1967. Αυτό που αποδείχθηκε ήταν πώς η ταχύτητα φάσης μπορεί να ρυθμιστεί ώστε να τρέχει αντίθετα προς τη διεύθυνση του διανύσματος Poynting. Η διάδοση των κυμάτων στα φυσικά υλικά είναι αντίθετη προς αυτό.

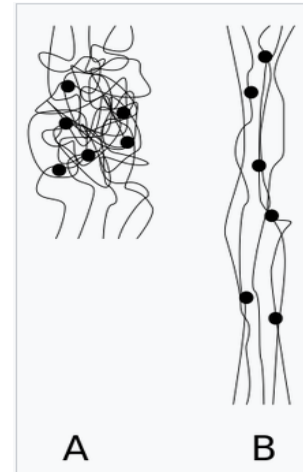
Ο αρνητικός δείκτης διάθλασης αποτελεί ένα καθοριστικό χαρακτηριστικό των μεταϋλικών αρνητικού δείκτη (NIM). Τα "μέσα με αρνητικό δείκτη διάθλασης", τα "αριστερόστροφα μέσα" και τα "μέσα αναστροφής κύματος" είναι περαιτέρω ορολογία για τα NIM. Τα διπλά αρνητικά μεταϋλικά, ή διπλά αρνητικά υλικά (DNG), είναι μια άλλη ονομασία για τα NIM όπου ο αρνητικός δείκτης διάθλασης προκύπτει από την ταυτόχρονη διπλή εμφάνιση της αρνητικής διαπερατότητας.

Τα ελαστικά μεταϋλικά επιτυγχάνουν αρνητικό δείκτη διάθλασης σε μη ηλεκτρομηχανικά υλικά μεταβάλλοντας ορισμένες παραμέτρους. Επιπλέον, ένας νέος σχεδιασμός για ελαστικά μεταϋλικά που μπορούν να συμπεριφέρονται είτε ως υγρά είτε ως στερεά σε ένα περιορισμένο εύρος συχνοτήτων μπορεί να επιτρέψει νέες εφαρμογές που βασίζονται στον έλεγχο των ακουστικών, ελαστικών και σεισμικών κυμάτων. Ένας άλλος συμπληρωματικός όρος γι' αυτά είναι τα μηχανικά μεταϋλικά.

Τα μεταϋλικά που χρησιμοποιούνται στις κατασκευές δομών περιλαμβάνουν μικρό βάρος και δυνατότητα σύνθλιψης. Μικροπλέγματα με μορφές που μοιάζουν με δικτυώματα και δοκούς μπορούν να παραχθούν μέσω μικροστερεολιθογραφικής προβολής. Είναι επίσης δυνατόν να κατασκευαστούν υλικά που είναι τέσσερις τάξεις μεγέθους πιο δύσκαμπτα από το παραδοσιακό αεροπήκτωμα (είναι ένας τύπος σχετικά νέου υλικού διαυγούς με χαρακτηριστική μικρή θερμική αγωγιμότητα), διατηρώντας την ίδια πυκνότητα. Με την υπερβολική καταπόνηση των υλικών, τα υλικά αυτά μπορούν να αντέξουν φορτίο ισοδύναμο με τουλάχιστον 160.000 φορές το ίδιο τους το βάρος. Τέλος, ένα κεραμικό μεταϋλικό νανοτρίπανο μπορεί να ισοπεδωθεί και να επανέλθει στην αρχική του κατάσταση

### 3.3. Ελαστομερή Υλικά

Αξίζει να αναφερθεί η φύση των ελαστομερών. Ένα ελαστομερές είναι ένα πολυμερές με ιξωδοελαστικότητα (που έχει ταυτόχρονα ιξώδες και ελαστικότητα) και πολύ ασθενείς διαμοριακές δυνάμεις, με χαμηλό Μέτρο Young και υψηλή έλλειψη τάσης, συγκρινόμενο με άλλα υλικά. Ο όρος που προέρχεται από το ελαστικό πολυμερές, χρησιμοποιείται συχνά εναλλακτικά με τον όρο συνθετικό καουτσούκ, αν και ο δεύτερος προτιμάται όταν αναφέρεται στον βουλκανισμό. Καθένα από τα μονομερή, που συνδέονται προκειμένου να σχηματιστεί το πολυμερές, συνήθως αποτελούνται από άνθρακα, υδρογόνο, οξυγόνο και/ή πυρίτιο. Τα ελαστομερή είναι άμορφα πολυμερή που υπάρχουν πάνω από την υαλώδη θερμοκρασία μετάπτωσης τους, έτσι ώστε να είναι δυνατή σημαντική τμηματική κίνηση. Σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος, τα ελαστικά είναι σχετικά μαλακά ( $E \sim 3\text{MPa}$ ) και μορφοποιήσιμα. Οι κύριες χρήσεις τους είναι για μονώσεις, κόλλες και καλυπόμενα εύκαμπτα τμήματα. Οι περιοχές εφαρμογής, για διαφορετικού τύπου ελαστικού, είναι πολυάριθμες και καλύπτουν πολύ διαφορετικά υλικά όπως ελαστικά, σόλες παπουτσιών καθώς και στοιχεία απόσβεσης και μόνωσης. Η σημασία των ελαστικών μπορεί να κριθεί από το γεγονός ότι τα παγκόσμια εισοδήματα είχαν προβλεφθεί ότι θα ανέρχονται περίπου στα US\$56 δισεκατομμύρια το 2020.



(A) είναι ένα πολυμερές χωρίς τάση. (B) είναι το ίδιο πολυμερές υπό τάση. Όταν η τάση αφαιρείται, θα επιστρέψει στη διαμόρφωση A. (Οι τελείες αντιπροσωπεύουν διασταυρώσεις)

Εικόνα 3.3-1 Εικόνα από Βικιπαίδεια για τα ελαστομεροί

Τα ελαστομερή είναι συνήθως θερμοσκληραινόμενα (απαιτώντας βουλκανισμό) αλλά μπορεί να είναι επίσης θερμοπλαστικά (δείτε θερμοπλαστικό πολυμερές). Οι μεγάλες αλυσίδες πολυμερούς διασταυρώνονται κατά τη διάρκεια της σκλήρυνσης (βουλκανισμός). Η μοριακή δομή των ελαστομερών μπορεί να θεωρηθεί ως δομή 'μακρών χορδών και μικρών σφαιριδίων', με τα σφαιρίδια να αναπαριστούν διασταυρώσεις. Η ελαστικότητα προέρχεται από την ικανότητα των μεγάλων αλυσίδων να αναδιαμορφώνονται με σκοπό να κατανέμουν μια εφαρμοζόμενη τάση. Οι ομοιοπολικές διασταυρώσεις εξασφαλίζουν ότι το ελαστομερές θα επιστρέψει στην αρχική του διαμόρφωση όταν η τάση αφαιρεθεί. Ως αποτέλεσμα αυτής της ακραίας ελαστικότητας, τα ελαστομερή μπορούν να επεκταθούν αντιστρεπτά από 5-700%, ανάλογα με το συγκεκριμένο υλικό. Χωρίς τις διασταυρώσεις ή με μικρές, δύσκολα αναδιαμορφούμενες αλυσίδες, η εφαρμοζόμενη τάση θα κατέληγε σε μια μόνιμη παραμόρφωση.

Η εμφανιζόμενη ελαστικότητα ενός πολυμερούς επηρεάζεται επίσης από τη θερμοκρασία. Τα ελαστομερή που έχουν ψυχρή έως υαλώδη ή κρυσταλλική φάση θα έχουν λιγότερο κινητές αλυσίδες και συνεπώς μικρότερη ελαστικότητα, από αυτά που επεξεργάζονται σε θερμοκρασίες υψηλότερες από τη υαλώδη θερμοκρασία μετάπτωσης του πολυμερούς.

Μπορεί επίσης ένα πολυμερές να παρουσιάζει ελαστικότητα που δεν οφείλεται στις διασταυρώσεις, αλλά σε θερμοδυναμικά αίτια. Μερικά παραδείγματα ελαστομερών είναι το φυσικό πολυισοπρένιο (καουτσούκ), πολυβουταδιένιο και το αφρολεξ.

### 3.4. Αφρολέξ (foam)

Οι αφροί υλικών, τα αφρολέξ, είναι συνήθως ατακτοποιήτοι και έχουν ποικίλα μεγέθη φυσαλίδων. Σε μεγαλύτερα μεγέθη, η μελέτη των εξιδανικευμένων αφρών συνδέεται στενά με τα μαθηματικά προβλήματα των ελάχιστων επιφανειών και των τρισδιάστατων μωσαϊκών, που ονομάζονται επίσης κηρήθρες. Η δομή Weaire-Phelan θεωρείται η καλύτερη δυνατή (βέλτιστη) μοναδιαία κυψέλη ενός τέλει διατεταγμένου αφρού, ενώ οι

νόμοι του Plateau περιγράφουν τον τρόπο με τον οποίο οι σαπουνόφουσκες σχηματίζουν δομές στους αφρούς.

Σε μικρότερη κλίμακα από τη φυσαλίδα είναι το πάχος του φιλμ για τους μετασταθερούς αφρούς, το οποίο μπορεί να θεωρηθεί ένα δίκτυο διασυνδεδεμένων φιλμ που ονομάζονται ελάσματα. Ιδανικά, τα ελάσματα συνδέονται σε τριάδες και ακτινοβολούν 120° προς τα έξω από τα σημεία σύνδεσης, γνωστά ως όρια Plateau.

Μια ακόμη χαμηλότερη κλίμακα είναι η διεπιφάνεια υγρού-αέρα στην επιφάνεια της μεμβράνης. Τις περισσότερες φορές αυτή η διεπιφάνεια σταθεροποιείται από ένα στρώμα αμφίφιλης δομής, συχνά κατασκευασμένο από επιφανειοδραστικές ουσίες, σωματίδια (γαλάκτωμα Pickering) ή πιο σύνθετες ενώσεις

Για τα ελαστομερή κυψελοειδή στερεά, όπως ο αφρός, όταν συμπιέζονται, το υλικό υποχωρεί και διασπάται καθώς τα κυτταρικά τοιχώματα λυγίζουν, μέχρι που τελικά τα κυτταρικά τοιχώματα συνθλίβονται μεταξύ τους και το υλικό διαρρηγνύεται. Αρχικά, ο αφρός δρα ελαστικά καθώς τα κυτταρικά τοιχώματα λυγίζουν. Αυτό μπορεί να γίνει αντιληπτό ως ένα εκθετικά αυξανόμενο καθεστώς, ένα γραμμικό καθεστώς με μικρή κλίση μετά την υποχώρηση (τάση) και ένα απότομο γραμμικό ελαστικό καθεστώς σε μια καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης. Η δυσκαμψία του υλικού μπορεί να υπολογιστεί από το γραμμικό ελαστικό καθεστώς, όπου το μέτρο ελαστικότητας για τους αφρούς ανοικτών κυττάρων μπορεί να οριστεί από την εξίσωση:  $\left(\frac{E^*}{E_s}\right)_f = C_f \left(\frac{\rho^*}{\rho_s}\right)^2$ , όπου  $E_s$  είναι το μέτρο ελαστικότητας

του στερεού συστατικού,  $E^*$  είναι το μέτρο ελαστικότητας της κυψελωτής δομής,  $C_f$  είναι μια σταθερά που έχει τιμή κοντά στη μονάδα,  $\rho^*$  είναι η πυκνότητα της κυψελωτής δομής και  $\rho_s$  είναι η πυκνότητα του στερεού. Το μέτρο ελαστικότητας για τους αφρούς κλειστών κυψελών μπορεί να περιγραφεί ομοίως από:  $\left(\frac{E^*}{E_s}\right)_f = C_f \left(\frac{\rho^*}{\rho_s}\right)^3$  όπου η μόνη διαφορά είναι ο εκθέτης στην εξάρτηση από την πυκνότητα. Ωστόσο, στα πραγματικά υλικά, ένας αφρός κλειστών κυψελών έχει περισσότερο υλικό στα άκρα των κυψελών, γεγονός που τον κάνει να ακολουθεί περισσότερο την εξίσωση για αφρούς ανοικτών κυψελών. Συνολικά, η αντοχή του αφρού αυξάνεται με την πυκνότητα του κελιού και τη δυσκαμψία του υλικού της μήτρας.

### 3.5. Πρόγραμμα Plaxis 3D

Σύμφωνα με την διπλωματική εργασία του Κωνσταντίνος Κασσάς-«Αριθμητική προσομοίωση της μη-γραμμικής στατικής και δυναμικής απόκρισης πασσάλου σε αξονική φόρτιση», το PLAXIS 3D είναι «ένα τρισδιάστατο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων, αναπτύχθηκε για την ανάλυση της παραμόρφωσης, της ευστάθειας και της ροής των υπόγειων υδάτων σε έργα γεωτεχνικής μηχανικής. Το PLAXIS ξεκίνησε το 1987 στο Delft University of Technology ως ένα εύκολο στη χρήση 2D πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων με έμφαση σε γεωτεχνικές εφαρμογές. Ο κώδικας 3D εμφανίστηκε για πρώτη φορά το 2001, όταν το πρόγραμμα 3DTunnel κυκλοφόρησε. Το 2004 το δεύτερο τρισδιάστατο πρόγραμμα 3DFoundations κυκλοφόρησε. Ωστόσο, σε κανένα από αυτά τα δύο προγράμματα δεν ήταν δυνατόν να καθοριστούν αυθαίρετα τρισδιάστατες γεωμετρικές λόγω των γεωμετρικών περιορισμών τους. Η ανάγκη για νέο πλήρες τρισδιάστατο πρόγραμμα οδήγησε στην ανάπτυξη του κώδικα PLAXIS 3D το οποίο είναι εύκολο στη χρήση και παρέχει πολλές σχεδιαστικές δυνατότητες. Το PLAXIS 3D κυκλοφόρησε το 2010.»

Το Plaxis 3D είναι ένα εξειδικευμένο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιείται κυρίως για την ανάλυση του εδάφους και τη συμπεριφορά του κατά την επίδραση φορτίων και άλλων παραμέτρων. Είναι ειδικά σχεδιασμένο για γεωτεχνικές εφαρμογές και τη σχεδίαση γεωτεχνικών δομών, όπως τοιχοποιίες στήριξης, γεωτεχνικές δομές, και άλλα έργα που επηρεάζουν το εδάφος.

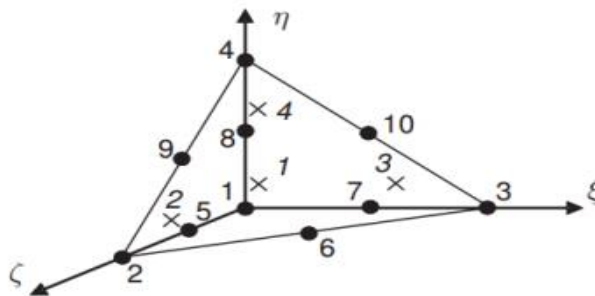
Βασικά Χαρακτηριστικά του Plaxis 3D:

- **Μοντελοποίηση Εδάφους:** Το πρόγραμμα επιτρέπει την ακριβή μοντελοποίηση των φυσικών χαρακτηριστικών του εδάφους, όπως η ανισοτροπία, η συμπίεση, και η πλαστικότητα, με χρήση διάφορων μοντέλων υποκείμενου εδάφους.
- **Μοντελοποίηση Δομικών Στοιχείων:** Επιτρέπει την ακριβή μοντελοποίηση των δομικών στοιχείων, όπως παίδες, τοίχοι, και άλλα, ώστε να εξετάζεται η αλληλεπίδρασή τους με το εδάφος.
- **Στατική Και Δυναμική Ανάλυση:** Το Plaxis 3D υποστηρίζει τόσο στατική όσο και δυναμική ανάλυση. Αυτό επιτρέπει την εκτίμηση των επιπτώσεων των φορτίων και των δονήσεων στο εδάφος.
- **Αλληλεπίδραση εδάφους-κατασκευής:** Ο χρήστης μπορεί να εξετάσει την αλληλεπίδραση μεταξύ δομικών στοιχείων και εδάφους, λαμβάνοντας υπόψη τη συμπεριφορά σε διάφορες κατευθύνσεις.
- **Γραφική Παράσταση και Ανάλυση Αποτελεσμάτων:** Το πρόγραμμα παρέχει προηγμένα γραφικά εργαλεία για την ευκολία στην επισκόπηση των αποτελεσμάτων, συμπεριλαμβανομένων περιοπτέρων μετακινήσεων και καμπυλών πιέσεων.

Με τα παραπάνω χαρακτηριστικά, το Plaxis 3D αποτελεί ένα ισχυρό εργαλείο για μηχανικούς και γεωτεχνικούς που ασχολούνται με την ανάλυση και τον σχεδιασμό γεωτεχνικών δομών και την αξιολόγηση της συμπεριφοράς του εδάφους. Όλα αυτά τα παρέχει σε ένα περιβάλλον εύκολα προσβάσιμο και κατανοητό για τον χρήστη, κάνοντας την εμπειρία του πιο ευχάριστη και εύκολη.

### 3.5.1. Τύπος πεπερασμένου στοιχείου

«Ο σχηματισμός του εδάφους προσομοιώνεται με τη χρήση τρισδιάστατων συνεχών στοιχείων εδάφους. Υπάρχουν τρεις τοπικές συντεταγμένες ( $\xi$ ,  $\eta$  και  $\zeta$ ), όπως μπορεί να παρατηρηθεί στο Σχήμα 4 και τα στοιχεία του εδάφους έχουν τρεις βαθμούς ελευθερίας ανά κόμβο.



Εικόνα 3.5-1: Nodes (•) and integration points (x) of a 10-node tetrahedral element (after (PLAXIS3D, 2012) p41), εικόνα από Plaxis3D

Το ολοκλήρωμα για τον υπολογισμό του όγκου μπορεί να γραφτεί ως εξής:

$$\iiint F(\xi, \eta, \zeta) d\xi d\eta d\zeta \approx \sum_{i=1}^k F(\xi, \eta, \zeta) w_i$$

Όπου  $w_i$  είναι οι συντελεστές βαρύτητας. Το άθροισμα των συντελεστών βαρύτητας ισούτε με  $1/6$ . Το πρόγραμμα PLAXIS χρησιμοποιεί γκαουσιανή ολοκλήρωση μέσα σε τετραεδρικά στοιχεία και βασίζεται σε 4 σημεία δειγματοληψίας. Για περισσότερες λεπτομέρειες ο

## Εφαρμογή Μεταϋλικών στη Θεμελίωση Μηχανών Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας για Δυναμική Φόρτιση

αναγνώστης παραπέμπεται στο (PLAXIS3D, 2012, σελ. 40-48).», Κωνσταντίνος Κασσάς - «Αριθμητική προσομοίωση της μη-γραμμικής στατικής και δυναμικής απόκρισης πασσάλου σε αξονική φόρτιση», Αθήνα, 2013

Εκτός από τα στοιχεία του εδάφους, ειδικοί τύποι στοιχείων χρησιμοποιούνται για τη προσομοίωση δομικών κατασκευών.

### 3.5.2. Constitutive models

Τα τελευταία χρόνια, αριθμητικές μέθοδοι έχουν γίνει πρότυπο εργαλεία για την ανάλυση των γεωτεχνικών προβλημάτων. Αυτή η χρήση κατά κύριο λόγο οφείλεται στην διαθεσιμότητα υπολογιστών επαρκούς υπολογιστικής δυνατότητας για την επίλυση δισδιάστατων και τρισδιάστατων αναλύσεων, καθώς επίσης και στα συνεχή επιτεύγματα που γίνονται στην ανάπτυξη των καταστατικών μοντέλων που περιγράφουν την συμπεριφορά του εδάφους.

Παρακάτω θα γίνει μια περιληπτική περιγραφή των καταστατικών προσομοιωμάτων που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτή τη διπλωματική εργασία.

### 3.5.3. Γραμμικό ελαστικό μοντέλο (LE)

Ο νόμος του Hooke της γραμμικής ελαστικότητας είναι ίσως το πιο απλό καταστατικό μοντέλο που διατίθεται για να περιγράψει τις σχέσεις τάσεων παραμορφώσεων. Το γραμμικό ελαστικό μοντέλο (LE) βασίζεται στο νόμο του Hooke ισότροπης ελαστικότητας. Περιλαμβάνει δύο βασικές ελαστικές παραμέτρους, το μέτρο ελαστικότητας  $E$ , δηλαδή το μέτρο του Young και τον λόγο του Poisson  $\nu$ . Το γραμμικό ελαστικό μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη προσομοίωση σκληρών όγκων στο έδαφος, όπως τοίχοι από μπετόν και υλικών που γνωρίζουμε τα μηχανικά χαρακτηριστικά τους.

Η γραμμική μέθοδος στο Plaxis 3D αποτελεί ένα ισχυρό εργαλείο για την ανάλυση της συμπεριφοράς του εδάφους και των γεωτεχνικών δομών υπό στατικά φορτία. Η χρήση της γραμμικής μεθόδου στο πλαίσιο του Plaxis 3D παρέχει μια γρήγορη και αποδοτική λύση για την εκτίμηση των επιπτώσεων των φορτίων στο έδαφος και τις δομές.

Βασικά Χαρακτηριστικά της Γραμμικής Μεθόδου στο Plaxis 3D:

- **Λογική Απλότητα:** Η γραμμική μέθοδος βασίζεται σε απλοποιημένες υποθέσεις, παρέχοντας γρήγορες αναλύσεις για σχετικά απλά προβλήματα.
- **Υπολογιστική Αποδοτικότητα:** Η γραμμική μέθοδος είναι υπολογιστικά ελαφριά και επιτρέπει γρήγορη επίλυση για πολύ μεγάλα μοντέλα.
- **Εφαρμογή σε Στατικά Φορτία:** Η μέθοδος είναι κατάλληλη για στατικές αναλύσεις, καλύπτοντας φορτία που παραμένουν σταθερά κατά τη διάρκεια της ανάλυσης.
- **Αποτελεσματική για Σχετικά Λίγες Μετακινήσεις:** Η μέθοδος είναι αποτελεσματική για περιπτώσεις όπου οι μετακινήσεις του εδάφους είναι σχετικά μικρές.
- **Επαλήθευση με Πειραματικά Δεδομένα:** Οι αποτελεσματικότητες της γραμμικής μεθόδου επαληθεύονται συχνά με πειραματικά δεδομένα για τη βελτίωση της ακρίβειας των αναλύσεων.

Σε σύνοψη, η γραμμική μέθοδος στο Plaxis 3D προσφέρει έναν αποδοτικό και αξιόπιστο τρόπο για την εκτίμηση της συμπεριφοράς του εδάφους και των γεωτεχνικών δομών υπό στατικά φορτία, επιτρέποντας στους μηχανικούς να λάβουν ταχείες και ενδεδειγμένες αποφάσεις σχετικά με την ασφάλεια και τη σταθερότητα των έργων τους.

Όλα τα υλικά σε αυτή την εργασία προσομοιώνονται με αυτό το μοντέλο προσαρμοσμένα στις κατάλληλες τιμές.

### 3.5.4. Μοντέλο Mohr Coulomb (MC)

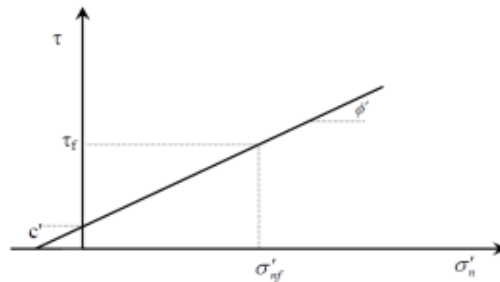
Σύμφωνα με την διπλωματική εργασία του Κωνσταντίνου Κασσά, «λαμβάνοντας υπόψη το έδαφος, όταν οι παραμορφώσεις αυξάνουν η υπόθεση της τέλει



γραμμικότητας δίνει μια πολύ καλή περιγραφή της πραγματικής συμπεριφοράς του εδάφους. Η πιο κοινή θεωρεία για την περιγραφή υλικών μη-γραμμικοτήτων είναι η πλαστική θεωρεία. Η απολύτως πλαστική συμπεριφορά υλικού αντιπροσωπεύεται από το κριτήριο Mohr-Coulomb, το οποίο μπορεί να παρασταθεί σχηματικά στο χώρο των κύριων τάσεων, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα και μπορεί να εκφραστεί ως:

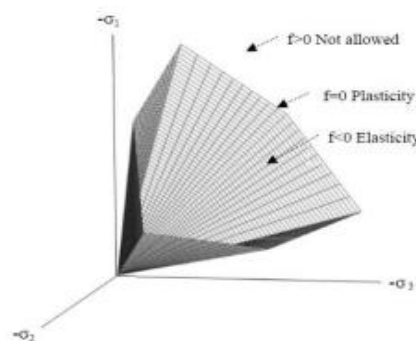
$$\tau = \sigma' + \tan \varphi' + c'$$

Όπου  $\tau$  και  $\sigma$  είναι η διατμητική και η ορθή τάση αντίστοιχα στο επίπεδο αστοχίας.



**Σχήμα 1:** Κριτήριο αστοχίας Coulomb, εικόνα από διπλωματική εργασία Κωνσταντίνου Κασσά

Το κριτήριο Mohr-Coulomb παριστάνει έναν εξάγωνο κώνο στον χώρο των κύριων τάσεων όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Τα σημεία μέσα στον κώνο συμπεριφέρονται απολύτως ελαστικά. Στα σημεία πάνω στον κώνο δεσπόζει η πλαστική παραμόρφωση ενώ ύπαρξη σημείων εκτός κώνου δεν είναι εφικτή.»



**Σχήμα 2:** Το κριτήριο απόδοσης Mohr-Coulomb στον τρισδιάστατο χώρο για  $c'=0$ , εικόνα από Plaxis3D materials models, εικόνα από διπλωματική εργασία Κωνσταντίνου Κασσά

### 3.5.5. Ιδιότητες καννάβου

«Για να εκτελεστούν υπολογισμοί πεπερασμένων στοιχείων, η γεωμετρία του προβλήματος πρέπει να διαιρεθεί σε στοιχεία. Η σύνθεση των πεπερασμένων στοιχείων ονομάζεται κάνναβος πεπερασμένων στοιχείων. Ο τρισδιάστατος υπολογισμός πεπερασμένων στοιχείων είναι πολύ χρονοβόρος, ενώ η διάρκεια του εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τον αριθμό των στοιχείων της ανάλυσης. Επιπλέον, ένα πολύ μεγάλο μοντέλο ενδεχομένως να μην μπορεί να χωρέσει στην RAM του υπολογιστή. Ως εκ τούτου, πρέπει να ληφθεί μέριμνα για τη δημιουργία όσο το δυνατόν μικρότερου καννάβου που θα οδηγήσει βέβαια σε ορθά αποτελέσματα.

## Εφαρμογή Μεταϋλικών στη Θεμελίωση Μηχανών Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας για Δυναμική Φόρτιση

Το PLAXIS επιτρέπει την αυτόματη παραγωγή πεπερασμένων στοιχείων. Η διαδικασία παραγωγής των στοιχείων λαμβάνει υπόψη τη στρωματογραφία του εδάφους, καθώς και όλα τα δομικά αντικείμενα, τα φορτία και τις συνοριακές συνθήκες. Η παραγωγή του καννάβου βασίζεται σε μια αξιόπιστη διαδικασία τριγωνισμού, γεγονός που οδηγεί σε μη συμμετρικό κάνναβο κάτι που οδηγεί σε καλύτερα αποτελέσματα από πλήρως δομημένους τετραγωνικούς καννάβους.

Η διαδικασία παραγωγής των πεπερασμένων στοιχείων απαιτεί μια γενική παράμετρο που αντιπροσωπεύει το μέσο μήκος  $\Delta l$  των πεπερασμένων στοιχείων, το οποίο υπολογίζεται από τις εξωτερικές διαστάσεις γεωμετρίας χρησιμοποιώντας την ακόλουθη σχέση.

$$\Delta l = \frac{r_e}{20} \sqrt{(x_{max} - x_{min})^2 + (y_{max} - y_{min})^2 + (z_{max} - z_{min})^2}$$

Όπου  $r_e = 2.0$  (very coarse mesh)

= 1.5 (coarse mesh)

= 1.0 (medium mesh)

= 0.7 (fine mesh)

= 0.5 (very fine mesh)», Κωνσταντίνος Κασσάς -«Αριθμητική προσομοίωση της μη-γραμμικής στατικής και δυναμικής απόκρισης πασσάλου σε αξονική φόρτιση», Αθήνα, 2013

### 4. Θεωρία άπειρου μοντέλου και αναλυτικές σχέσεις

#### 4.1. Τα μεταϋλικά στις σεισμικές δονήσεις

Τα τελευταία χρόνια ερευνητές προσπαθούν να εξετάσουν την δυνατότητα εκμετάλλευσης της ιδέας των μεταϋλικών για τον μετριασμό των σεισμικών κυμάτων. Θα πρέπει να σημειωθεί, ότι ανεξάρτητα από τις προόδους στις οπτικές και ακουστικές υλοποιήσεις, η ιδέα της περιοδικότητας για τον έλεγχο των κυμάτων στο έδαφος χρονολογείται από το 1974 και η εργασία των Woods et al. (1974). Ωστόσο, μόλις πρόσφατα συσχετίστηκε με την έννοια των μεταϋλικών, για την εκμετάλλευση των εξαιρετικών ιδιοτήτων ρύθμισης των κυμάτων αυτών των περιοδικών υλικών. Μια βασική πρόκληση για την υλοποίηση τέτοιων λύσεων για τον μετριασμό των προκαλούμενων από σεισμό δονήσεων έγκειται στην παροχή ζωνών που βρίσκονται στο εύρος χαμηλής συχνότητας, που είναι χαρακτηριστικό της σεισμικής διέγερσης, δηλαδή στη ζώνη συχνοτήτων [0,5, 5] Hz. Οι Cheng et al. (2013a) αναφέρουν μια πολλά υποσχόμενη απόπειρα προς έναν τέτοιο στόχο, σχεδιάζοντας περιοδικά σύνθετα σκυροδέματος και καουτσούκ, τα οποία είναι σε θέση να παρέχουν πλήρη κενά ζώνης στην περιοχή [5,9, 8,5] Hz και [14,4, 20,33] Hz, αν και αυτά τα εύρη βρίσκονται πάνω από το εύρος στόχου για τον μετριασμό των σεισμικών κραδασμών σε τυπικά δομικά συστήματα.

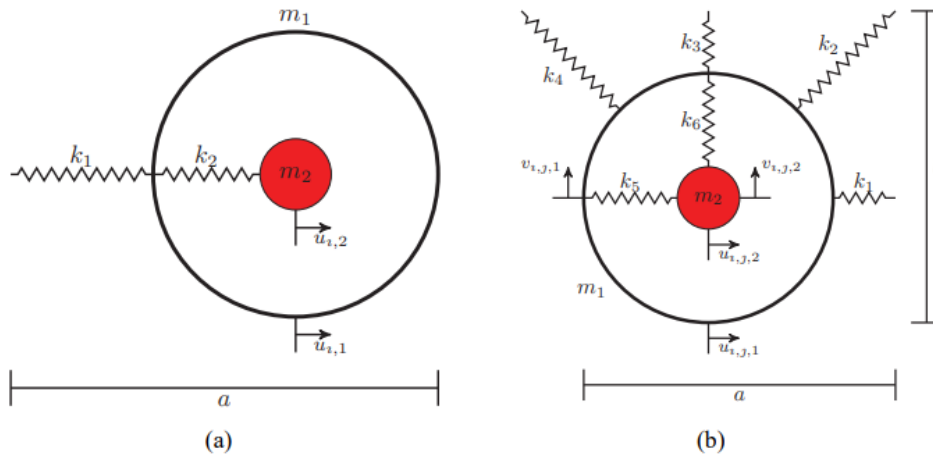
Σε περαιτέρω σχετικές μελέτες στο πλαίσιο της δομικής και σεισμικής μηχανικής, οι Cheng et al. (2013b) και οι Cheng και Shi (2014) διερευνούν τις δυνατότητες εξασθένησης των κραδασμών ενός δισδιάστατου περιοδικού πάνελ από στοιχεία σκυροδέματος και καουτσούκ. Οι Bao et al. (2012) προτείνουν μια πολυεπίπεδη περιοδική βάση που υλοποιείται μέσω κυψελών μονάδας μάζας σε μάζα και επιδεικνύουν ανώτερη απόδοση σε σχέση με τις συμβατικές λύσεις ρουλεμάν. Οι Shi et al. (2014) προτείνουν μια περιοδική βάση που αποτελείται από στρώματα σκυροδέματος αναμεμειγμένα με μπλοκ καουτσούκ, με αποτέλεσμα κενά ζωνών έως και 2,5 Hz, με τα αποτελέσματα να υποστηρίζονται πειραματικά στους Yan et al. (2014) και Xiang et al. (2012). Οι Finocchio et al. (2014) ακολουθούν μια διαφορετική προσέγγιση μέσω της σύνθεσης ενός σεισμικού μεταϋλικού από ισόχρονους σφαιρικούς ταλαντωτές που κινούνται σε μια κυκλοειδή τροχιά. Οι Huang

και Shi (2013a, 2013b) ενσωματώνουν την περιοδική θεωρία στο σχεδιασμό δισδιάστατων (2D) φραγμάτων πασσάλων και πετυχαίνουν να φιλτράρουν τα επίπεδα κύματα. Οι Kim και Das (2012) χρησιμοποιούν ένα φράγμα, που περιλαμβάνει πολυάριθμους τοπικούς συντονιστές, για να σχηματίσουν έναν σεισμικό εξασθενητή που περιβάλλει το προς προστασία σύστημα. Οι Brûlé et al. (2013) προτείνουν ένα σεισμικό μεταύλικό που αποτελείται από ένα πλέγμα κατακόρυφων κενών εγκλεισμάτων που τρυπήθηκαν στο αρχικό έδαφος. Αναφέρουν περαιτέρω πειραματικά αποτελέσματα μιας σεισμικής δοκιμής που πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας κύματα που δημιουργούνται από έναν μονοχρωματικό ανιχνευτή δόνησης. Ωστόσο, πρέπει να σημειωθεί ότι η συχνότητα της δονούμενης πηγής που χρησιμοποιείται στα πειράματα είναι 50 Hz, αρκετά μακριά από το πραγματικό φασματικό περιεχόμενο της προκαλούμενης από σεισμό δομικής απόκρισης. Αξίζει επίσης να σημειωθεί ότι οι Krödel et al. (2015) διερεύνησαν την κατασκευή φραγμών που βασίζονται στη χρήση συντονιστών που διαθέτουν κατανομημένες συχνότητες συντονισμού, που αναφέρονται ως «παγίδες ουράνιου τόξου», οι οποίες ουσιαστικά διαχωρίζουν τα διαδιδόμενα κύματα στο χωρικό φάσμα. Αυτή η αρχή μπορεί να αξιοποιηθεί για τα σεισμικά κύματα, υποθέτοντας ότι κάθε ξεχωριστή συνιστώσα συχνότητας του κύματος διεγείρει μια διαφορετική χωρική περιοχή του φραγμού, ενισχύοντας την απόδοση σε μια περιοχή ευρείας συχνότητας. Ωστόσο, η κύρια πρόκληση της μείωσης του κενού ζώνης στο εύρος της σεισμικής εισόδου είναι ακόμα ενεργή, τόσο από θεωρητική όσο και από τεχνολογική άποψη.

#### 4.2. Η διαμόρφωση κελιών μονάδας

Η προσέγγιση που ακολουθήθηκε προέρχεται από την ιδέα των Catzi et al. όπου βασίζεται στη χρήση δομημένων συστοιχιών πασσάλων «τοπικού συντονιστή» για την αναστολή της διάδοσης του σεισμού στην οριζόντια κατεύθυνση. Σε αντίθεση με τα παραδοσιακά εμπόδια, τα οποία είναι άδεια ή γεμάτα με τσιμεντο και απλώς αντανακλούν τη σεισμική ενέργεια, αυτοί οι σωροί θα διαθέτουν μια εσωτερική διαμόρφωση, η οποία εξασφαλίζει τη διάχυση ενέργειας. Ακολουθώντας την έννοια των μεταύλικών, μια διαισθητική υλοποίηση ενός τέτοιου σχεδίου μπορεί να προσεγγιστεί μέσω ενός απλού συστήματος παραμέτρων «μάζας σε μάζα», αν και έχουν προταθεί και εναλλακτικές διαμορφώσεις κυψελών (Jensen, 2003, Hussein and Frazier, 2013). Αυτή η κυψέλη μάζας σε μάζα μπορεί να συναρμολογηθεί σε μια άπειρη αλυσίδα ή πλέγμα, στην μονοδιάστατη (περίπτωση 1D) για διάδοση κύματος κατά μήκος μίας κατεύθυνσης ή σε δύο κατευθύνσεις (περίπτωση 2D), για διάδοση σε ένα επίπεδο. Η μονάδα του κελιού αποτελείται από μια εξωτερική μάζα  $M_1$ , ένα εσωτερικό αντηχείο  $M_2$  και συνδεδεμένα ελατήρια χωρίς μάζα. Για την περίπτωση 1D τα εξωτερικά και εσωτερικά ελατήρια αντηχείου συμβολίζονται ως  $k_{ex}=k_1$  (external) και  $k_i=k_2$  (internal), ενώ για την δισδιάστατη (περίπτωση 2D) συμβολίζονται αντίστοιχα  $k_{ex}=k_1=k_2=k_3=k_4$  και  $k_i=k_5=k_6$ .

Στο σχήμα 1(a) γίνεται απεικόνιση ενώ  $i$  κελιού στην μονοδιάστατη απειροστή αλυσίδα και στο Σχήμα 1(b) εμφανίζεται το κελί με θέση  $(i,j)$  μέσα στο δισδιάστατο πλέγμα. Τα ελατήρια  $k_2, k_4$  είναι τοποθετημένα σε γωνίες  $45^\circ$  και  $135^\circ$ . Οι μεταβλητές  $a$  και  $b$  υποδηλώνουν την οριζόντια και κάθετη απόσταση των κελιών. Τα μονοδιάστατά κελιά περιλαμβάνονται από έναν βαθμό ελευθερίας ανά εξωτερική και εσωτερική μάζα  $u_{i1}, u_{i2}$ . Τα δισδιάστατα κελιά 2D διαθέτουν δύο βαθμούς ελευθερίας (οριζόντια και κάθετη) ανά εξωτερική και εσωτερική μάζα  $\{u_{ij1}, v_{ij1}\}, \{u_{ij2}, v_{ij2}\}$ .



**Εικόνα 4.2-1:** Προσομοίωση των μονάδων κυψέλης μάζας σε μάζα, (a) 1D (b) 2D s(Chatzi et al.)

**4.2.1. Η θεώρηση μοντέλο άπειρου πλέγματος**

Η δομή του μεταϋλικού απαιτεί μια περιοδική τοποθέτηση των κυψελών μονάδας που περιγράφηκαν προηγουμένως. Λαμβάνοντας υπόψη τη διαμόρφωση κυψελών μονάδας της Εικόνας 4.2-1 , μια μεταδομή μπορεί να σχηματιστεί μέσω της τοποθέτησης των κυψελών μονάδας κατά μήκος μιας δομής 1D ή 2D που μοιάζει με αλυσίδα, σε ισαπέχουσα διαστήματα  $a, b$  στην οριζόντια και κατακόρυφη διεύθυνση (η τελευταία ισχύει μόνο σε 2D), αντίστοιχα. Κατά τη διάδοση ενός ελαστικού κύματος μέσω ενός μηχανικού συστήματος, ισχύει μια άμεση σχέση μεταξύ της προσωρινής χρονικής συχνότητας του κύματος  $f$  και τη χωρική του συχνότητα, ή τον κυματικό αριθμό  $\gamma$ . Η μοντελοποίηση των μεταϋλικών γίνεται, για ορισμένα άπειρα περιοδικά συστήματα πλέγματος, βρίσκοντας ένα εύρος συχνοτήτων που δεν διαθέτουν αντίστοιχο κυματικό αριθμό. Αυτά τα τυφλά σημεία στη σχέση διασποράς ( $\gamma$ - $f$ ) θεωρούνται κενά ζώνης και τα κύματα που έχουν αυτές τις συχνότητες δεν διαδίδονται μέσα στο μέσο.

Η σχέση διασποράς και οι θέσεις του κενού ζώνης εξαρτώνται από τις παραμέτρους του συστήματος, όπως περιγράφονται μέσω της μάζας ( $M$ ), απόσβεση ( $C$ ) και ακαμψία ( $K$ ) όπου οι πίνακες του συστήματος ανήκουν  $\mathbb{R}^{n \times n}$ , το οποίο προκύψει ευθέως για την περίπτωση διακριτών (συγκεντρωμένης μάζας) συστημάτων με  $n$  βαθμούς ελευθερίας (Chopra, 2007). Η εξίσωση κίνησης για ένα τέτοιο σύστημα έχει τη μορφή:

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = F \quad (1)$$

Το διάνυσμα  $u \in \mathbb{R}^n$  περιέχει τους βαθμούς ελευθερίας του συστήματος και  $F \in \mathbb{R}^n$ , δηλώνει το διάνυσμα διέγερσης. Για την ανάλυση θεωρούμε μια αρμονική διέγερση, που εκφράζεται ως  $F = F_0 e^{i\omega t}$ , όπου  $\omega$ ,  $F$  δηλώνουν τη συχνότητα και το πλάτος διέγερσης αντίστοιχα. Αφού μιλάμε για άπειρα μοντέλα πλέγματος, συνεπάγεται ότι  $n \rightarrow \infty$ . Σύμφωνα με το θεώρημα του Bloch, όπως περιγράφεται στους Huang et al. (2009) και Hussein and Frazier (2013) ,για την εξέταση της απόσβεσης, μπορούμε να το εφαρμόσουμε για την επίλυση της εξίσωσης (1). Το θεώρημα δηλώνει ότι τα κύματα που ταξιδεύουν σε ένα άπειρο περιοδικό μέσο θα έχουν τη μορφή (Hussein and Frazier, 2013):

$$U_i = B^s e^{ix_i, s\gamma + \lambda t} = B^s e^{ix_i, s\gamma e\lambda t} \quad (2)$$

όπου  $i$  το θεωρούμενο κελί μονάδας,  $B_s$  το πλάτος του κύματος κατά μήκος ενός ορισμένου βαθμού ελευθερίας,  $\gamma$  ο κυματικός αριθμός στο μέσο,  $\chi_{i,s}$  είναι το διάνυσμα συντεταγμένων του  $i$ th κελιού μονάδας, και  $i$  φανταστική μονάδα. Η συνάρτηση σύνθετης συχνότητας  $\lambda$  επιτρέπει τη χρονική διάδοση στο μέσο. Λόγω της περιοδικότητας του συστήματος, αρκεί

να εξετάσουμε ένα μόνο κελί μονάδας  $u_i$  και τα γειτονικά κελιά του για τη μελέτη της διάδοσης κυμάτων:

$$\mathbf{M}_R \ddot{\mathbf{u}}_R + \mathbf{C}_R \dot{\mathbf{u}}_R + \mathbf{K}_R \mathbf{u}_R = \mathbf{F}_R, \text{ όπου } \mathbf{F}_R = \mathbf{0} \quad (3)$$

$$\text{με } \mathbf{u}_R = [u_{j-1,1}, u_{j-1,2}, \dots, u_{j-1,T}, u_{j,1}, u_{j,2}, \dots, u_{j,T}, u_{j+1,1}, u_{j+1,2}, \dots, u_{j+1,T}]^T.$$

Θεωρούμε ότι καμία δύναμη δεν επιδρά άμεσα στα ενδιάμεσα στοιχεία του άπειρου πλέγματος  $u_{j,s}$ , όπου  $j$ th βαθμός ελευθερίας της μονάδας κυψέλης. Τα κύματα που ταξιδεύουν μέσα από το σύστημα του άπειρου πλέγματος έχουν το ίδιο πλάτος  $B_s$  σε όλη την μονάδα κελιού, τα οποία ανήκουν  $B \in \mathfrak{R}_n$ . Αντικαθιστώντας την εξίσωση (2) στην εξίσωση (3) και λαμβάνοντας υπόψη την περιοδικότητα, προκύπτει η εξίσωση:

$$[\mathbf{M}^* \lambda^2 + \mathbf{C}^* \lambda + \mathbf{K}^*] \mathbf{B} = \mathbf{0} \quad (4)$$

Οι ιδιοτιμές που προκύπτουν  $\lambda_u$  είναι της μορφής:

$$\lambda_u(\gamma) = -\xi_u(\gamma) \omega_{d,u}(\gamma) \pm i \omega_{d,u}(\gamma) \quad (5)$$

βάσει των οποίων οι αποσβεννυμένες συχνότητες  $\omega_{d,u}(\gamma) = \Im[\lambda_u(\gamma)]$  και οι αναλογίες της απόσβεσης  $\xi_u(\gamma) = -\Re[\lambda_u(\gamma)] / |\lambda_u(\gamma)|$  μπορούν να εξαχθούν.

Η ρητή έκφραση για  $\omega_{d,u}$  σε συνάρτηση με τον κυματικό αριθμό  $\gamma$  επιτρέπει την γραφική παράσταση της λεγόμενης σχέσης διασποράς.

#### 4.2.2. Διαγράμματα διασποράς για το μοντέλο άπειρου πλέγματος

Για την μονοδιάστατη άπειρη αλυσίδα το κελί μονάδας [Σχήμα 1(α)] περιλαμβάνει δύο βαθμούς ελευθερίας, έναν ανά εξωτερική και εσωτερική μάζα, με  $\alpha = 1, 2$ , αντίστοιχα. Αυτοί οι δύο βαθμοί ελευθερίας συγκεντρώνονται με συντεταγμένες  $x_{u,1} = x_{u,2} = \alpha$ :

$$\mathbf{u}_i = \begin{Bmatrix} u_{i,1} \\ u_{i,2} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{Bmatrix} e^{i\alpha\gamma + \lambda t} \quad (6)$$

Όπως προαναφέρθηκε, λόγω περιοδικότητας αρκεί η διερεύνηση του μειωμένου υποσυστήματος  $R$  του  $i^{\text{th}}$  κελιού και του γειτονικού του κελιού  $i-1^{\text{th}}$  και  $i+1^{\text{th}}$ . Οι πίνακες συστήματος του μη αποσβεννυμένου μειωμένου συστήματος τότε γίνονται:

$$\mathbf{M}_R = \begin{bmatrix} 0 & m_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_2 & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{K}_R = \begin{bmatrix} -k_1 & 2k_1 + k_2 & -k_2 & -k_1 \\ 0 & -k_2 & k_2 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\text{Με } \mathbf{u}_R [u_{i-1,1}, u_{i,1}, u_{i,2}, u_{i+1,1}]^T.$$

Όπως καταδεικνύεται στους Dertimanis et al. (2016), η εφαρμογή της εξίσωσης της κυματομορφής του Bloch για το σύστημα άπειρου πλέγματος στην περίπτωση χωρίς απόσβεση, οδηγεί στην ακόλουθη χαρακτηριστική εξίσωση

$$\lambda^4 + C_1 \lambda^2 + C_2 = 0 \quad (8)$$

για

$$C_1 = \frac{(m_1 + m_2)k_2 + (m_2 k_1 + c_1 c_2)(1 - \cos \gamma \alpha)}{m_1 m_2} \quad (9a)$$

$$C_2 = \frac{2k_1 k_2 (1 - \cos \kappa L)}{m_1 m_2} \quad (9b)$$

Και για το μήκος κύματος.

Η εξίσωση (8) δίνει λύσεις της μορφής  $\lambda^2 = \frac{-c_1 \pm \sqrt{c_1^2 - 4c_2}}{2} \Rightarrow \lambda_u(\gamma) = -i\omega_u(\gamma)$ ,  $u=1,2$ . Από αυτήν προκύπτουν δύο συχνότητες  $\omega_u(\gamma)$ , οι οποίες αντιστοιχούν σε δύο ξεχωριστές καμπύλες διασποράς, δηλαδή την οπτική και την ακουστική καμπύλη. Ο ακουστικός κλάδος αντιστοιχεί σε κίνηση εντός και εκτός φάσης της εσωτερικής και εξωτερικής μάζας, ενώ ο οπτικός κλάδος αντιστοιχεί στην κατάσταση εκτός φάσης. Η σχετική συμβολή αυτών των δύο ορίζει μια τυφλή ζώνη σε διαστήματα συχνοτήτων, ή ένα λεγόμενο band-gap, το οποίο απαγορεύει τη διάδοση των εισερχόμενων κυμάτων των αντίστοιχων συχνοτήτων. Το κενό της χαμηλής συχνότητας σχετίζεται με την ασυμπτωτική συμπεριφορά του ακουστικού τρόπου λειτουργίας, που προκύπτει για  $\gamma=\pi$ . Το κενό της υψηλής συχνότητας σχετίζεται με την οπτική λειτουργία, που λαμβάνεται για  $\gamma=0$ . Μπορεί να αποδειχθεί ότι, για την περίπτωση χωρίς απόσβεση, η ζώνη συχνοτήτων του κενού βρίσκεται στο ακόλουθο διάστημα (Finocchio et al., 2014; Huang et al., 2009)

$$f_L \leq f \leq f_H, f_L \approx \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_2}{m_2}}, f_H = f_L \sqrt{\frac{m_1+m_2}{m_1}} \quad (10)$$

,όπου  $f_L$  και  $f_H$  (Hz) αντίστοιχα το κατώτερο και το ανώτερο όριο συχνότητας της ζώνης.

Περαιτέρω ενδιαφέρον έχει να παρατηρήσουμε ότι το πρώτο συμπίπτει με τη συχνότητα του εσωτερικού συντονιστή. Δεδομένης της διαθεσιμότητας των καμπυλών διασποράς, το κατώτερο και το ανώτερο όριο μπορούν να προκύψουν, συνταγογραφώντας έτσι ένα σύνολο σχέσεων σχετικά με τις χαρακτηριστικές ποσότητες που εμπλέκονται, με βάση την εξίσωση (10):

$$\frac{m_1}{m_2} = \left[ \left( \frac{f_H}{f_L} \right)^2 - 1 \right] \quad (11a)$$

$$\frac{k_2}{m_1} = 4\pi^2 f_L^2 m_2 = 4\pi^2 (f_H^2 - f_L^2) \quad (11b)$$

### 4.3. Μονοδιάστατη πεπερασμένη αλυσίδα

Ενώ αυτή η αρχική ανάλυση, η οποία βασίστηκε στη θεωρία του άπειρου πλέγματος, είναι χρήσιμη για την κατάρτιση ποιοτικών παρατηρήσεων μέσω των σχετικών αναλυτικών εκφράσεων, είναι προφανές ότι μια αληθινή σχεδίαση δεν μπορεί να περιγραφεί από μια διαμόρφωση άπειρου πλέγματος. Στην πραγματικότητα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο ένας πεπερασμένος αριθμός μονάδων κελιών. Δεδομένου ότι η έρευνά μας στοχεύει στην εξασθένιση των μηχανικών κυμάτων, υποθέτουμε ένα πεπερασμένο πλέγμα, το οποίο περιλαμβάνει μία απλοποιημένη προσέγγιση μιας δομής υπό μηχανική διέγερση. Τέλος το πρόβλημα μας το διερευνούμε μόνο για μονοδιάστατη ανάλυση.

Το μηχανικό κύμα θεωρείται ότι μεταδίδεται από την πρώτη αριστερή εξωτερική μάζα μέχρι την τελευταία δεξιά μάζα της μεταδομής, κατά την διάρκεια της διάδοσης του. Ο στόχος αυτής της έρευνας είναι να μετριάσει την απόκριση αυτής της δομής, η οποία συνδέεται με τη δεξιά εξωτερική μάζα της πεπερασμένης αλυσίδας πλέγματος, όσον αφορά την απόλυτη επιτάχυνσή της.

Δίνεται ένας πεπερασμένος αριθμός  $N$  των μοναδιαίων κελιών και η εξίσωση που διέπει την κίνηση αυτού του συστήματος μπορεί να γραφτεί ευθέως ως

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{u}(t) = -\mathbf{M}\mathbf{r}\ddot{\mathbf{x}}_g(t) \quad (17)$$

όπου  $\mathbf{M}, \mathbf{C}$ , και  $\mathbf{K} \in \mathfrak{R}_{n \times n}$  πίνακες μάζας, απόσβεσης και ακαμψίας του συστήματος αντίστοιχα,  $\mathbf{u}(t) \in \mathfrak{R}_n$  είναι το διάνυσμα της σχετικής μετατόπισης ως προς την βάση,

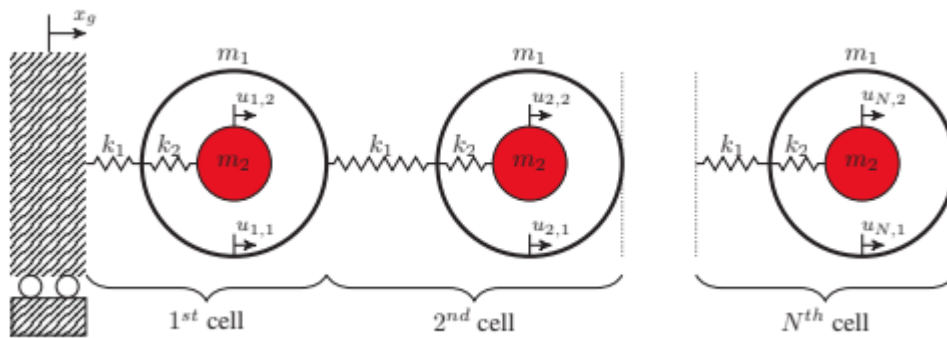
$r = [1 \ 1 \dots 1]^T$ ,  $\ddot{x}_g(t)$  η μηχανική επιτάχυνση και  $n = 2N$  είναι οι συνολικοί βαθμοί ελευθερίας. Κάτω από μια αρμονική διέγερση της μορφής  $e^{i\omega t}$ , η απόκριση γίνεται  $u(t) = d(\omega)e^{i\omega t}$ . Με αντικατάσταση στην εξίσωση (17) προκύπτει:

$$[-\omega^2 \mathbf{M} + i\omega \mathbf{C} + \mathbf{K}]d(\omega) = -\mathbf{M}r \quad (18)$$

όπου το σύνθετο πλάτος  $d(\omega)$  μπορεί να υπολογιστεί για κάθε συχνότητα  $\omega$ .

Δεδομένου ότι η σχετική μετατόπιση της  $q$ th μάζας μπορεί να εκφραστεί ως  $u_q(t) = d_q(\omega)e^{i\omega t}$ , η αντίστοιχη σχετική επιτάχυνση δίνεται από  $\ddot{u}_q(t) = -\omega^2 d_q(\omega)e^{i\omega t} \doteq a_q(\omega)e^{i\omega t}$ , όπου  $a(\omega)$  είναι ένα σύνθετο διάνυσμα στοιχείων που διατηρεί την ίδια φάση με αυτό του  $d(\omega)$  και έχουν πλάτη που ενισχύονται κατά  $-\omega^2$ . Το  $q$ th στοιχείο του  $a(\omega)$  μπορεί να εκφραστεί ως:

$$a_q(\omega) = A_q(\omega)e^{i\varphi_q(\omega)} = A_q(\omega)(\cos(\varphi_q(\omega)) + i \sin(\varphi_q(\omega))) \quad (19)$$



Εικόνα 4.3-1: Η μονοδιάστατη πεπερασμένη αλυσίδα ( Chatzi et al. )

Αντίστοιχα, η αντίστοιχη απόλυτη επιτάχυνση της  $q$ th μάζας,  $\ddot{x}_q(t)$ , προκύπτει από  $\ddot{x}_q(t) = \ddot{u}_g(t) + \ddot{x}_g(t)$ ,

$$\ddot{x}_q(t) = [A_q(\omega)(\cos(\varphi_q(\omega)) + i \sin(\varphi_q(\omega))) + 1]e^{i\omega t} \quad (20)$$

Η ποσότητα εντός παρενθέσεων γίνεται:

$$[A_q(\omega)(\cos(\varphi_q(\omega)) + 1) + i[A_q(\omega) \sin(\varphi_q(\omega))] \doteq M_q(\omega)e^{i\theta_q(\omega)}$$

Έτσι, η απόλυτη επιτάχυνση της  $q$ th μάζας υπό διέγερση μηχανικής επιτάχυνσης δίνεται από

$$\ddot{x}_g = M_q(\omega)e^{i(\omega t + \theta_q(\omega))} \quad (22)$$

$$\text{, όπου } M_q(\omega) = \sqrt{A_q(\omega)^2 + 2 + 2A_q(\omega) \cos(\varphi_q(\omega))} \quad (23)$$

αντιστοιχεί στο μέγεθος της συνάρτησης της σχετικής απόκρισης συχνότητας (FRF).

#### 4.4. Αρχή λειτουργίας του συστήματος μάζας σε μάζα

Η αρχή λειτουργίας πίσω από την σύνθετη θεμελίωση είναι αυτή ενός περιοδικού συστήματος μάζας σε μάζα χωρίς αποσβεστήρα, όπως αναλύεται αναλυτικά παρακάτω. Λαμβάνοντας υπόψη το δυναμικό σύστημα στην Εικόνα 4.3-1, η συνολική ενέργεια  $E^j$  του στοιχείου  $j$  δίνεται με το άθροισμα της κινητικής ( $E^k$ ) και δυναμικής ( $V^p$ ) ενέργειας:

## Εφαρμογή Μεταϋλικών στη Θεμελίωση Μηχανών Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας για Δυναμική Φόρτιση

$$E^j = E_K^j + V_P^j$$

$$= \frac{1}{2} m_i \dot{u}_i^j + \frac{1}{2} m_e \dot{u}_e^j + \frac{1}{2} k_i (u_i^j - u_e^j)^2 + \frac{1}{2} k_e (u_e^j - u_e^{j-1})^2 + \frac{1}{2} k_e (u_e^{j+1} - u_e^j)^2$$

όπου  $m$  και  $k$  είναι η μάζα και η σταθερά του ελατηρίου, αντίστοιχα, του συστήματος μάζας σε μάζα, οι δείκτες  $i$  και  $e$  σχετίζονται με την εσωτερική μάζα και την εξωτερική μάζα, αντίστοιχα, και  $\dot{u}$  και  $u$  είναι η ταχύτητα και η μετατόπιση της μάζας, αντίστοιχα.

Δεδομένου ότι το σύστημα είναι συντηρητικό, οι δυναμικές εξισώσεις υπολογίζονται ως:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial E_K}{\partial \dot{u}_i^j} \right) + \frac{\partial V_P}{\partial u_i^j} = 0, \\ \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial E_K}{\partial \dot{u}_e^j} \right) + \frac{\partial V_P}{\partial u_e^j} = 0 \end{cases}$$

$$\begin{cases} m_e \ddot{u}_e^j + k_e (2u_e^j - u_e^{j-1} - u_e^{j+1}) + k_i (u_e^j - u_i^j) = 0, \\ m_i \ddot{u}_i^j + k_i (u_i^j - u_e^j) = 0. \end{cases} \quad (2)$$

Βάση της κυματικής αρμονικής λύσης της εξίσωσης (θεώρημα του Bloch) για το στοιχείο  $j$ , η γενική λύση είναι:

$$\begin{cases} u_i^{j+n} = B_i e^{i(qx+nqL-\omega t)}, \\ u_e^{j+n} = B_e e^{i(qx+nqL-\omega t)}, \end{cases} \quad (3)$$

,όπου  $q$  είναι ο αριθμός κύματος,  $\omega$  είναι η γωνιακή συχνότητα,  $L$  είναι η περιοδική χωρική σταθερά του συστήματος μάζας σε μάζα, και  $B_i$  και  $B_e$  είναι μιγαδικοί αριθμοί που αντιστοιχούν σε οποιαδήποτε φάση μετατόπισης μεταξύ των δύο λύσεων. Στον χώρο Fourier, το  $j-1$  και το  $j+1$  οι γενικές λύσεις μπορούν να γραφτούν με όρους  $j$  της γενικής λύσης

$$\begin{cases} u_1^{j-1} \rightarrow U_1^j e^{i(-qL)}, \\ u_1^{j+1} \rightarrow U_1^j e^{i(qL)}. \end{cases} \quad (4)$$

Συνδυάζοντας τις εξισώσεις (2)-(5), προκύπτει η σχέση διασποράς του περιοδικού συστήματος μάζας σε μάζα

$$m_e m_i \omega^4 - [k_i (m_e + m_i) + 2k_e m_i (1 - \cos qL)] \omega^2 + 2k_e k_i (1 - \cos qL) = 0 \quad (5)$$

### 4.5. Σύστημα εξισώσεων

Για την ανάλυση του προβλήματος μας θα κάνουμε επίλυση της εξ. (2) στο πρόγραμμα Mathcad για πεπερασμένα στοιχεία.

Με βάση τα παραπάνω το σύστημα εξισώσεων μας θα είναι

$$m_e \ddot{u}_e + K_e (2u_e^1 - u_e^0 - u_e^2) + K_i (u_e^1 - u_i^1) = 0$$

$$m_i \ddot{u}_i + K_i (u_i^1 - u_e^1) = 0$$

$$M \ddot{u}_e^0 + K_e (u_e^0 - u_e^1) = F$$

όπου  $\ddot{u}_e = \omega^2 u_e$ .

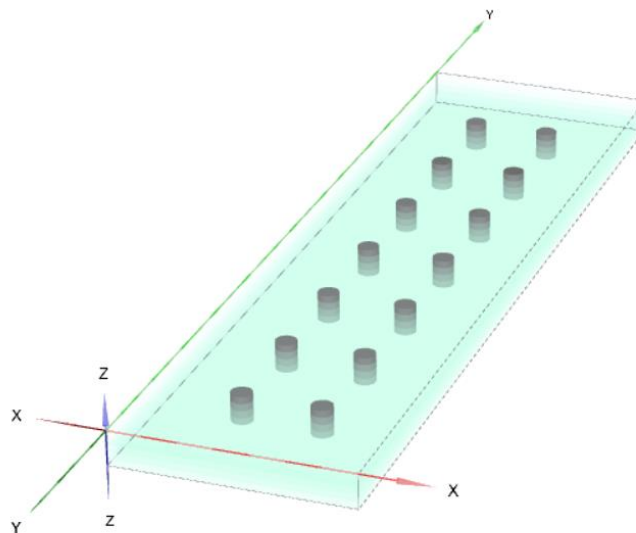


Το σύστημα μας έχει  $2 \cdot n + 1$  αγνώστους όπου  $n$  ο αριθμός στρώσεων. Για μία στρώση έχουμε αγνώστους  $u_e^0, u_e^1, u_i^1$  και  $F=10\text{kN}$ . Με την ίδια λογική ορίζονται και τα συστήματα για παραπάνω στρώσεις.

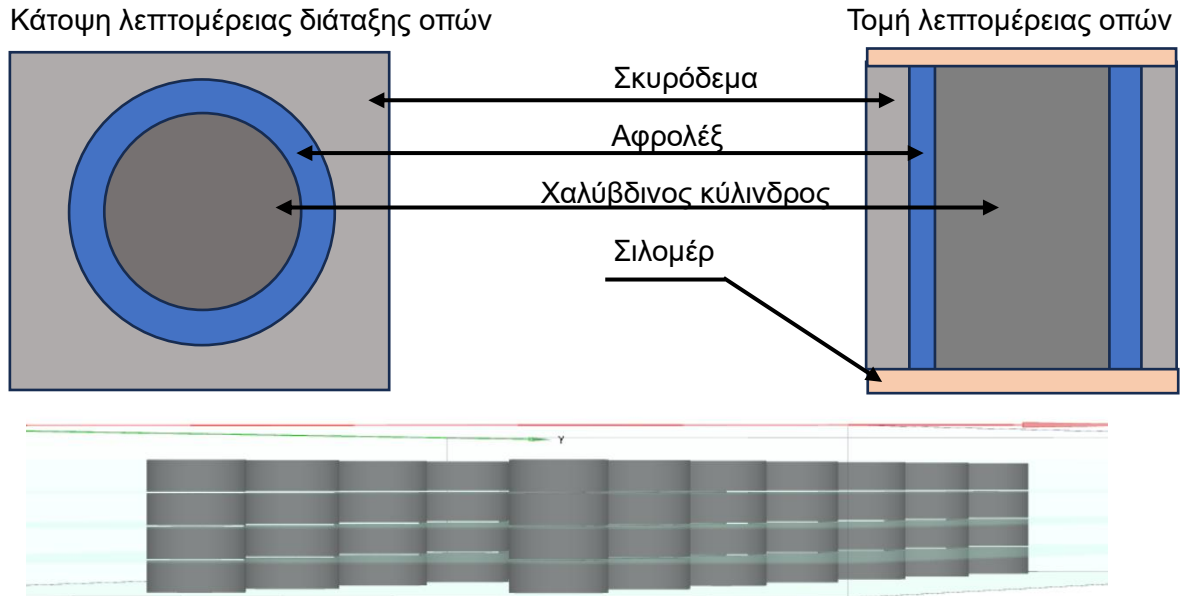
#### 4.6. Γεωμετρία και Υλικά μοντέλου

Η θεωρία του Bloch υιοθετείται για μια προκαταρκτική ανάλυση στο άπειρο σύστημα πλέγματος, παρέχοντας μια αναλυτική προσέγγιση του προβλήματος, ενώ η κλασική ανάλυση κραδασμών πραγματοποιείται περαιτέρω για την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την απόκριση της περίπτωσης πεπερασμένου πλέγματος, η οποία είναι καλύτερη, αντιστοιχεί σε μια πραγματική ρύθμιση. Προτείνεται μια νέα εννοιολογική διαμόρφωση μοναδιαίας κυψέλης, η οποία εισάγει μια διακριτή, αντί για συνεχή, υλοποίηση των ελαστικών στοιχείων και προωθεί τη χρήση τενόντων αντί του περιβάλλοντος μέσου. Η μοναδιαία κυψέλη περιλαμβάνει έναν πυρήνα πυκνής μάζας, ο οποίος αναρτάται στο λεπτό κέλυφος ενός εξωτερικού στοιχείου χρησιμοποιώντας κατάλληλα καταπονημένους και γεωμετρικά κατανομημένους τένοντες. Ο προτεινόμενος σχεδιασμός διαθέτει χαμηλό κόστος και άμεσα διαθέσιμα υλικά, όπως ο χάλυβας, το σκυρόδεμα, το αφρολέξ και το καουτσούκ πυριτίου (σιλομέρ).

Στο Σχήμα παρουσιάζεται η υπό εξέταση κατασκευή. Αποτελείται από τέσσερις πλάκες οπλισμένου σκυροδέματος σε διατομή με μήκος 26 m, πλάτος 7 m και πάχος 20cm. Ενδιάμεσα από τις πλάκες παρεμβάλλονται υλικά επιφάνειες εξαιρετικά χαμηλής απόσβεσης που πραγματοποιείται με κατάλληλο συνδυασμό στρώσεων χάλυβα και σιλομέρ. Κάθε πλάκα σκυροδέματος διαθέτει έναν κάρναβο από κυλινδρικές οπές εγκλεισμένες. Τα εγκλείσματα αυτά είναι πληρωμένα με κυλίνδρους χάλυβα περιελκυσμένους με αφρολέξ, ώστε να μπορούν να λειτουργήσουν σαν εσωτερικά αντηχεία. Η προκύπτουσα πλεγμένη δομή σχηματίζει ένα πλέγμα που δημιουργεί μια ζώνη διακοπής, η οποία απαγορεύει τη διάδοση ελαστικών κυμάτων εντός του εύρους συχνοτήτων κενού ζώνης.



Σχήμα 3: Σχέδιο μοντέλου βάσης



Σχήμα 4: Διάταξη εσωτερικών κύλινδρων από χάλυβα

Μαζί με την απόσβεση λόγω του ελαστομερούς, η παρουσία στο χωρικά διατεταγμένων τοπικών αντηχείων με διάσταση μικρότερη από το μήκος κύματος των διαδομένων κυμάτων επιτρέπει τον χειρισμό κυμάτων κάτω του μήκους κύματος. Η προκύπτουσα πλεγμένη δομή σχηματίζει ένα φωνονικό πλέγμα που δημιουργεί μια ζώνη διακοπής, η οποία απαγορεύει τη διάδοση ελαστικών κυμάτων εντός του εύρους συχνοτήτων κενού ζώνης.

## 5. Μοντελοποίηση – παραμετροποίηση

### 5.1. Τύποι παραμετροποίησης υλικών

Μετά από την ανάλυση των παραπάνω εξισώσεων προχωρήσαμε στην παραμετροποίηση των υλικών και στον προσδιορισμό των ορίων εξέτασης του μοντέλου. Πιο αναλυτικά οι διαστάσεις της δομής μας είναι πλάτος 7m και μήκος 28m, πάχος πλάκας από 0,2 μέχρι 0,4 μέτρα, διάμετρος οπών από 0,3 μέχρι 0,6 μέτρα, πάχος ελαστομερούς μεταξύ των πλακών από 0,01 έως 0,025 μέτρα και πάχος του rubber γύρω από τον χάλυβα 0,01 έως 0,05 μέτρα. Τέλος για τον σχεδιασμό του καννάβου των οπών χρησιμοποιήθηκε μεταξύ τους απόσταση από  $2 \cdot D$  μέχρι  $6 \cdot D$ , όπου  $D$  η διάμετρος των οπών.

Για τον υπολογισμό της εξωτερικής στιβαρότητας το  $K_e$ , λόγω των δύο πλευρών αλληλεπίδρασης (πάνω και κάτω), χρησιμοποιούμε την εξίσωση:

$$K_e = \frac{2E_{re}A_{re}}{t} \left( \frac{\text{kN}}{\text{m}} \right)$$

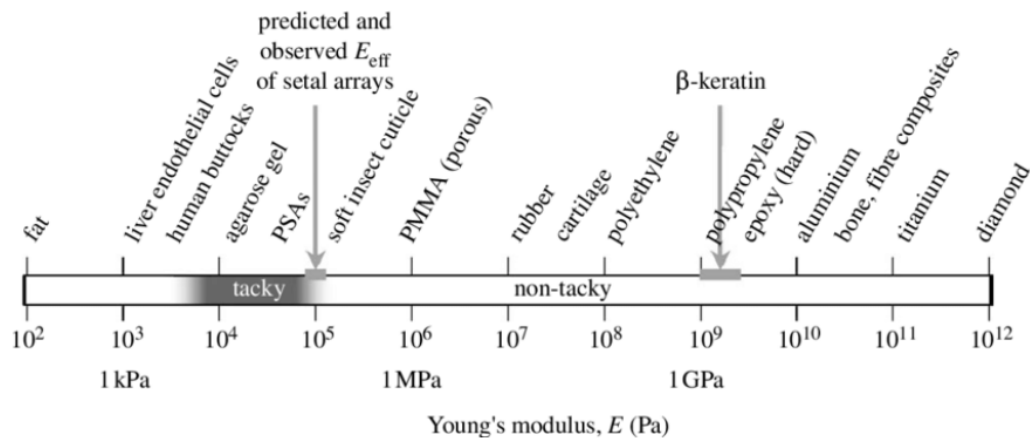
,όπου  $E_{re}$  το μέτρο ελαστικότητας,  $A_{re}$  η επιφάνεια και  $t$  το πάχος του ελαστομερούς ανάμεσα στις πλάκες.

Ενώ για τον υπολογισμό της εσωτερικής στιβαρότητας το  $K_i$ , λόγω του κοίλου σχήματος για την διάτμηση και λόγω της μετακίνησης πάνω κάτω, χρησιμοποιούμε την εξίσωση:

$$K_i = \left( \frac{GA_{ri}\pi}{h} + \frac{E\pi(D + 2h)^2}{8h} \right) n_c \quad \left( \frac{kN}{m} \right)$$

,όπου G το μέτρο διάτμησης με  $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$ ,  $A_{ri}$  η επιφάνεια επιρροής, E το μέτρο ελαστικότητας και h το πάχος του εσωτερικού rubber-αφρολέξ.

Ως προς τα ποιοτικά χαρακτηριστικά εξετάστηκε η χρήση ελαφρούς έως και κανονικού μπετόν ( $\rho = 1,2-2,4 \text{ tons/m}^3$ ) και ελαστομεροί με μέτρο ελαστικότητας από 1800 με 4000 kPa (αφρολέξ, σιλομέρ) σύμφωνα με τις τιμές του Young's modulus.



**Εικόνα 5.1-1: Young's modulus για το μέτρο ελαστικότητας των υλικών E(Pa)**

Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται συνοπτικά όλα τα όρια του μοντέλου μας, μαζί με τις εξισώσεις για τον προσδιορισμό του μέτρου ελαστικότητας, των μητρώων στιβαρότητας και των μαζών του μοντέλου.

Τεχνικά Χαρακτηριστικά						
Πλάκα σκυροδέματος				Rubber-αφρολέξ		
H	0.2	0.4	m	G	$G = \frac{E}{2(1 + \nu)}$ (kPa)	
$\rho_c$	1.4	2.4	tons/m <sup>3</sup>	h	0.01	0.025 m
$L_x$	26	m		E	1800	4000 kPa
$L_y$	7	m		$\nu$	0.23	
$V_p$	$V_p = L_x L_y H - \frac{\pi(D+t)^2}{4} H n_c$ (m <sup>2</sup> )			$A_{ri}$	$A_{ri} = DH$ (m <sup>2</sup> )	
$m_e$	$m_e = \rho_c V_p$ (kg)			$K_i$	$K_i = \left( \frac{GA_{ri}\pi}{h} + \frac{E\pi(D + 2h)^2}{8h} \right) n_c$ $\left( \frac{kN}{m} \right)$	
Κύλινδροι				Ελαστομερές Σιλομέρ		
D	0.3	0.6	m	t	0.01	0.05 m
$\rho_s$	7.8	tons/m <sup>3</sup>		$E_{re}$	1800	4000 kPa
s/d	2D	6D	m			
$n_c$	14	189				

## Εφαρμογή Μεταλλικών στη Θεμελίωση Μηχανών Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας για Δυναμική Φόρτιση

$V_c$	$V_c = \frac{\pi D^2 H}{4} \quad (\text{m}^3)$	$A_{re}$	$A_{re} = L_x L_y \quad (\text{m}^2)$
$m_i$	$m_i = n_c \rho V_c \quad (\text{kg})$	$K_e$	$K_e = \frac{2E_{re}A_{re}}{t} \quad \left(\frac{\text{kN}}{\text{m}}\right)$

**Πίνακας 5-1:Τεχνικά χαρακτηριστικά μοντέλου**

Συμβολίζουμε με  $m_e$  την εξωτερική μάζα (external),  $m_i$  την εσωτερική μάζα του χάλυβα (internal) και  $\rho_c$  και  $\rho_s$  την πυκνότητα του σκυροδέματος και του χάλυβα αντίστοιχα.

### 5.2. MathCad

#### 5.2.1. Μοντελοποίηση βάση στρώσεων

Μετά τον καθορισμό των ορίων του μοντέλου και των εξισώσεων, έγινε η ανάλυση αυτών σε σύστημα προς επίλυση για το πρόγραμμα MathCad. Συγκεκριμένα δοκιμάστηκαν πολλαπλές στρώσεις της δομής μας, με διάφορα χαρακτηριστικά και έγινε σύγκριση με την αντίστοιχη ίδιου πάχους απλή βάση από μπετόν με ένα έλασμα ίδιου πάχους με αυτό του μοντέλου στην βάση. Τέλος ορίζουμε μία σταθερή δύναμη για την εξέταση του μοντέλου μας  $F_0=10\text{kN}$ .

Στο πρώτο στάδιο αυτής της ανάλυσης δοκιμάστηκε η μορφοποίηση της μονάδας των στρώσεων και πολλαπλασιάσαμε τον αριθμό τους. Συγκεκριμένα η ανάλυση ξεκίνησε για πάχος πλάκας  $H=0,2\text{m}$ , με 105 οπές, πάχος ελαστομερούς σιλομέρ  $h=0.01$  και πάχος Αφρολέξ-rubber  $t=0,01\text{m}$  σταθερά με μέτρο ελαστικότητας  $E=1800\text{kPa}$  και μεταβάλλαμε τον αριθμό στρώσεων.

Για την βάση από απλό σκυροδέμα χρησιμοποιήθηκε πάχος πλάκας  $H=n*0,2$ , όπου  $n$  ο αριθμός στρώσεων και μία στρώση ελαστομερούς σιλομέρ στην βάση πάχους  $h=0,01\text{m}$ . Η εξίσωση για την μετακίνηση είναι,

$$u_0(\omega) = \frac{F_0}{K_e - M_1 \omega^2} \quad (1)$$

όπου  $K_e= 65520000\text{ kN/m}$  η στιβαρότητα του ελαστομερούς,  $M_1$  η μάζα του σκυροδέματος που εξαρτάται από το πάχος, εξισώσεων για τις διάφορες στρώσεις στο πρόγραμμα MathCad και  $\omega$  η κυκλική συχνότητα.

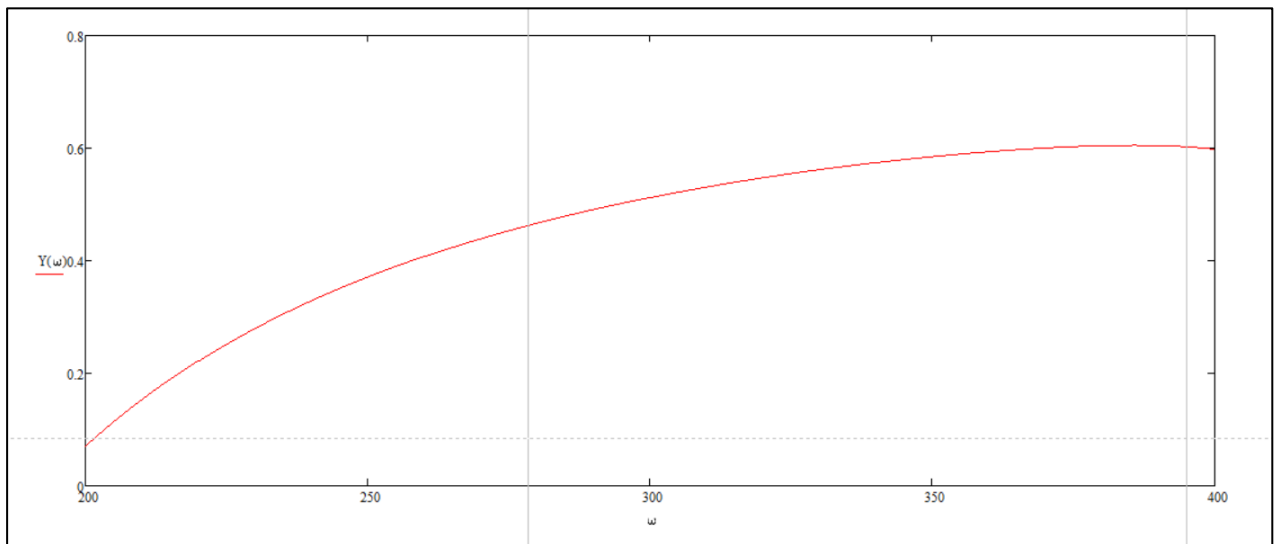
Με την βοήθεια του προγράμματος δημιουργήθηκαν αντίστοιχα και τα διάφορα διαγράμματα του λόγου  $Y(\omega)$  μετακίνησης του μοντέλου μας προς την μετακίνηση της μίας στρώσης μπετόν, για το εύρος τιμών συχνότητας που μας ενδιαφέρει ( $\omega=200-400$ ).

$$Y(\omega) = \frac{u_n(\omega)}{u_1(\omega)}$$

Στις παρακάτω εικόνες φαίνονται τα συστήματα στο πρόγραμμα και τα διαγράμματα με τα αποτελέσματα για κάθε στρώση.

$$\begin{matrix}
 Ke := 65520000 & Ki := 2304758.19 & me := 83.55597112 & M := 2083.55597112 & F0 := 10 & mi := 11.57833972 \\
 \\
 A3(\omega) := \begin{pmatrix}
 Ke - M \cdot \omega^2 & -Ke & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 -Ke & Ki + 2 \cdot Ke - me \cdot \omega^2 & -Ki & -Ke & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & -Ki & Ki - mi \cdot \omega^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & -Ke & 0 & Ki + 2 \cdot Ke - me \cdot \omega^2 & -Ki & -Ke & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & -Ki & Ki - mi \cdot \omega^2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & -Ke & 0 & Ki + 2 \cdot Ke - me \cdot \omega^2 & -Ki & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -Ki & Ki - mi \cdot \omega^2 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -Ke & 0 & Ki + 2 \cdot Ke - me \cdot \omega^2 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -Ki & Ki - mi \cdot \omega^2 & 0
 \end{pmatrix}^{-1} \cdot \begin{pmatrix}
 F0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0
 \end{pmatrix}
 \end{matrix}$$

Εικόνα 5.2.1.1: Σύστημα εξισώσεων 3 στρώσεων

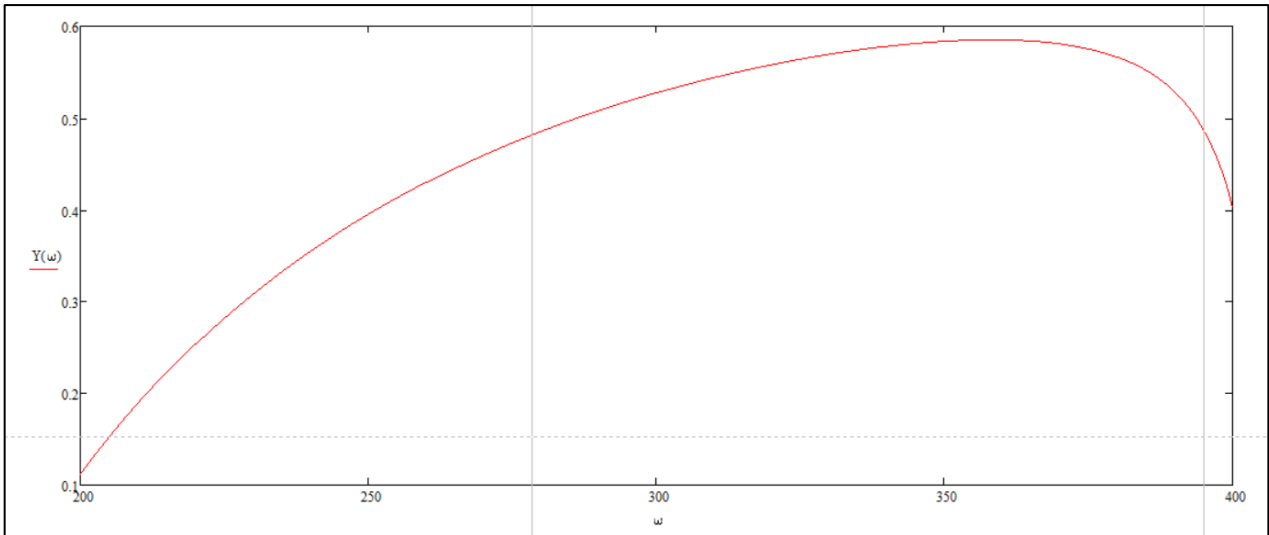


Σχήμα 5: Διάγραμμα του λόγου Y(ω) για 3 στρώσεις

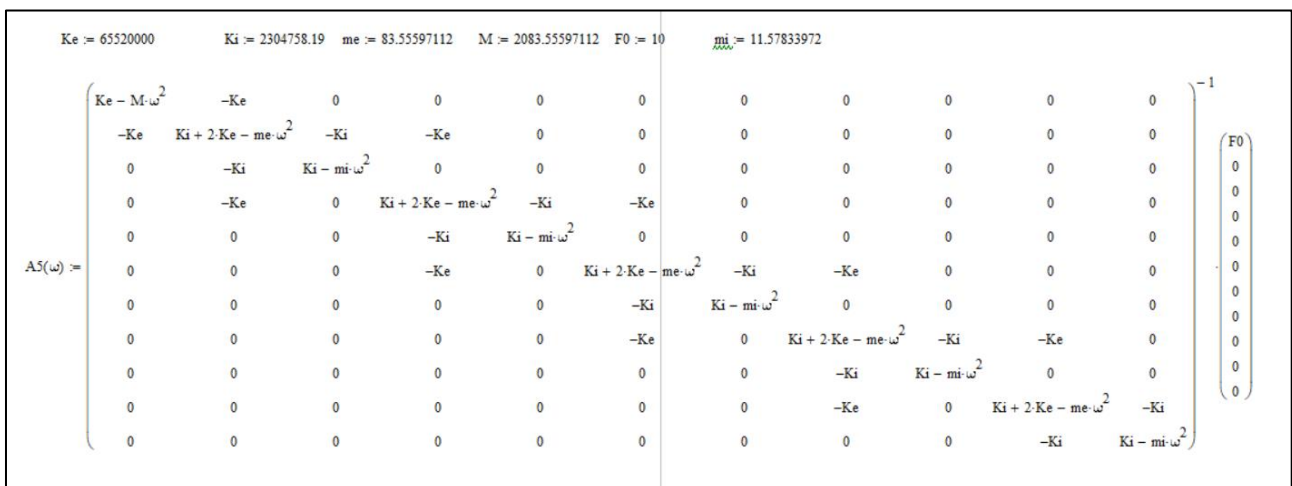
$$\begin{matrix}
 Ke := 65520000 & Ki := 2304758.19 & me := 83.55597112 & M := 2083.55597112 & F0 := 10 & mi := 11.57833972 \\
 \\
 A4(\omega) := \begin{pmatrix}
 Ke - M \cdot \omega^2 & -Ke & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 -Ke & Ki + 2 \cdot Ke - me \cdot \omega^2 & -Ki & -Ke & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & -Ki & Ki - mi \cdot \omega^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & -Ke & 0 & Ki + 2 \cdot Ke - me \cdot \omega^2 & -Ki & -Ke & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & -Ki & Ki - mi \cdot \omega^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & -Ke & 0 & Ki + 2 \cdot Ke - me \cdot \omega^2 & -Ki & -Ke & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -Ki & Ki - mi \cdot \omega^2 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -Ke & 0 & Ki + 2 \cdot Ke - me \cdot \omega^2 & -Ki & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -Ke & 0 & Ki + 2 \cdot Ke - me \cdot \omega^2 & -Ki \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -Ki & Ki - mi \cdot \omega^2 & 0
 \end{pmatrix}^{-1} \cdot \begin{pmatrix}
 F0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0
 \end{pmatrix}
 \end{matrix}$$

Εικόνα 5.2.1.2: Σύστημα εξισώσεων 4 στρώσεων

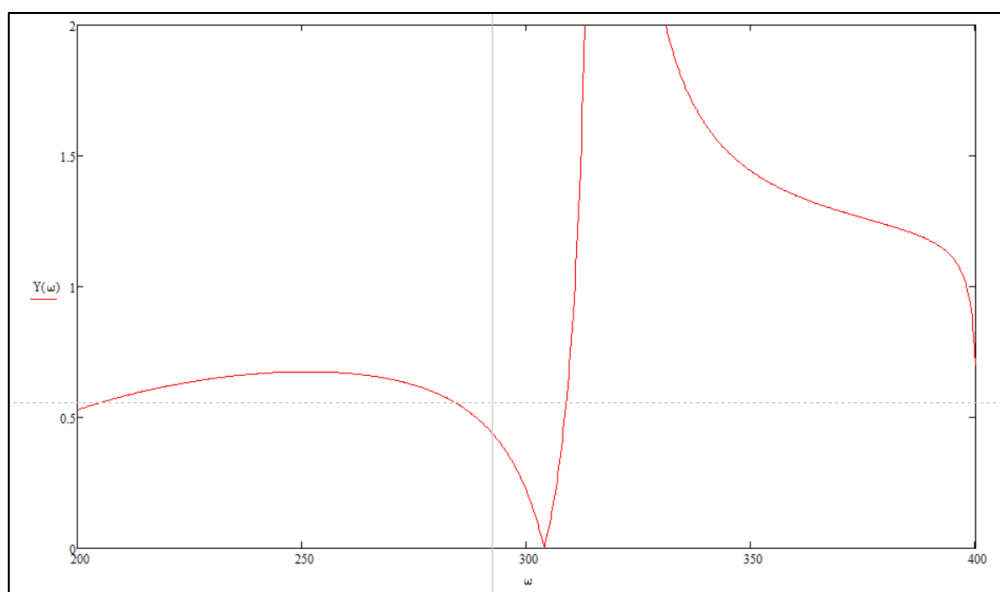
## Εφαρμογή Μεταλλικών στη Θεμελίωση Μηχανών Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας για Δυναμική Φόρτιση



**Σχήμα 6:** Διάγραμμα του λόγου  $Y(\omega)$  για 4 στρώσεις



**Εικόνα 5.2.1.3:** Σύστημα εξισώσεων 5 στρώσεων

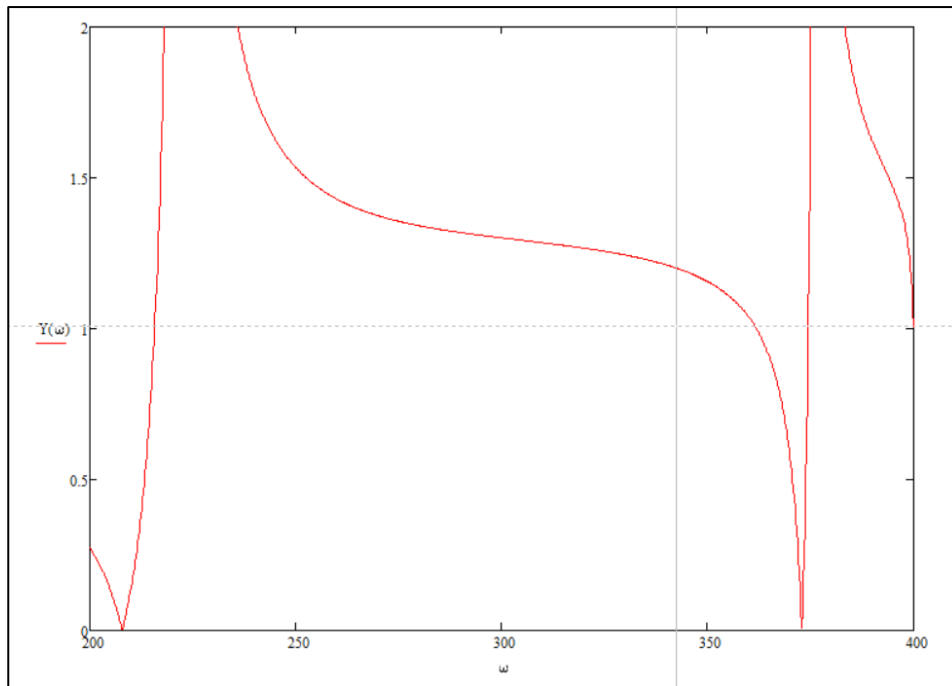


**Σχήμα 7:** Διάγραμμα του λόγου  $Y(\omega)$  για 5 στρώσεις









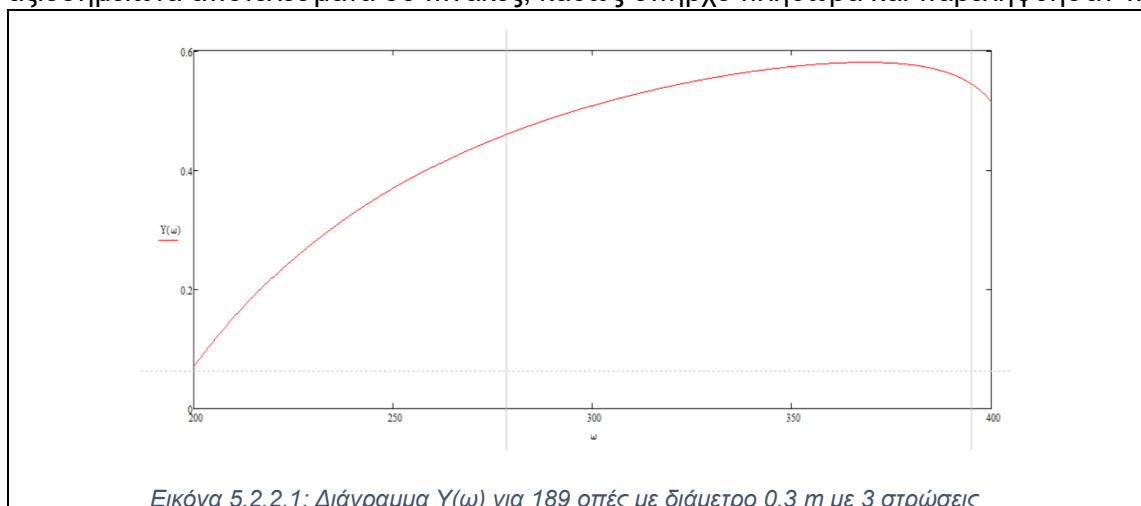
Σχήμα 10: Διάγραμμα του λόγου  $Y(\omega)$  για 8 στρώσεις

Σύμφωνα με τα παραπάνω παρατηρούμε πως στις τρεις με τέσσερις στρώσεις του μοντέλου μας έχουμε πολύ καλή απόδοση, με λόγο κάτω από μονάδα ,στο εύρος που μας ενδιαφέρει. Μετά όμως από τις τέσσερις στρώσεις , δηλαδή από τις πέντε μέχρι τις οχτώ , παρατηρούμε μία αύξηση του λόγου. Αυτό, λοιπόν, σημαίνει πως σε εκείνα τα σημεία η απλή βάση από απλό μπετόν έχει καλύτερη απόκριση στην απόσβεση των κυμάτων από το σύστημα μας.

### 5.2.2. Μοντελοποίηση με διαφορετικό αριθμό οπών

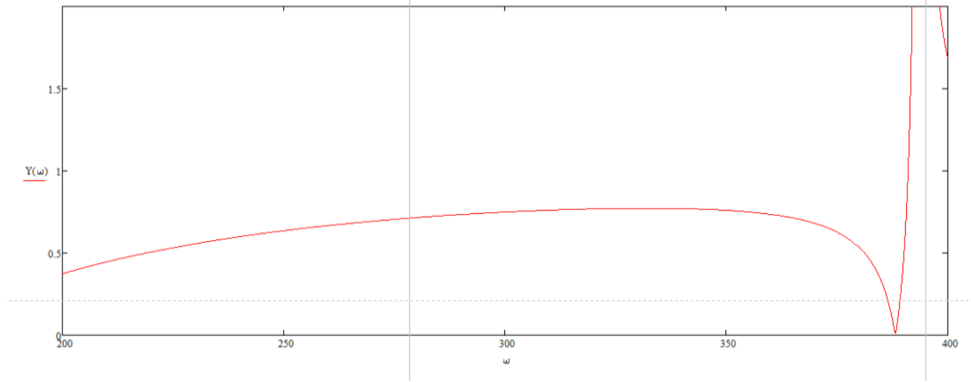
Στο επόμενο στάδιο της ανάλυσης μας , με βάση τα παραπάνω επεξεργαστήκαμε τις σχέσεις για τρεις και τέσσερις στρώσεις με τα παραπάνω χαρακτηριστικά. Μέσω της αυξομείωσης του αριθμού των οπών , έγινε προσπάθεια προσέγγισης ενός καλύτερου μοντέλου με χαμηλές μετατοπίσεις για την απορρόφηση των οριζόντιων κυμάτων. Τέλος έγινε όπως προηγουμένως σύγκριση με απλή βάση μπετόν , δημιουργώντας τον λόγο  $Y(\omega)$ .

Παρακάτω φαίνονται συνοπτικά μερικά διαγράμματα του λόγου  $Y(\omega)$ , με τα πιο αξιοσημείωτα αποτελέσματα σε πίνακες, καθώς υπήρχε πληθώρα και παρελήφθησαν πολλά.

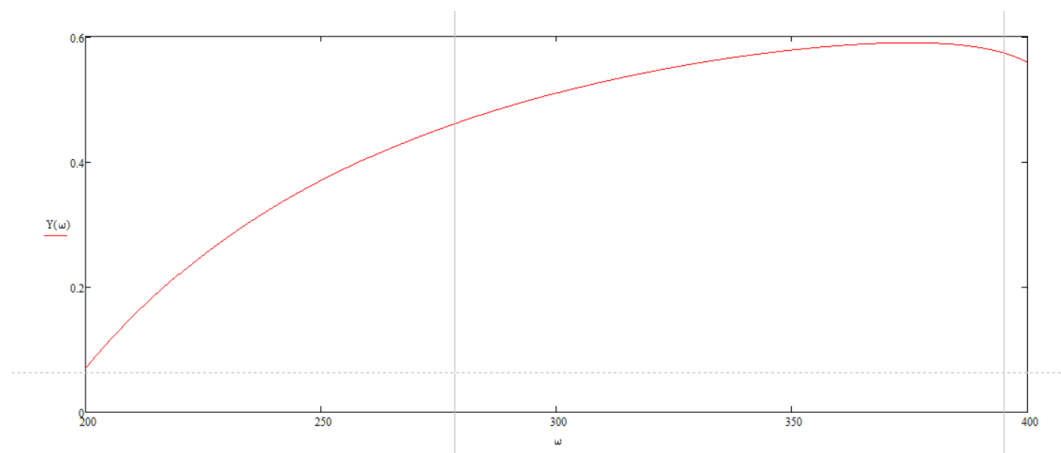


Εικόνα 5.2.2.1: Διάγραμμα  $Y(\omega)$  για 189 οπές με διάμετρο 0,3 m με 3 στρώσεις

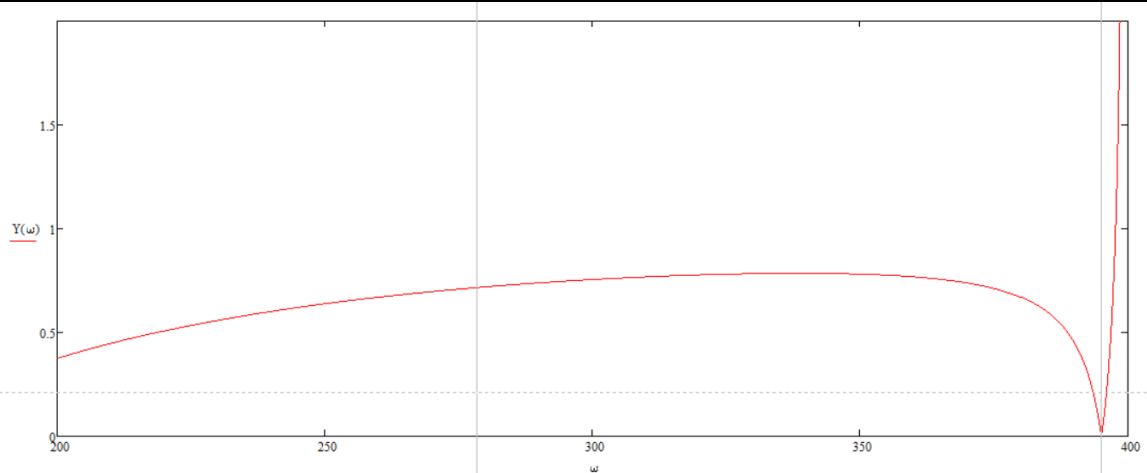
## Εφαρμογή Μεταλλικών στη Θεμελίωση Μηχανών Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας για Δυναμική Φόρτιση



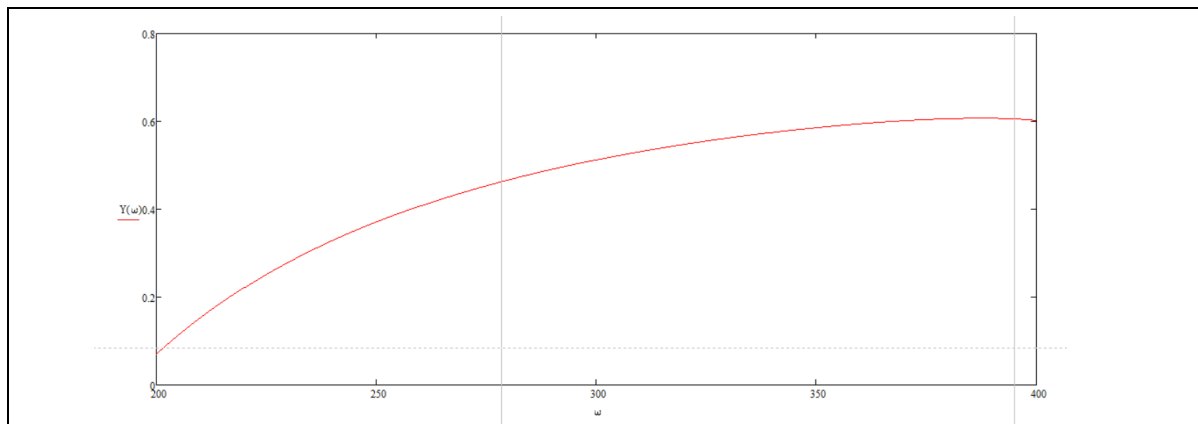
Εικόνα 5.2.2.2: Διάγραμμα  $Y(\omega)$  για 189 σπές με διάμετρο 0,3 m με 4 στρώσεις



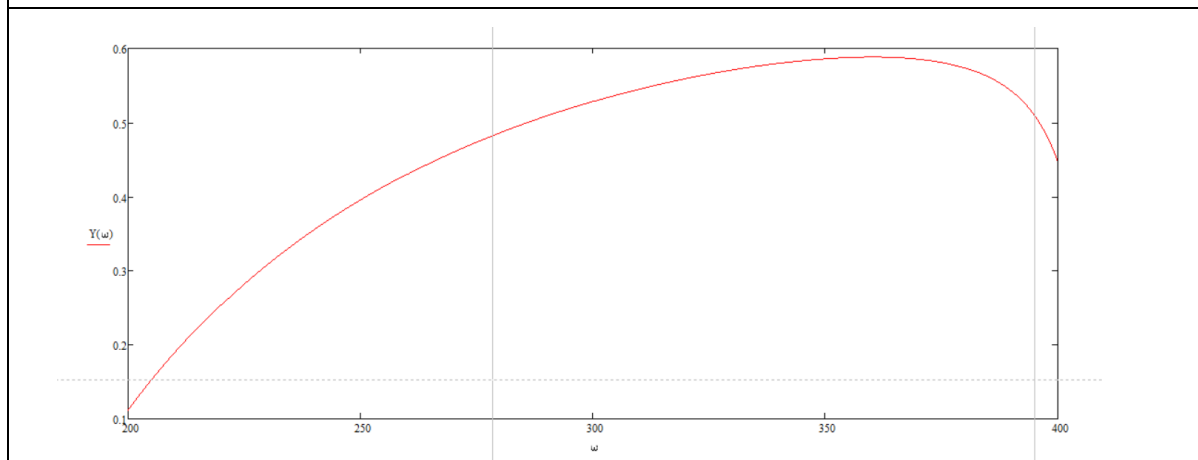
Εικόνα 5.2.2.3: Διάγραμμα  $Y(\omega)$  για 154 σπές με διάμετρο 0,3 m με 3 στρώσεις



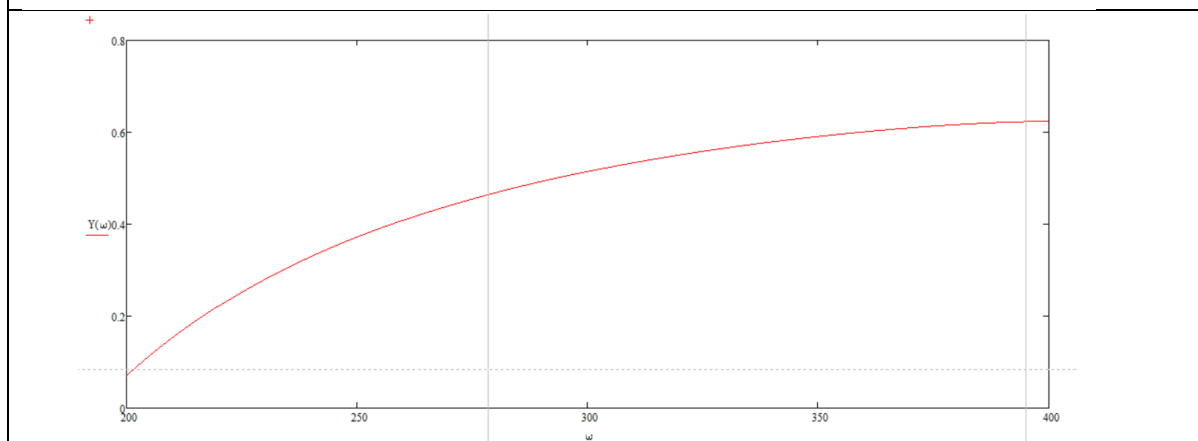
Εικόνα 5.2.2.4: Διάγραμμα  $Y(\omega)$  για 154 σπές με διάμετρο 0,3 m με 4 στρώσεις



Εικόνα 5.2.2.5: Διάγραμμα  $Y(\omega)$  για 98 οπές με διάμετρο 0,3 m με 3 στρώσεις

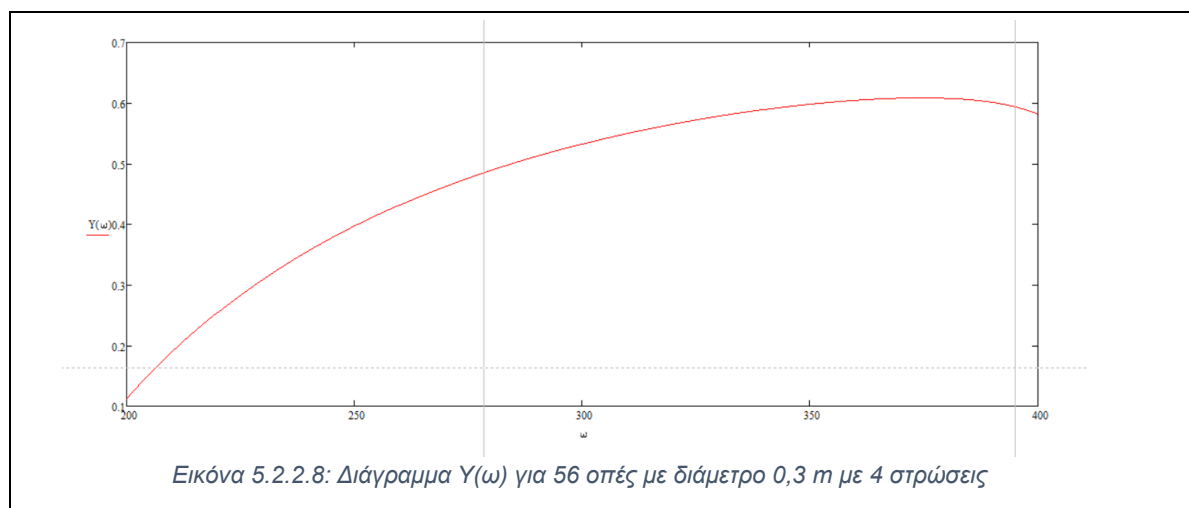


Εικόνα 5.2.2.6: Διάγραμμα  $Y(\omega)$  για 98 οπές με διάμετρο 0,3 m με 4 στρώσεις



Εικόνα 5.2.2.7: Διάγραμμα  $Y(\omega)$  για 56 οπές με διάμετρο 0,3 m με 3 στρώσεις

## Εφαρμογή Μεταλλικών στη Θεμελίωση Μηχανών Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας για Δυναμική Φόρτιση

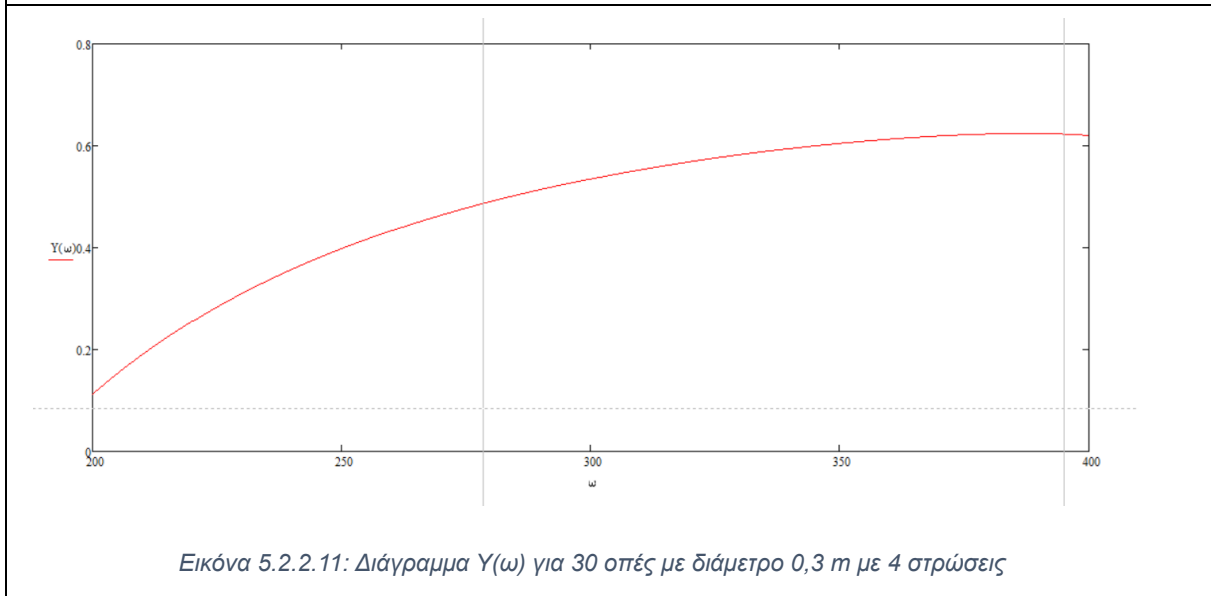
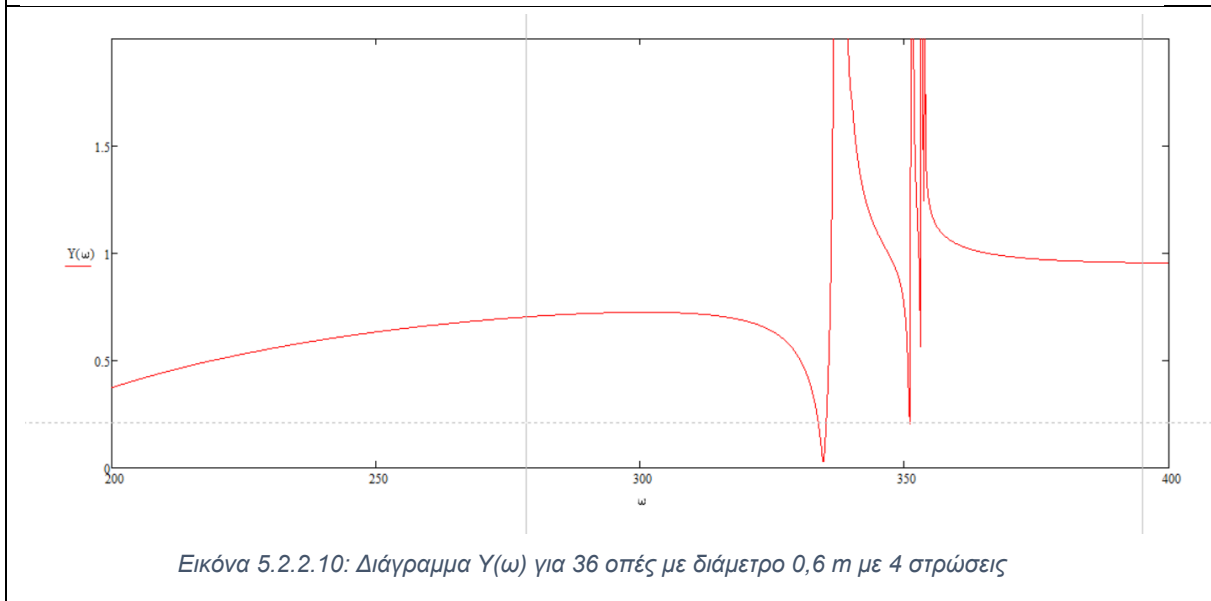
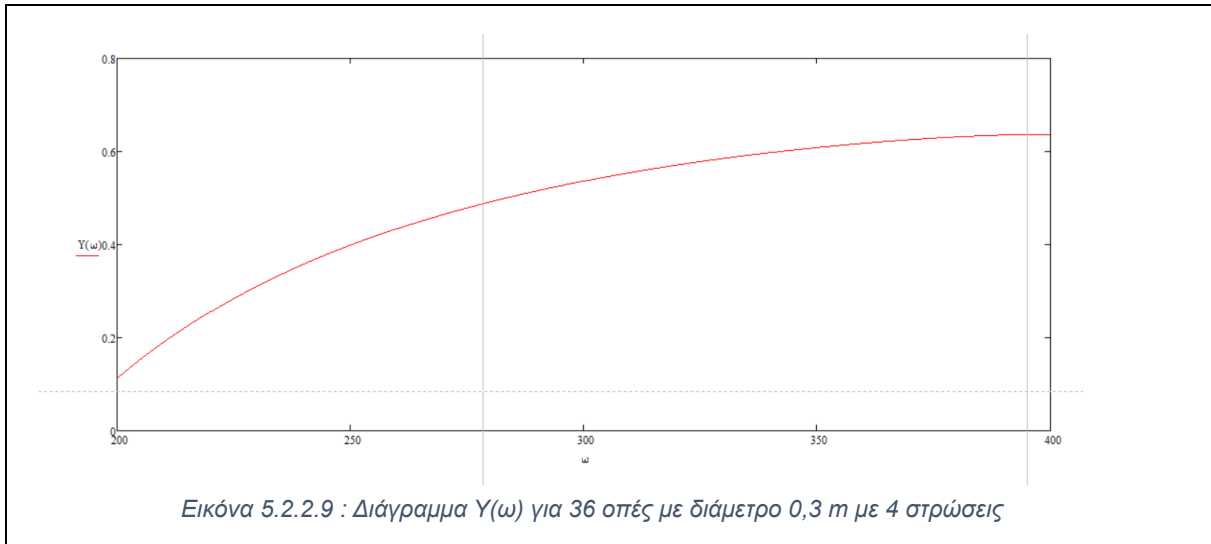


<b>Χαρακτηριστικά μοντέλου για <math>H=0,2</math> m , <math>\rho c=2,4</math> tns/m<sup>2</sup> και <math>D=0.3</math> m</b>				
	<b>189 οπές</b>	<b>154 οπές</b>	<b>98 οπές</b>	<b>56 οπές</b>
<b><math>m_e</math></b>	80,5127	81,78075	83,8095	85,3311
<b><math>m_i</math></b>	20,8410	16,9815	10,8064	6,17511
<b>Συνολική Μάζα 3 στρώσεων</b>	304,0612	296,286	283,848	274,518
<b>Συνολική Μάζα 4 στρώσεων</b>	342,892	344,105	346,044	347,5
<b><math>M</math></b>	2.080,5127	2.081,78075	2.083,8095	2.085,3311
<b><math>K_i</math></b>	4.148.564,74	3.380.312,012	2.151.107,644	1.229.204,368
<b><math>K_e</math></b>	65.520.000	65.520.000	65.520.000	65.520.000

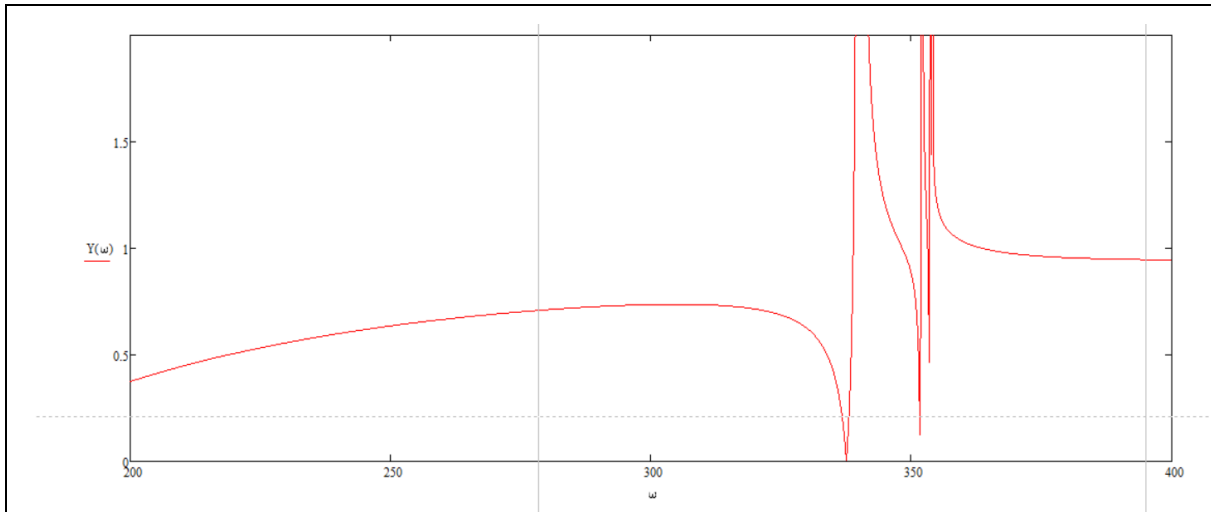
*Πίνακας 5-2: Πίνακας χαρακτηριστικών*

Παρατηρώντας τα παραπάνω αποτελέσματα , συμπεραίνουμε πως για μεγάλο αριθμό οπών με μικρή διάμετρο και 3 στρώσεις έχουμε μία πολύ καλή απόδοση κάτω από 0,6 . Αυξάνοντας όμως τον αριθμό των οπών καθώς και των στρώσεων παρατηρούμε τοπικά μέγιστα που ξεκινούν κοντά στα 400 rad/s ή 63 Hz. Επίσης παρατηρούμε πως όσο μειώνεται η μάζα του εσωτερικού χάλυβα και αυξάνεται η μάζα του μπετόν , έχουμε καλύτερη απόδοση , παρόλη την αύξηση του  $K_i$  , της εσωτερικής δυσκαμψίας. Τέλος σε σχέση με τις στρώσεις όσο αυξάνεται η συνολική μάζα της κατασκευής μας, παρουσιάζονται τοπικά μέγιστα για μεγάλο αριθμό οπών.

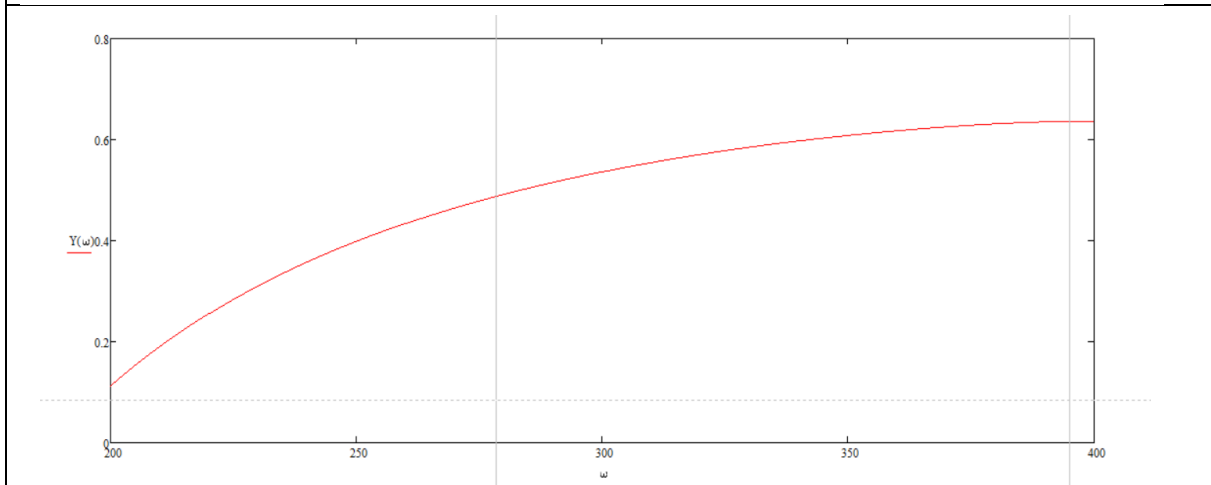
Στην συνέχεια ερευνήθηκε η περαιτέρω μείωση των οπών καθώς και η αύξηση της διαμέτρου τους. Ακολουθούν εν συντομία τα πιο σημαντικά αποτελέσματα.



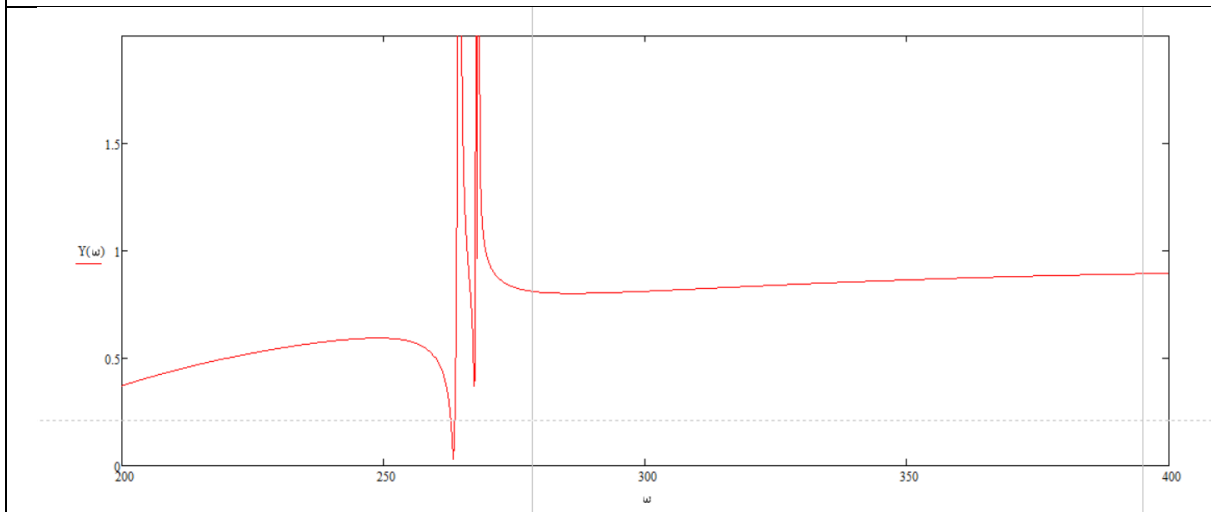
## Εφαρμογή Μεταλλικών στη Θεμελίωση Μηχανών Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας για Δυναμική Φόρτιση



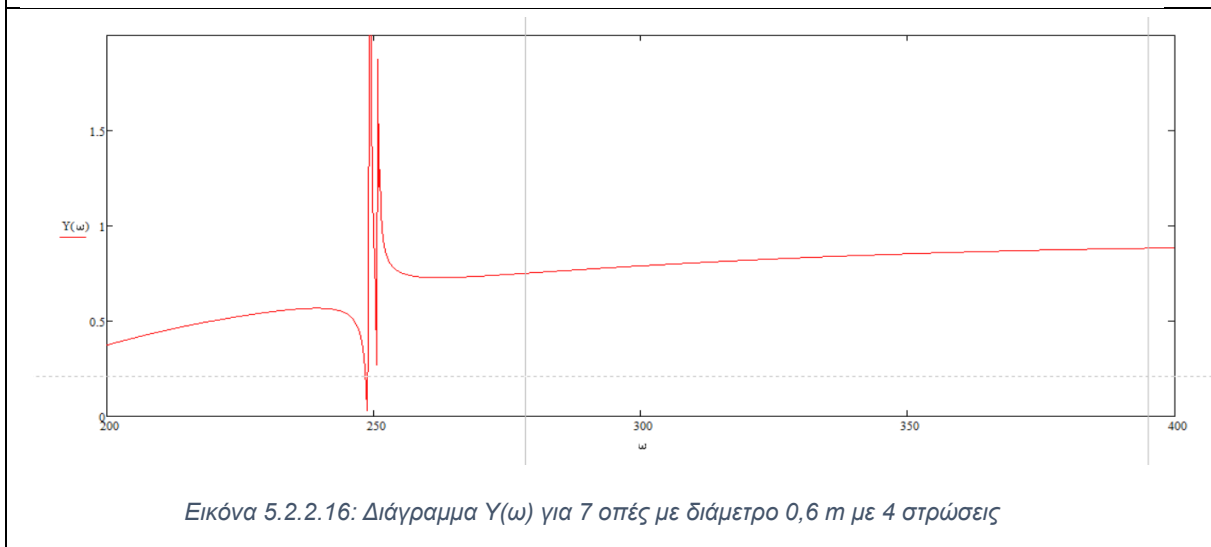
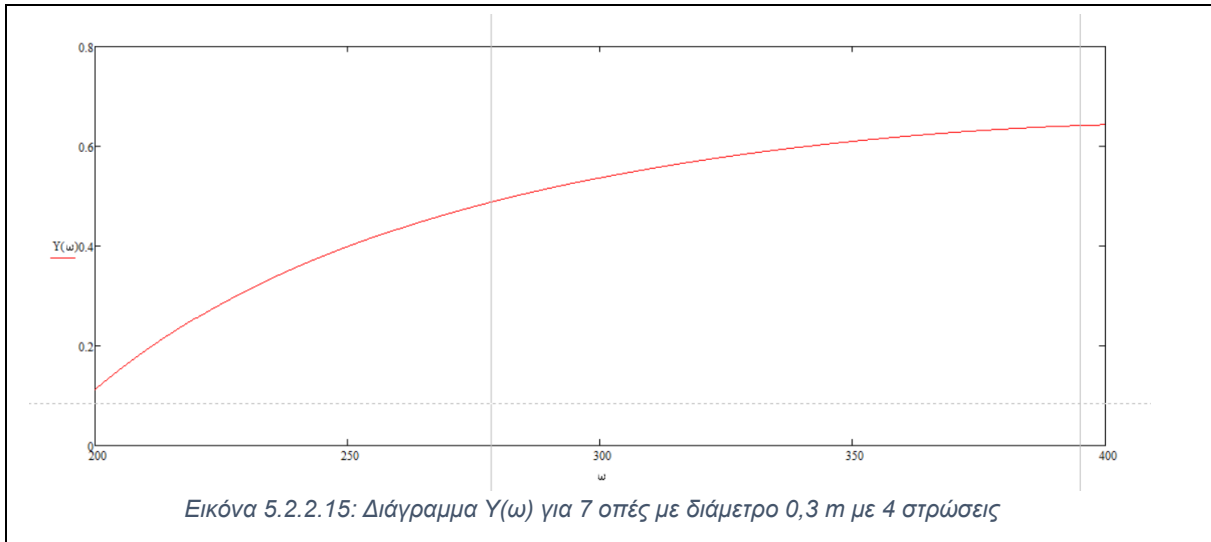
Εικόνα 5.2.2.12: Διάγραμμα  $Y(\omega)$  για 30 οπές με διάμετρο 0,6 m με 4 στρώσεις



Εικόνα 5.2.2.13: Διάγραμμα  $Y(\omega)$  για 14 οπές με διάμετρο 0,3 m με 4 στρώσεις



Εικόνα 5.2.2.14: Διάγραμμα  $Y(\omega)$  για 14 οπές με διάμετρο 0,6 m με 4 στρώσεις



Χαρακτηριστικά μοντέλου για $H=0,2\text{ m}$ , $\rho_c=2,4\text{ tns/m}^2$ και $D=0.3\text{ m}$				
	36 οπές	30 οπές	14 οπές	7 οπές
$m_e$	86,05576	86,2731	86,8527	87,1063
$m_i$	3,96971	3,30809	1,5437	0,771889315
Συνολική Μάζα 4 στρώσεων	360,1019	358,3249	353,5862	351,513
$M$	2.086,05576	2.086,2731	2.086,852	2.087,1063
$K_i$	790.202,807	658.502,339	307.301,092	153.650,54
$K_e$	65.520.000	65.520.000	65.520.000	65.520.000

Πίνακας 5-3: Πίνακας χαρακτηριστικών για  $D=0.3\text{ m}$

Χαρακτηριστικά μοντέλου για $H=0,2\text{ m}$ , $\rho_c=2,4\text{ tns/m}^2$ και $D=0.6\text{ m}$				
	36 οπές	30 οπές	14 οπές	7 οπές
$m_e$	82,3099	83,1516	85,396	86,378
$m_i$	15,87	13,2323	6,1751	3,0875
Συνολική Μάζα 4 στρώσεων	392,755	385,5361	366,284	357,862
$M$	2.082,3099	2.083,1516	2.085,3961	2.086,3780
$K_i$	2.004.330,29	1.670.275,24	779.461,7793	389.730,88
$K_e$	65.520.000	65.520.000	65.520.000	65.520.000

Πίνακας 5-4: Πίνακας χαρακτηριστικών για  $D=0.6\text{ m}$

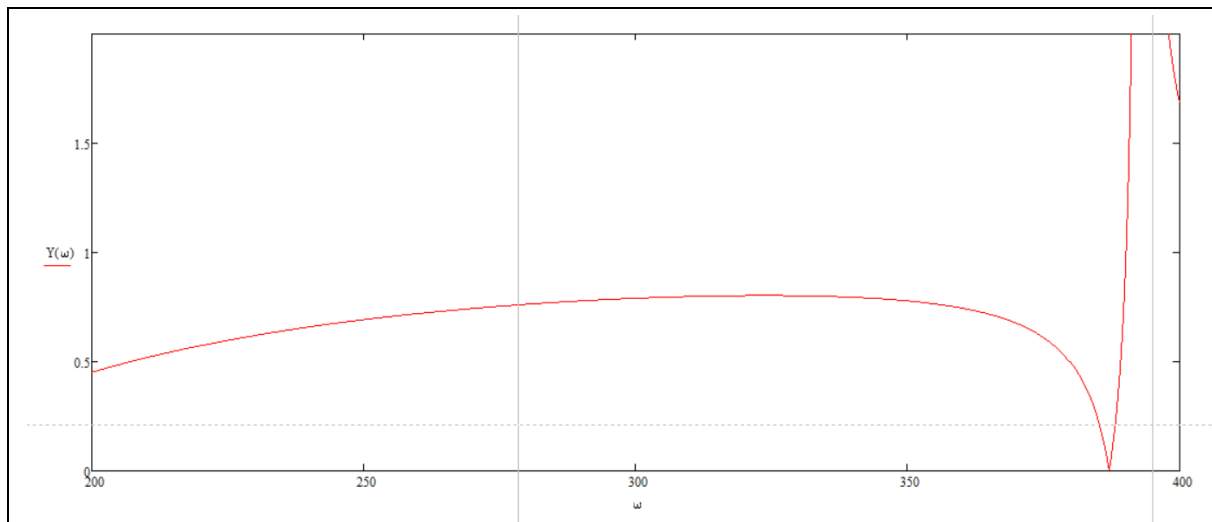
## Εφαρμογή Μεταλλικών στη Θεμελίωση Μηχανών Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας για Δυναμική Φόρτιση

Παρατηρώντας τα παραπάνω αποτελέσματα και συγκρίνοντας τα με τις παραπάνω οπές συμπεραίνουμε πως παρόλη την αλλαγή του αριθμού οπών, για διάμετρο 0,3, έχουμε απειροελάχιστη αλλαγή στο διάγραμμα. Μειώνοντας τις οπές, μειώνεται και η εσωτερική δυσκαμψία  $K_i$ , περιμένοντας έτσι καλύτερη απόδοση, όμως παρατηρούμε πως δεν επηρεάζεται ιδιαίτερα ο λόγος μετακινήσεων, παρά μόνο σε πολύ μικρό αριθμό οπών. Επίσης συμπεραίνουμε όπως και πριν, πως όσο μειώνεται η μάζα του εσωτερικού χάλυβα και αυξάνεται η μάζα του μπετόν, έχουμε καλύτερη απόδοση, παρόλη την αύξηση της εσωτερικής δυσκαμψίας. Τέλος με την χρήση μεγαλύτερων οπών που έχουν ως αποτέλεσμα την αύξηση της εσωτερικής δυσκαμψίας, παρατηρούμε ότι δημιουργούνται μέγιστα κοντά στη τιμή 350 rad/s ή 55 Hz, άρα δεν έχουμε καλή συμπεριφορά κατασκευής στο εύρος που εξετάζουμε.

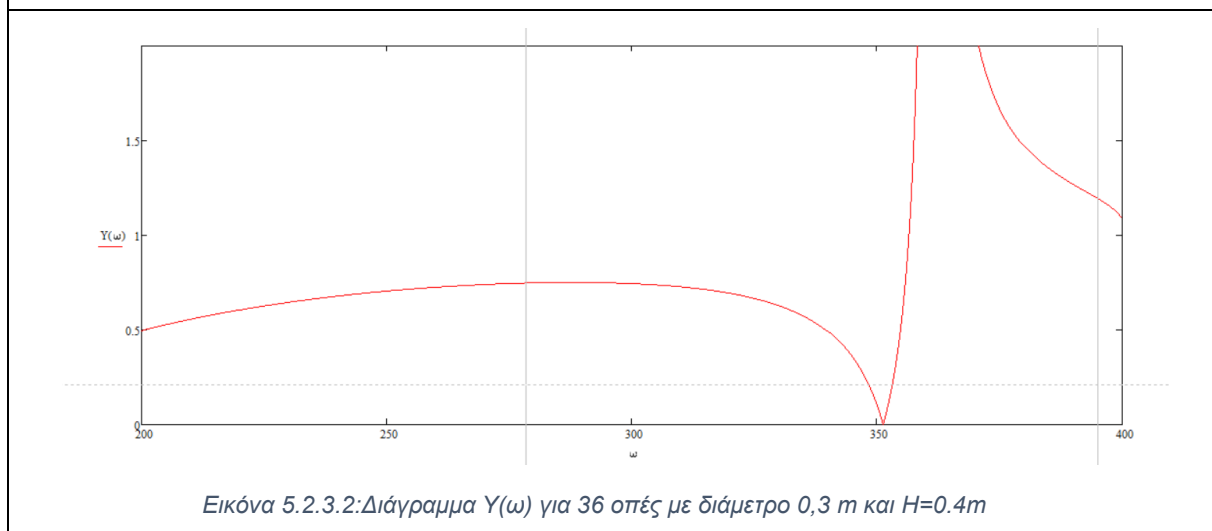
### 5.2.3. Μοντελοποίηση με διαφορετικά χαρακτηριστικά σκυροδέματος

Στην συνέχεια της μοντελοποίησης, έγινε αύξηση του πάχους πλάκας σκυροδέματος. Με την αύξηση του πάχους του σκυροδέματος αυξάνουμε τη μάζα  $m_e$  την εξωτερική, συντηρώντας όμως την μάζα  $m_i$  την εσωτερική σταθερή. Συγκρίνουμε όπως πριν το μοντέλο μας με μία απλή βάση έδρασης με ίσο πάχος σκυροδέματος.

Παρακάτω παρατίθενται διαγράμματα από μερικά από τα πιο αξιοσημείωτα αποτελέσματα για συνδυασμό 4 στρώσεων.

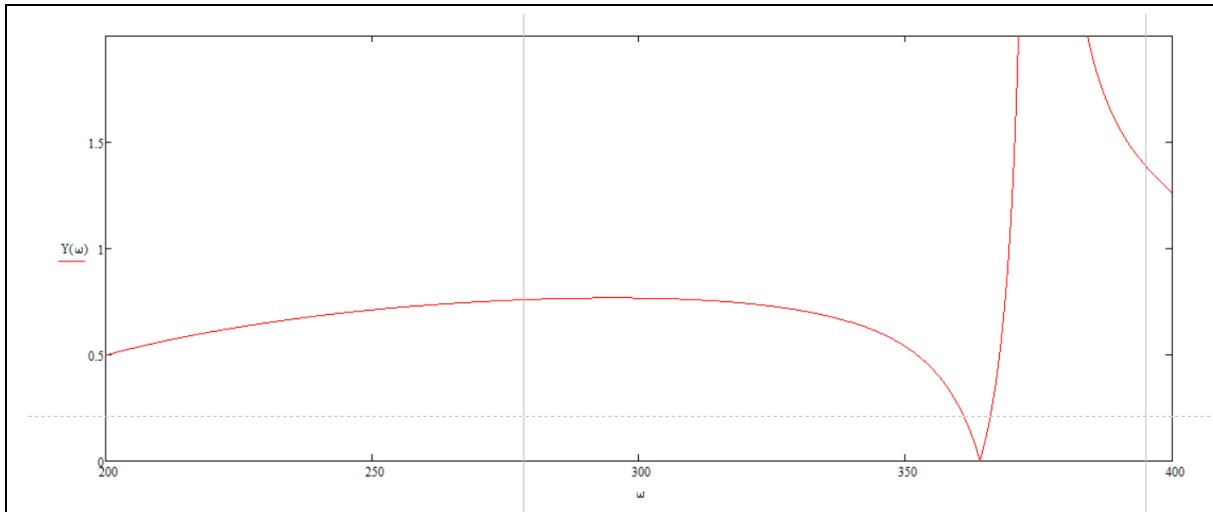


Εικόνα 5.2.3.1: Διάγραμμα  $Y(\omega)$  για 36 οπές με διάμετρο 0,3 m και  $H=0.3$  m

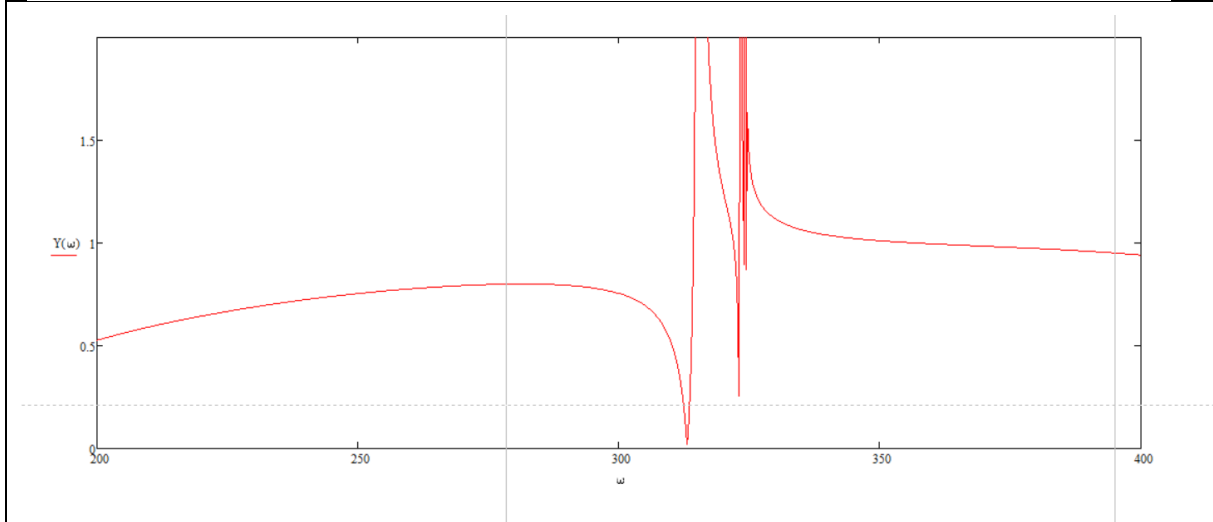


Εικόνα 5.2.3.2: Διάγραμμα  $Y(\omega)$  για 36 οπές με διάμετρο 0,3 m και  $H=0.4$  m

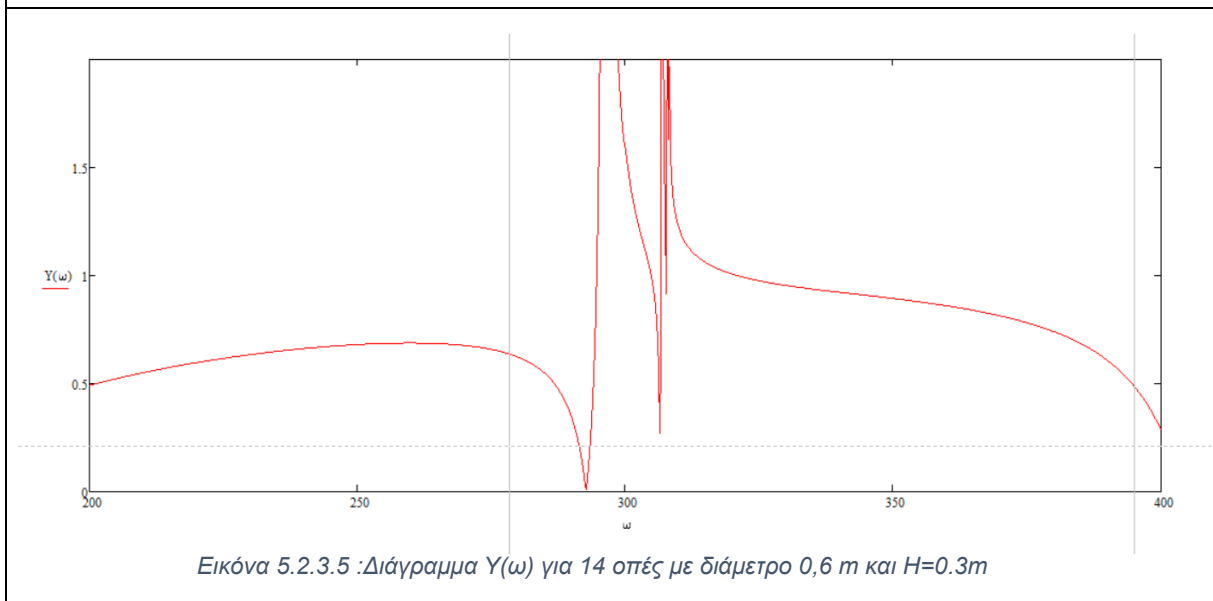




Εικόνα 5.2.3.3 :Διάγραμμα  $Y(\omega)$  για 14 σπές με διάμετρο 0,3 m και  $H=0.4m$

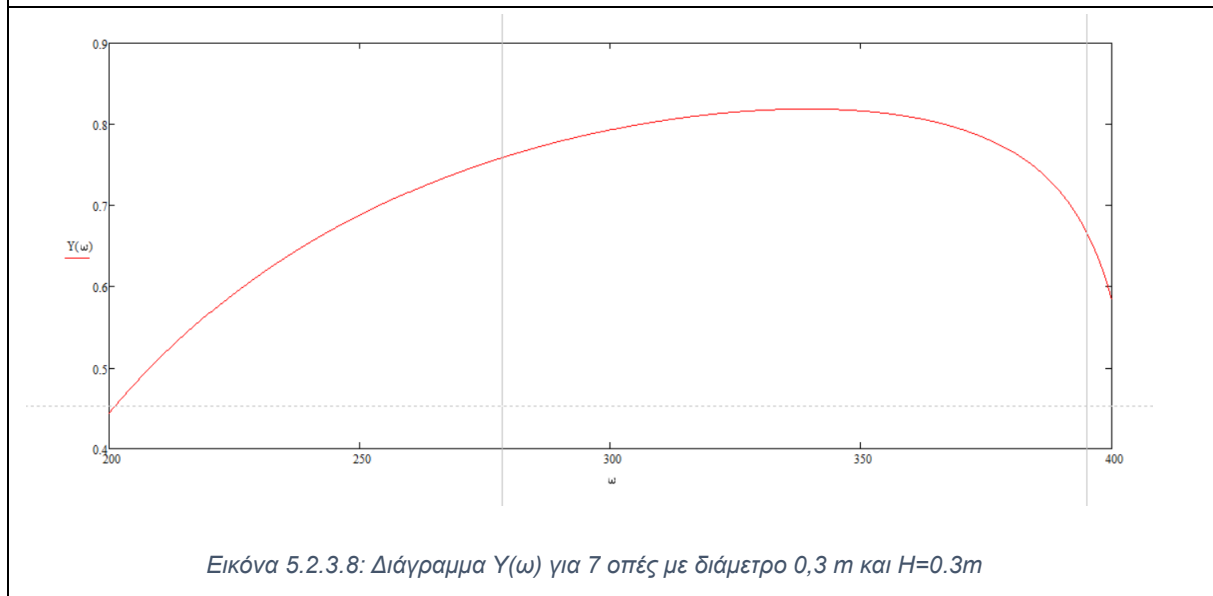
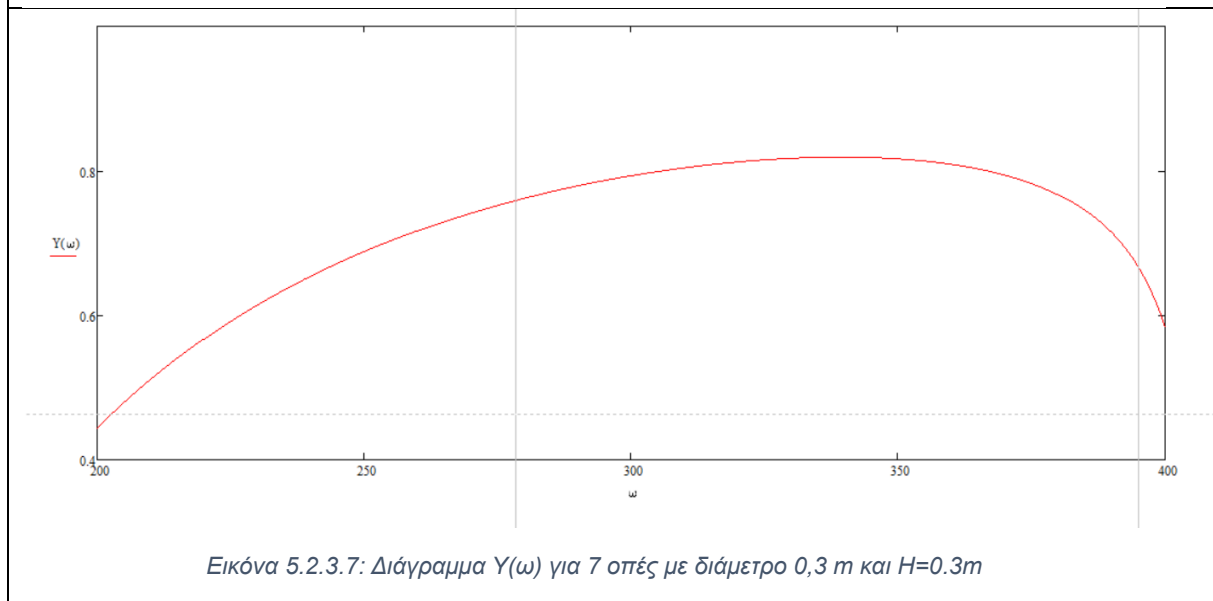
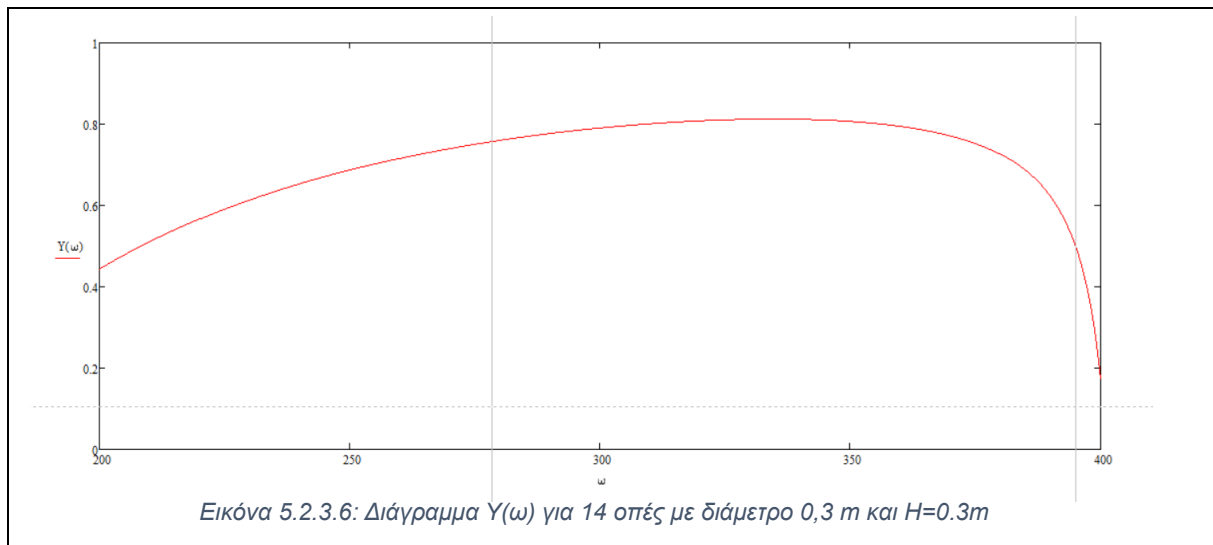


Εικόνα 5.2.3.4: Διάγραμμα  $Y(\omega)$  για 14 σπές με διάμετρο 0,6 m και  $H=0.4m$



Εικόνα 5.2.3.5 :Διάγραμμα  $Y(\omega)$  για 14 σπές με διάμετρο 0,6 m και  $H=0.3m$

## Εφαρμογή Μεταλλικών στη Θεμελίωση Μηχανών Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας για Δυναμική Φόρτιση



Χαρακτηριστικά μοντέλου για $\rho_c=2,4 \text{ tns/m}^2$ και 4 στρώσεις				
	36 οπές		14 οπές	
D=0,3 m	H=0,3 m	H=0,4 m	H=0,3 m	H=0,4 m
$m_e$	129,083	172,111	130,279	173,7055
$m_i$	5,9545	7,93942	2,3156	3,0875
Συνολική Μάζα 4 στρώσεων	540,152868	720,203824	530,3794487	707,1725982
$M$	2.129,083	2.172,111	2.130,279	2.173,7055
$K_i$	105.5016,08	1.319.829,355	410.284,0316	513.266,971
$K_e$	65.520.000	65.520.000	65.520.000	65.520.000

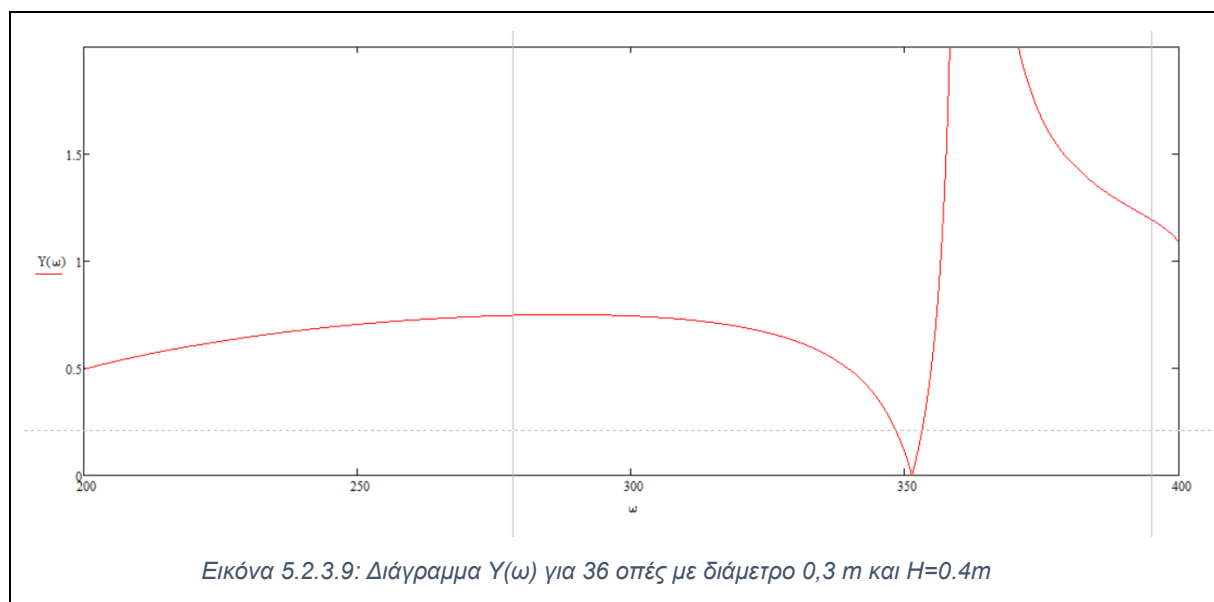
Πίνακας 5-5 :Πίνακας χαρακτηριστικών για διάφορα πάχη σκυροδέματος

Χαρακτηριστικά μοντέλου για $\rho_c=2,4 \text{ tns/m}^2$ και 4 στρώσεις				
	14 οπές, D=0,6 m		7 οπές, D=0,3 m	
	H=0,3 m	H=0,4 m	H=0,3 m	H=0,4 m
$m_e$	128,094	170,792	130,659	174,212
$m_i$	9,2626	12,3502	1,1578	1,5437
Συνολική Μάζα 4 στρώσεων	549,427	732,569	527,269	703,026
$M$	2.128,094	2.170,792	2.130,659	2.174,212
$K_i$	978.991,224	1.178.520,67	205.142,0158	256.633,4857
$K_e$	65.520.000	65.520.000	65.520.000	65.520.000

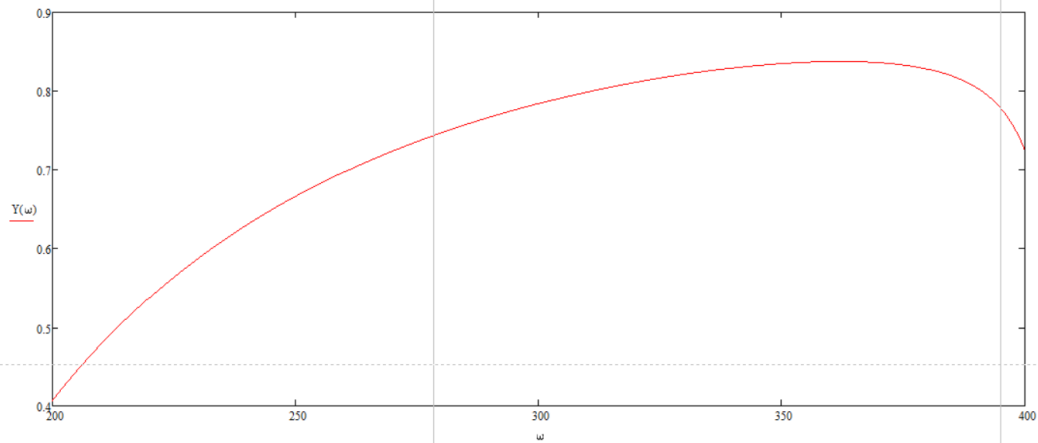
Πίνακας 5-6:Πίνακας χαρακτηριστικών για διάφορα πάχη σκυροδέματος

Λαμβάνοντας υπόψιν τα παραπάνω αποτελέσματα συμπεραίνουμε πως έχουμε καλύτερη απόδοση για πάχος σκυροδέματος 0,3 m από το 0,4 m . Παρατηρούμε επίσης πως για διάμετρο οπών 0,3 m έχουμε καλύτερη απόδοση από ότι για 0,6 m. Παρόλη την αύξηση της εξωτερικής μάζας μέσω αύξησης του πάχους της πλάκας , δεν παρατηρούμε καλύτερη απόδοση. Συμπεραίνουμε έτσι πως η εξωτερική μάζα είναι ιδιαίτερα ευαίσθητη για την ανάπτυξη του μοντέλου μας και χρειάζεται περαιτέρω προσοχή.

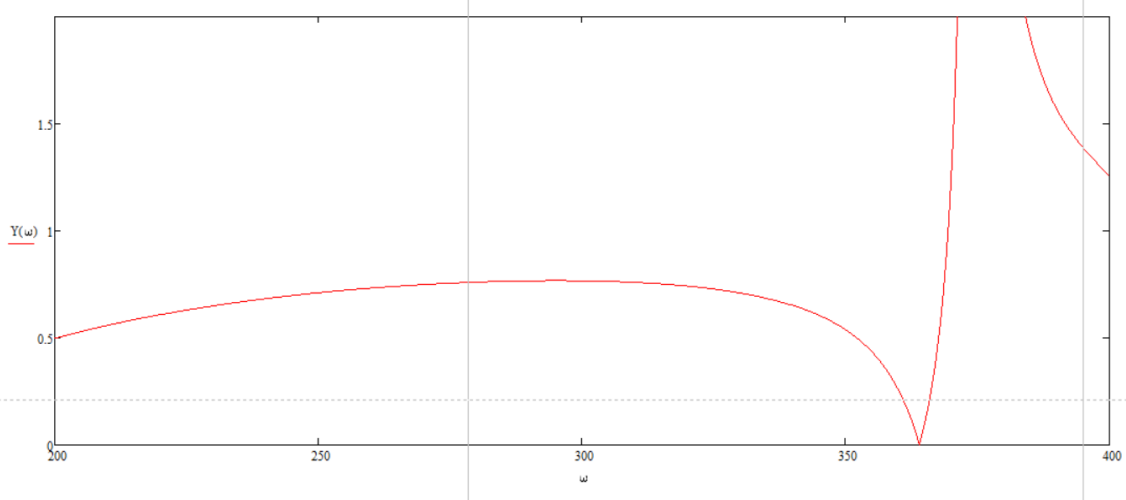
Μετά την ανάλυση για 4 στρώσεις ακολουθήθηκε η ίδια διαδικασία για 3 στρώσεις.

Εικόνα 5.2.3.9: Διάγραμμα  $Y(\omega)$  για 36 οπές με διάμετρο 0,3 m και H=0.4m

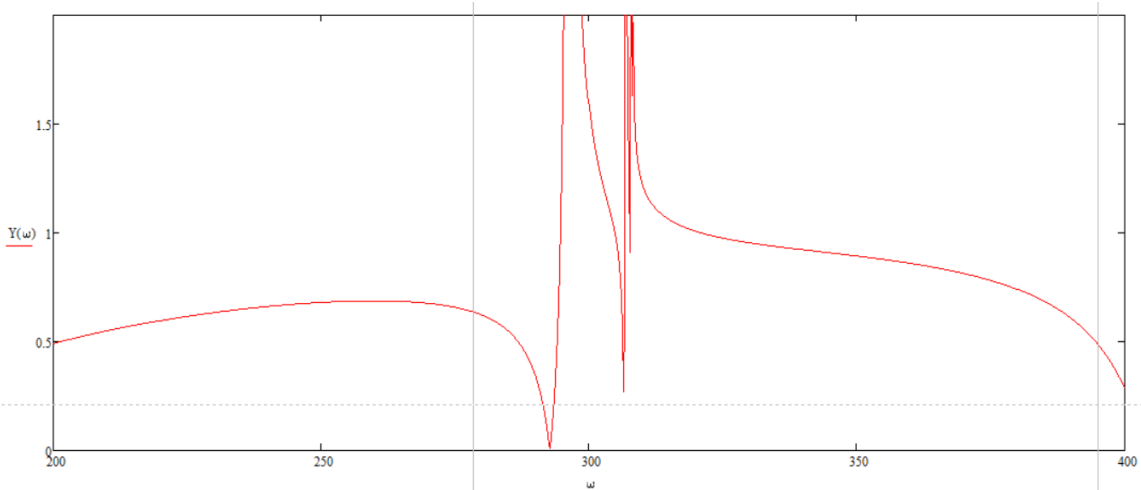
## Εφαρμογή Μεταλλικών στη Θεμελίωση Μηχανών Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας για Δυναμική Φόρτιση



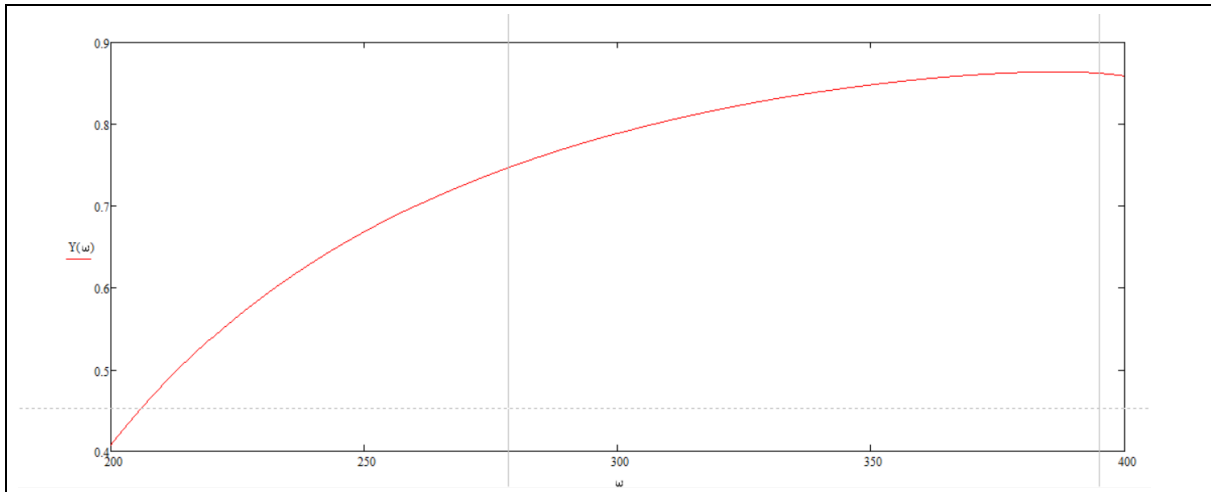
Εικόνα 5.2.3.10: Διάγραμμα  $Y(\omega)$  για 36 σπές με διάμετρο 0,3 m και  $H=0.3m$



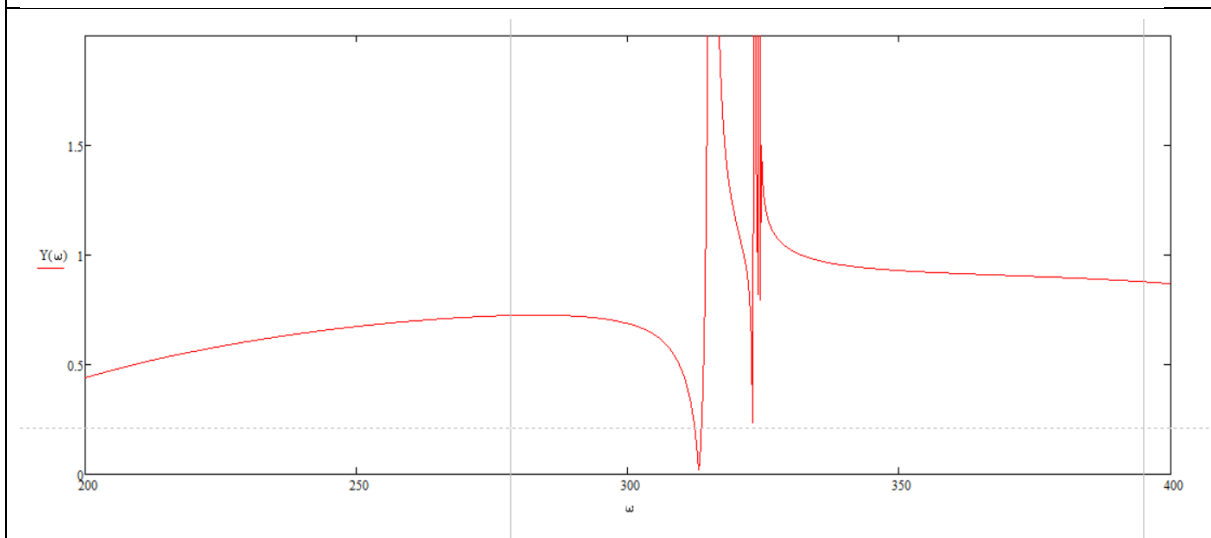
Εικόνα 5.2.3.11: Διάγραμμα  $Y(\omega)$  για 14 σπές με διάμετρο 0,3 m και  $H=0.4m$



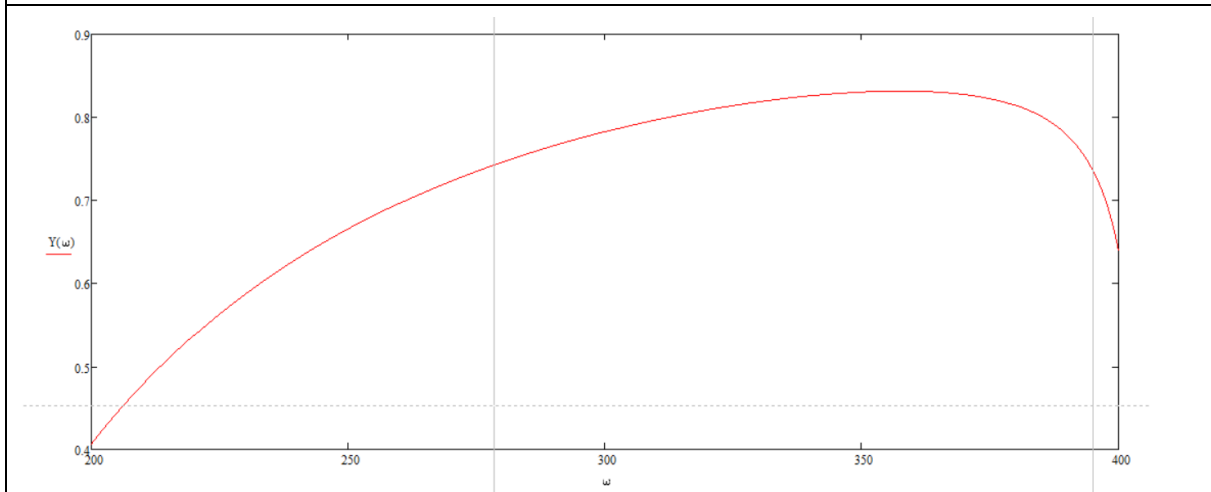
Εικόνα 5.2.3.12: Διάγραμμα  $Y(\omega)$  για 14 σπές με διάμετρο 0,6 m και  $H=0.4m$



Εικόνα 5.2.3.13: Διάγραμμα  $Y(\omega)$  για 14 οπές με διάμετρο 0,3 m και  $H=0.3$ m

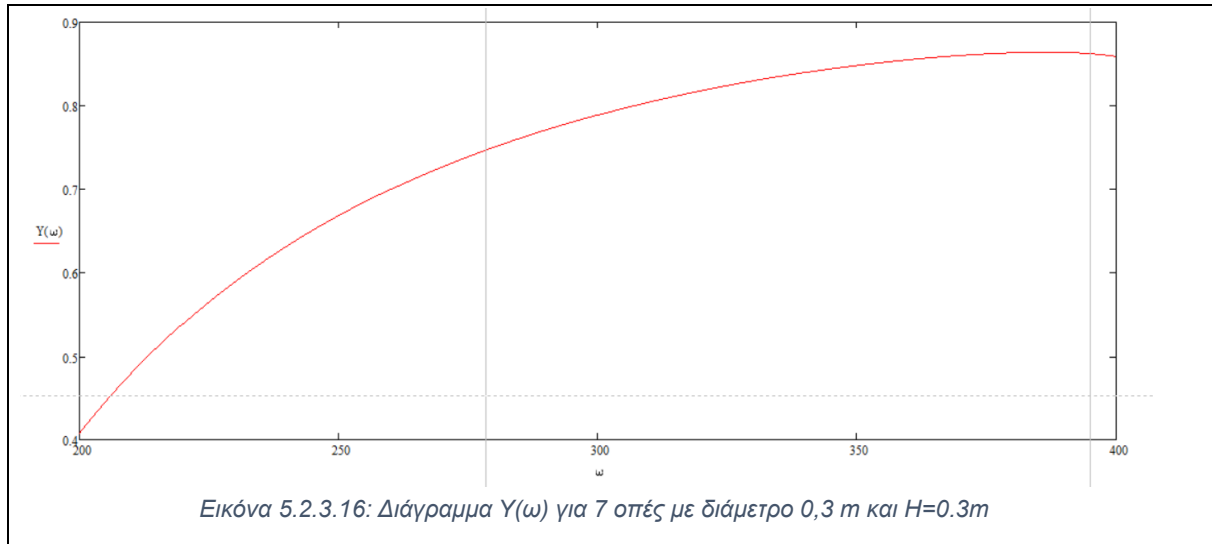


Εικόνα 5.2.3.14: Διάγραμμα  $Y(\omega)$  για 14 οπές με διάμετρο 0,6 m και  $H=0.3$ m



Εικόνα 5.2.3.15: Διάγραμμα  $Y(\omega)$  για 7 οπές με διάμετρο 0,3 m και  $H=0.4$ m

## Εφαρμογή Μεταλλικών στη Θεμελίωση Μηχανών Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας για Δυναμική Φόρτιση



Χαρακτηριστικά μοντέλου για $\rho c=2,4 \text{ tns/m}^2$ και 3 στρώσεις				
	36 οπές		14 οπές	
D=0,3 m	H=0,3 m	H=0,4 m	H=0,3 m	H=0,4 m
$m_e$	129,083	172,111	130,279	173,7055
$m_i$	5,9545	7,93942	2,3156	3,0875
Συνολική Μάζα 3 στρώσεων	405,114	540,152	397,784	530,379
$M$	2.129,083	2.172,111	2.130,279	2.173,7055
$K_i$	105.5016,08	1.319.829,355	410.284,0316	513.266,971
$K_e$	65.520.000	65.520.000	65.520.000	65.520.000

Πίνακας 5-7: Πίνακας χαρακτηριστικών για διάφορα πάχη σκυροδέματος για τρεις στρώσεις

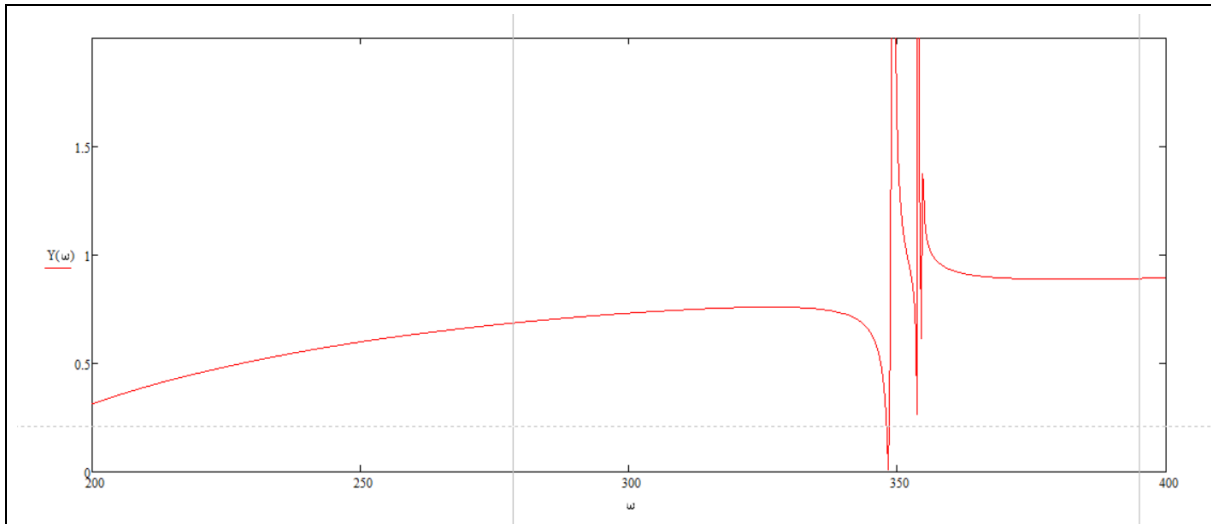
Χαρακτηριστικά μοντέλου για $\rho c=2,4 \text{ tns/m}^2$ και 3 στρώσεις				
	14 οπές, D=0,6 m		7 οπές, D=0,3 m	
	H=0,3 m	H=0,4 m	H=0,3 m	H=0,4 m
$m_e$	128,094	170,792	130,659	174,212
$m_i$	9,2626	12,3502	1,1578	1,5437
Συνολική Μάζα 3 στρώσεων	412,0704	549,427	395,452	527,269
$M$	2.128,094	2.170,792	2.130,659	2.174,212
$K_i$	978.991,224	1.178.520,67	205.142,0158	256.633,4857
$K_e$	65.520.000	65.520.000	65.520.000	65.520.000

Πίνακας 5-8: Πίνακας χαρακτηριστικών για διάφορα πάχη σκυροδέματος για τρεις στρώσεις

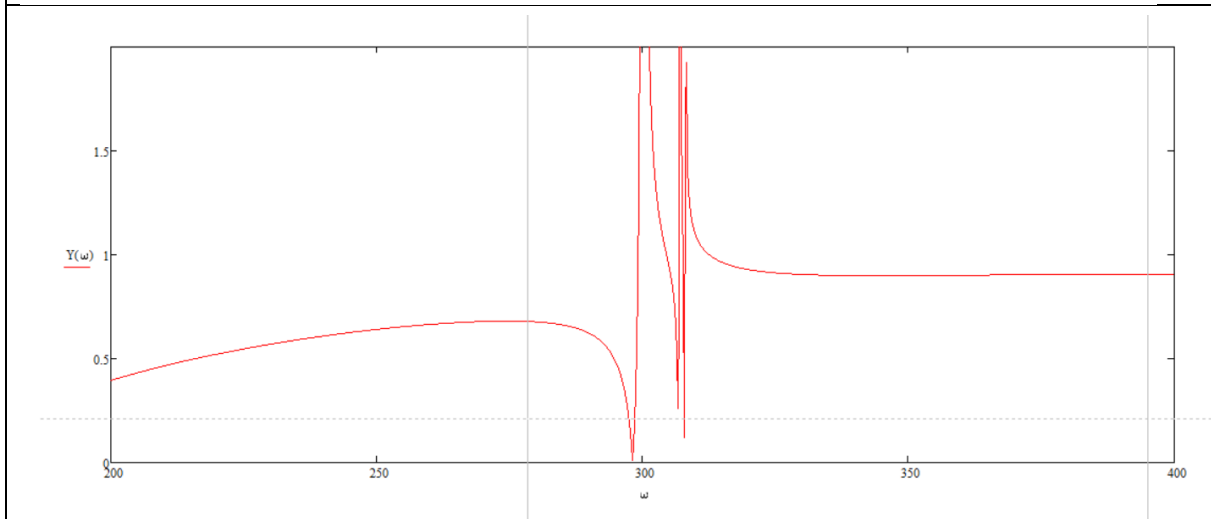
Μετά την ανάλυση για τρεις και τέσσερις στρώσεις προέκυψαν τα εξής συμπεράσματα:

- όταν μειώνεται η εσωτερική δυσκαμψία έχουμε καλύτερα αποτελέσματα για το εύρος τιμών 30 με 60 Hz
- όταν αυξάνεται η εξωτερική μάζα γίνεται μετακίνηση του διαγράμματος προς τα αριστερά με αποτέλεσμα να έχουμε τοπικό μέγιστο κοντά στα 60 Hz, γεγονός μη αναμενόμενο
- σε 4 στρώσεις έχουμε καλύτερη απόδοση από ότι σε 3 , παρόλη την αύξηση της εξωτερικής μάζας.

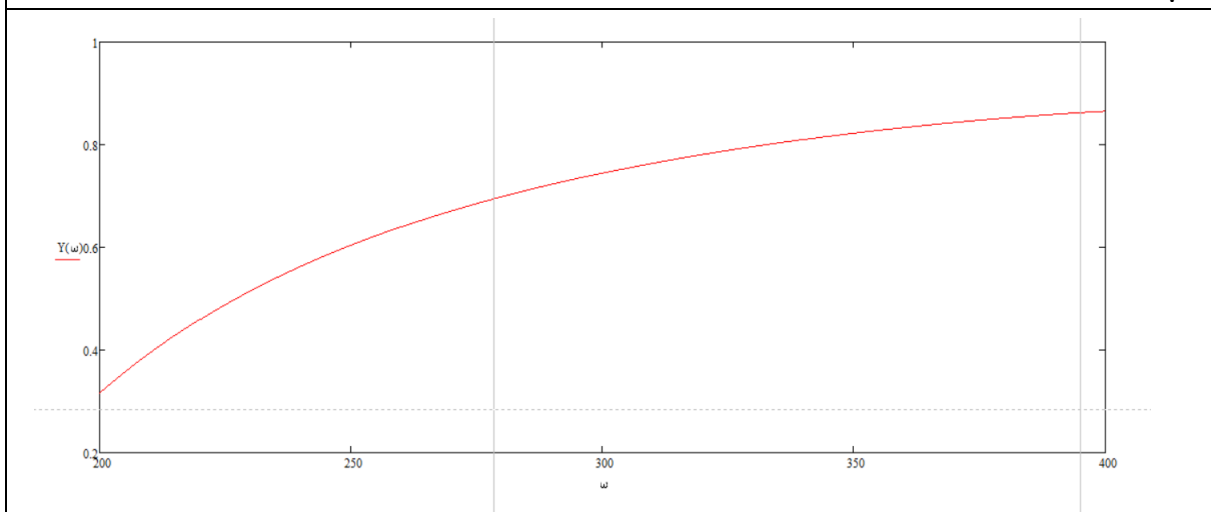
Στην συνέχεια γίνεται δοκιμή για διαφορετική πυκνότητα σκυροδέματος, δηλαδή ελαφρό σκυρόδεμα, για διάφορα πάχη πλακών.



Εικόνα 5.2.3.17: Διάγραμμα  $Y(\omega)$  για 14 σπές με διάμετρο 0,6 m,  $H=0,2m$  και  $\rho=1,4\text{tons/m}^3$



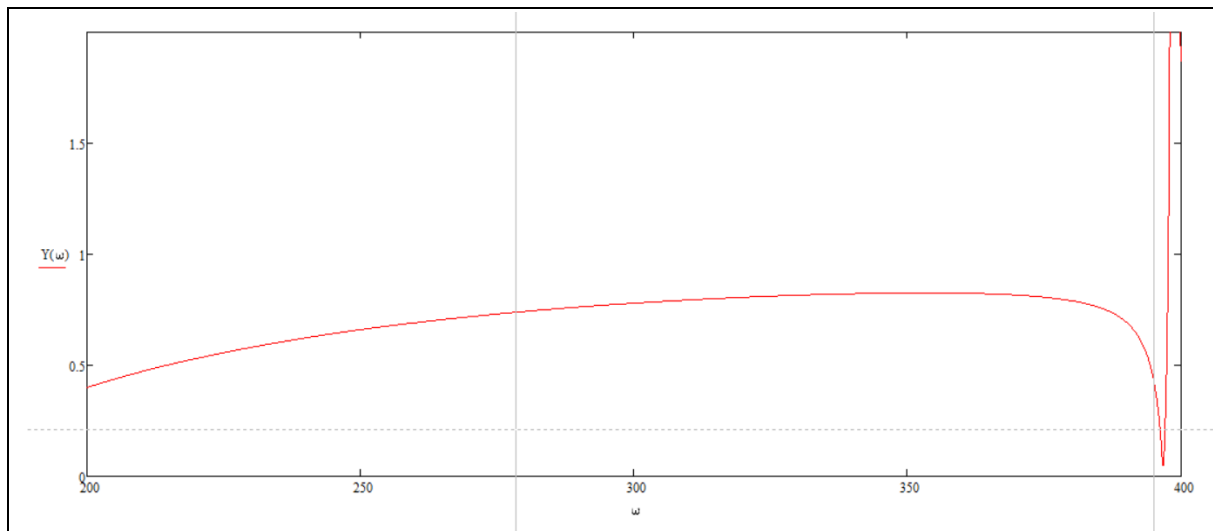
Εικόνα 5.2.3.18: Διάγραμμα  $Y(\omega)$  για 14 σπές με διάμετρο 0,6 m,  $H=0,4m$  και  $\rho=1,4\text{tons/m}^3$



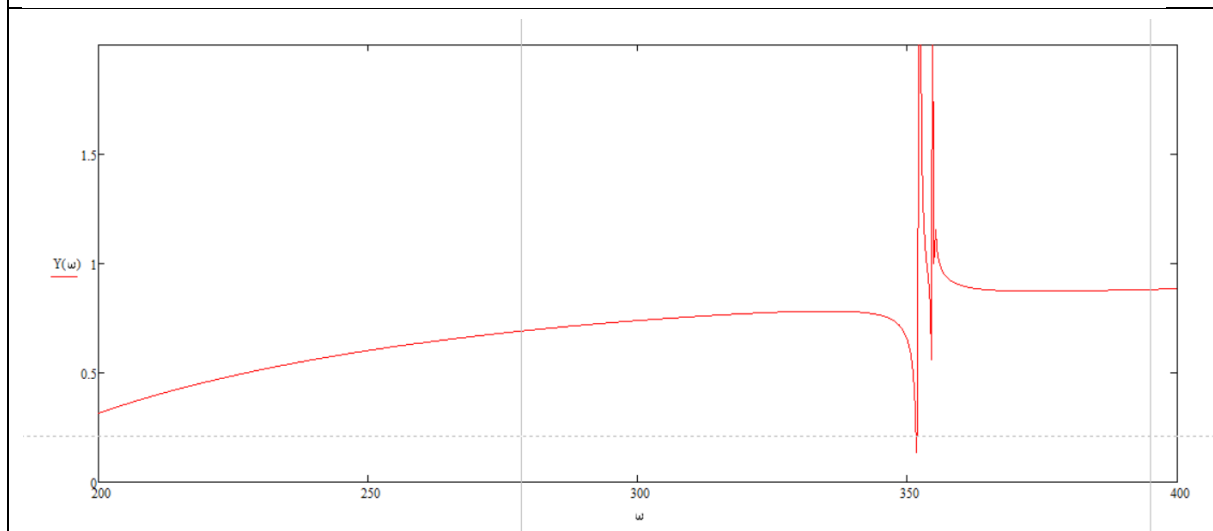
Εικόνα 5.2.3.19: Διάγραμμα  $Y(\omega)$  για 14 σπές με διάμετρο 0,3 m,  $H=0,2m$  και  $\rho=1,4\text{tons/m}^3$

V

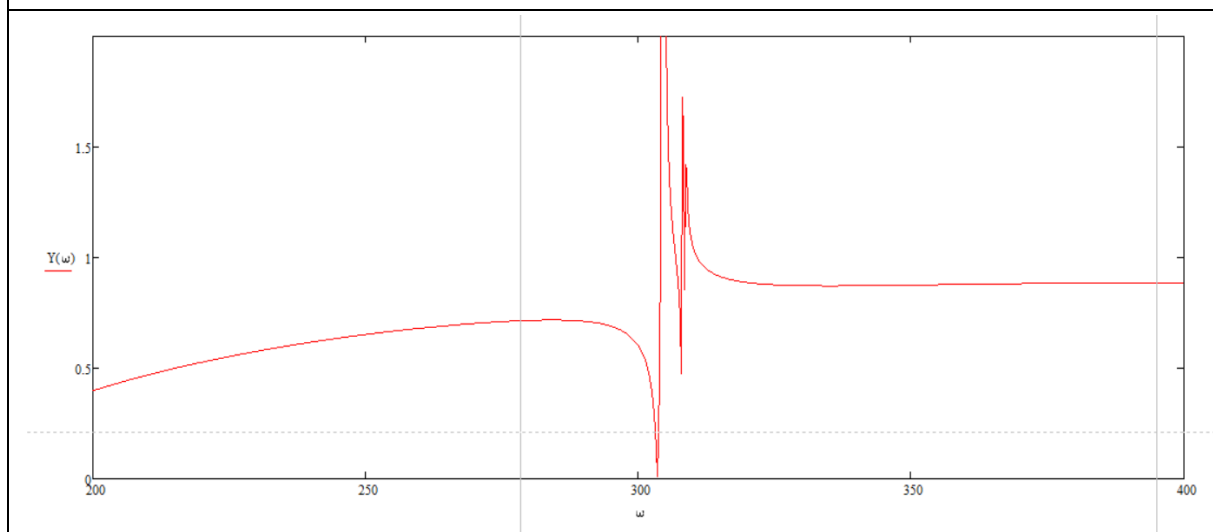
## Εφαρμογή Μεταλλικών στη Θεμελίωση Μηχανών Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας για Δυναμική Φόρτιση



Εικόνα 5.2.3.20: Διάγραμμα  $Y(\omega)$  για 14 σπές με διάμετρο 0,3 m,  $H=0,4m$  και  $\rho=1,4\text{tons/m}^3$

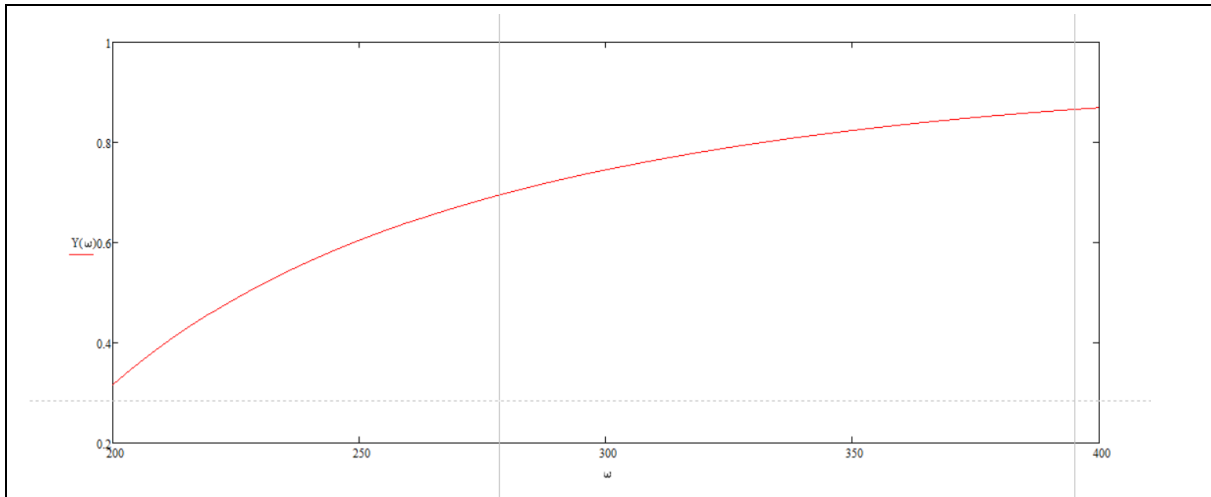


Εικόνα 5.2.3.21: Διάγραμμα  $Y(\omega)$  για 7 σπές με διάμετρο 0,6 m,  $H=0,2m$  και  $\rho=1,4\text{tons/m}^3$

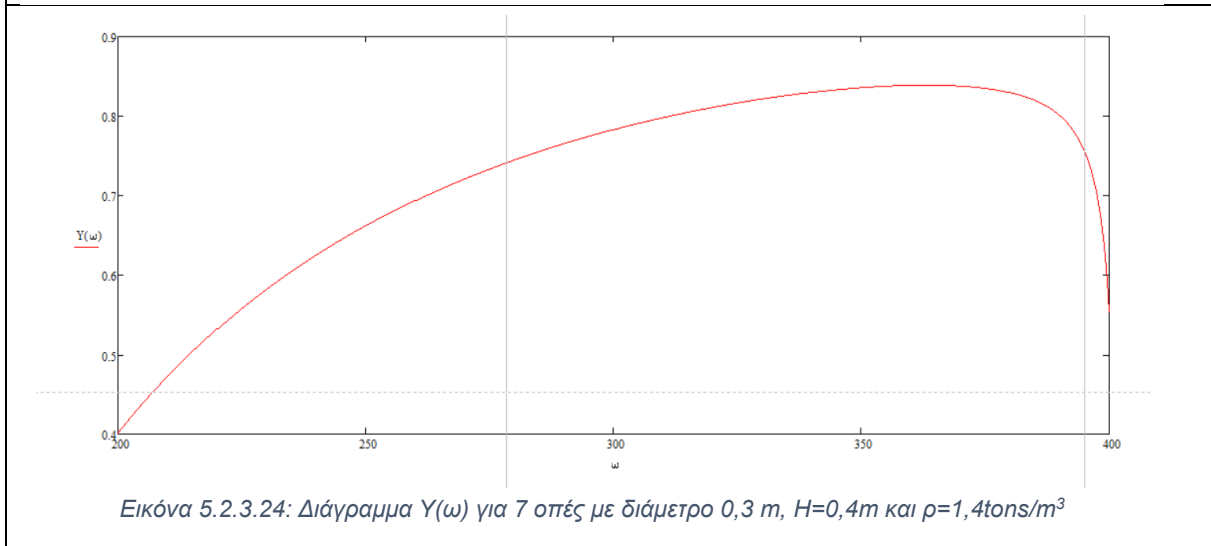


Εικόνα 5.2.3.22: Διάγραμμα  $Y(\omega)$  για 7 σπές με διάμετρο 0,6 m,  $H=0,4m$  και  $\rho=1,4\text{tons/m}^3$





Εικόνα 5.2.3.23: Διάγραμμα  $Y(\omega)$  για 7 οπές με διάμετρο 0,3 m,  $H=0,2m$  και  $\rho=1,4\text{tons/m}^3$



Εικόνα 5.2.3.24: Διάγραμμα  $Y(\omega)$  για 7 οπές με διάμετρο 0,3 m,  $H=0,4m$  και  $\rho=1,4\text{tons/m}^3$

Χαρακτηριστικά μοντέλου για $\rho_c=1,4 \text{ tns/m}^2$ και 4 στρώσεις				
	14 οπές, $D=0,6m$		14 οπές, $D=0,3m$	
	$H=0,2 \text{ m}$	$H=0,4 \text{ m}$	$H=0,2 \text{ m}$	$H=0,4 \text{ m}$
$m_e$	49,814	99,6287	50,6641	101,3282
$m_i$	6,1751	12,3502	1,5437	3,08755
Συνολική Μάζα 4 στρώσεων	223,95803	447,9160	208,8316	417,6632
$M$	2.049,814	2.099,628	2.050,6641	2.101,3282
$K_i$	779.461,779	1.178.520,67	307.301,092	513.266,971
$K_e$	65.520.000	65.520.000	65.520.000	65.520.000

Χαρακτηριστικά μοντέλου για $\rho_c=1,4 \text{ tns/m}^2$ και 4 στρώσεις				
	7 οπές, $D=0,6m$		7 οπές, $D=0,3m$	
	$H=0,2 \text{ m}$	$H=0,4 \text{ m}$	$H=0,2 \text{ m}$	$H=0,4 \text{ m}$
$m_e$	50,38719	100,7743	50,81206	101,6241
$m_i$	3,08755	6,17511	0,771889	1,5437
Συνολική Μάζα 4 στρώσεων	213,8990	427,7980	206,3358	412,6716

## Εφαρμογή Μεταλλικών στη Θεμελίωση Μηχανών Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας για Δυναμική Φόρτιση

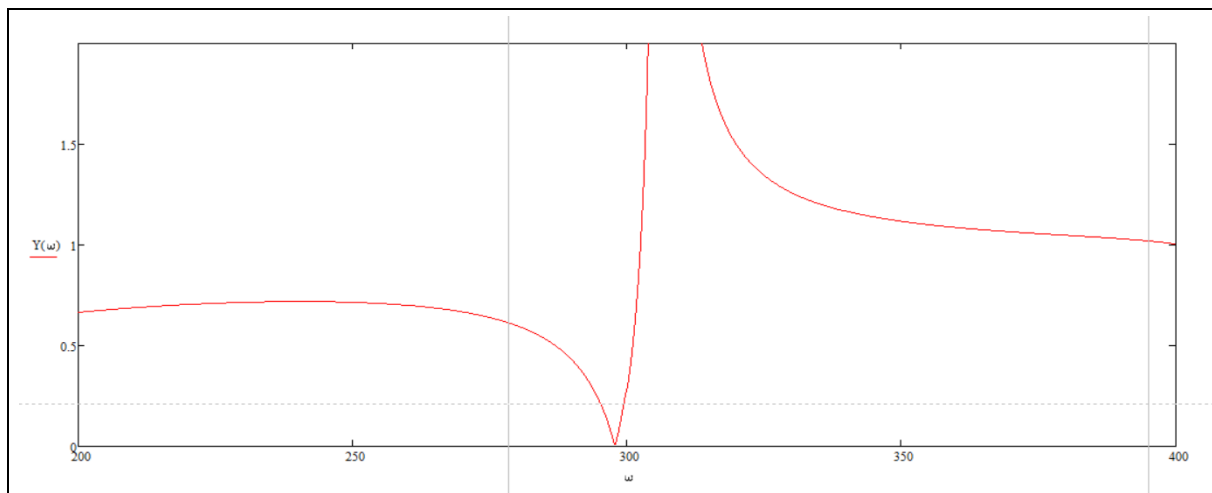
<b>M</b>	2.050,387	2.100,7743	2.050,8120	2.101,6241
<b>K<sub>i</sub></b>	389.730,889	589.260,335	153.650,546	256.633,4857
<b>K<sub>e</sub></b>	65.520.000	65.520.000	65.520.000	65.520.000

Παρατηρώντας τα παραπάνω διαγράμματα συμπεραίνουμε ότι η παραδοχή του ελαφρού σκυροδέματος δεν ευνοεί την κατασκευή. Με την χρήση του ελαφρού σκυροδέματος καταφέρνουμε να μειώσουμε την εξωτερική μάζα άρα να μετατοπίσουμε το διάγραμμα προς τα αριστερά. Με αυτό τον τρόπο φέρνουμε την περιοχή συντονισμού της κατασκευής μας εντός των ορίων που μας ενδιαφέρουν. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να δημιουργείται μεγάλη μετατόπιση στο μοντέλο μας λόγω συντονισμού. Παρατηρείται πως για μικρότερο πάχος πλάκας έχουμε καλύτερα αποτελέσματα, όπως αναμέναμε. Τέλος βάση των παραπάνω αποτελεσμάτων συμπεραίνουμε την ευαισθησία του μοντέλου στην αλλαγή των μαζών.

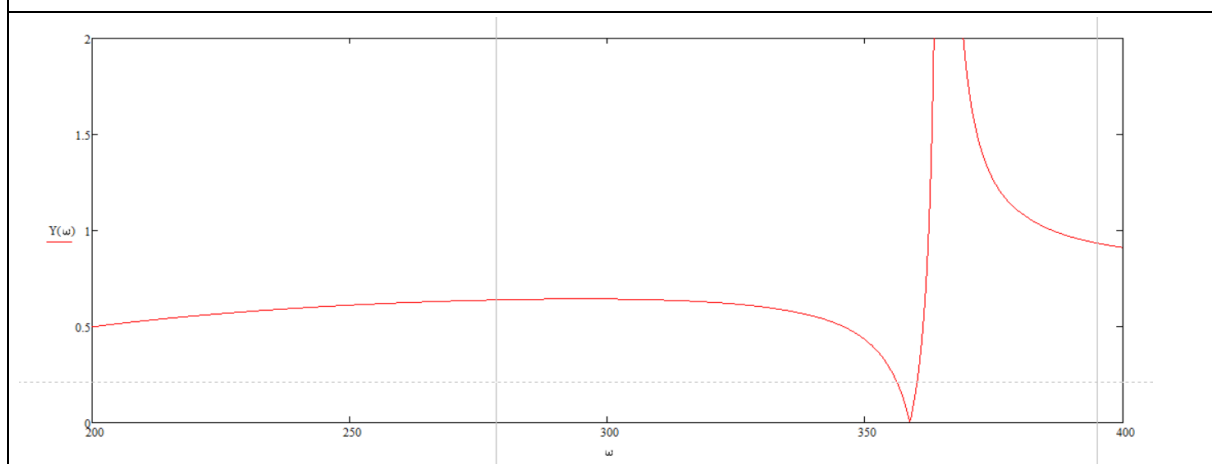
### 5.2.4. Μοντελοποίηση με διαφορετικά χαρακτηριστικά ελαστομερούς μεταξύ των πλακών από σκυρόδεμα

Στην συνέχεια της μοντελοποίησης, έγινε αύξηση της στρώσης σιλομέρ μεταξύ των πλακών σε  $t=0.02m$ . Με την αύξηση του πάχους γίνεται μείωση της εξωτερικής δυσκαμψίας  $K_e$ . Η διερεύνηση συνεχίστηκε για τα μοντέλα που αναφέραμε παραπάνω για βελτιστοποίηση τους και με μέτρο ελαστικότητας  $E=1800kPa$ .

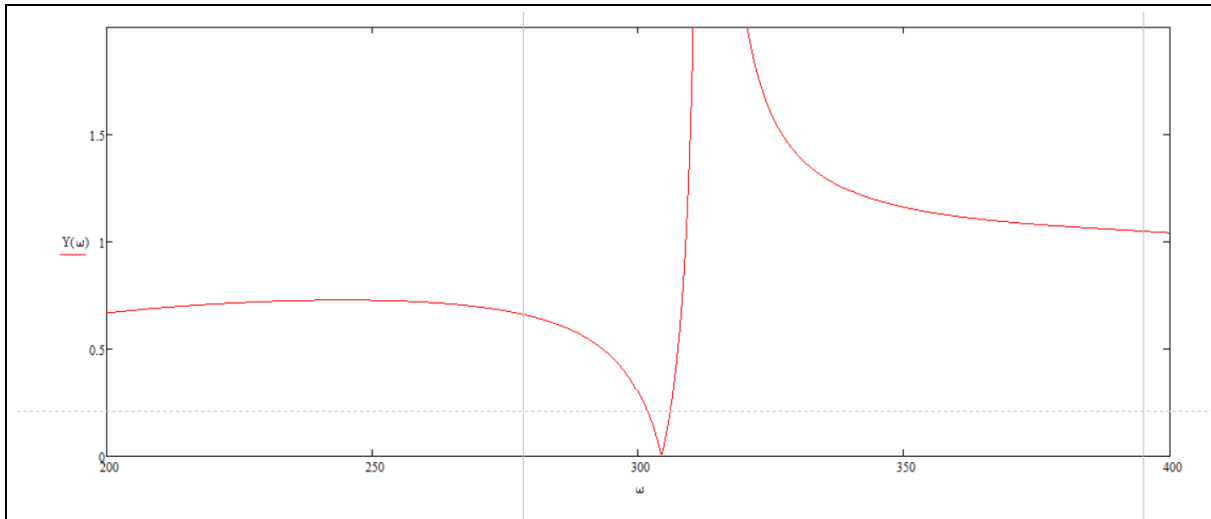
Παρακάτω παρατίθενται τα διαγράμματα του λόγου  $Y(\omega)$ .



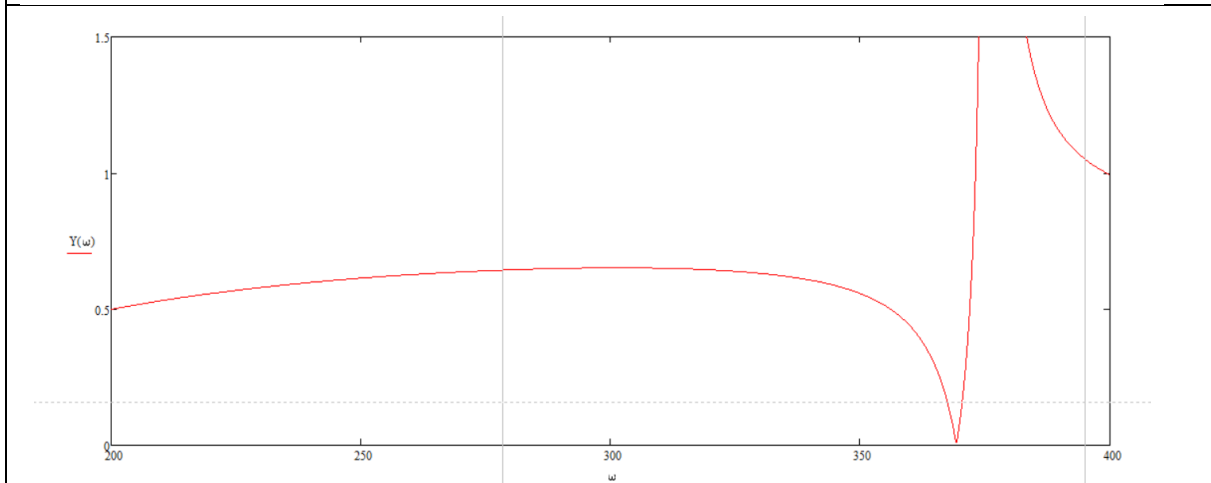
*Εικόνα 5.2.4.1: Διάγραμμα  $Y(\omega)$  για 36 οπές με διάμετρο 0,3 m και  $H=0.3m$  και  $t=0.02m$*



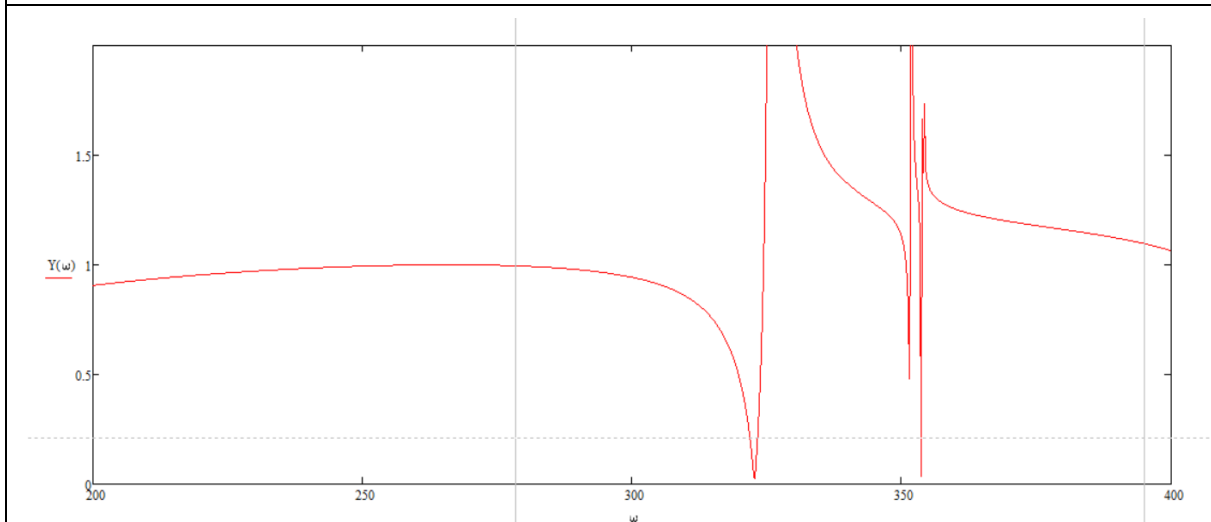
*Εικόνα 5.2.4.2: Διάγραμμα  $Y(\omega)$  για 36 οπές με διάμετρο 0,3 m και  $H=0.2m$  και  $t=0.02m$*



Εικόνα 5.2.4.3: Διάγραμμα  $Y(\omega)$  για 14 σπές με διάμετρο 0,3 m και  $H=0.3m$  και  $t=0.02m$

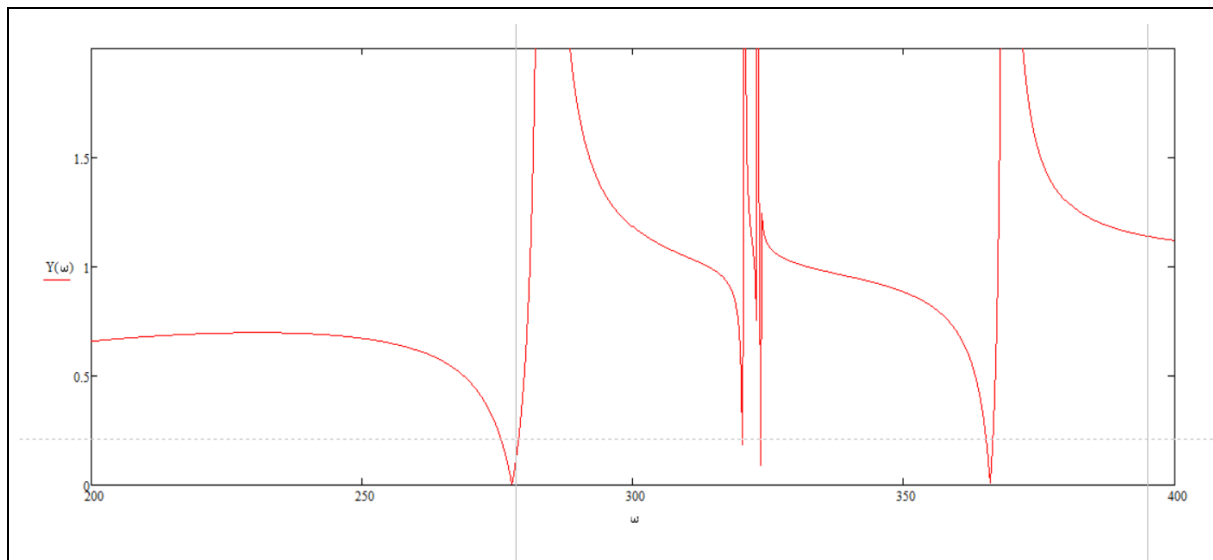


Εικόνα 5.2.4.4: Διάγραμμα  $Y(\omega)$  για 14 σπές με διάμετρο 0,3 m και  $H=0.2m$  και  $t=0.02m$

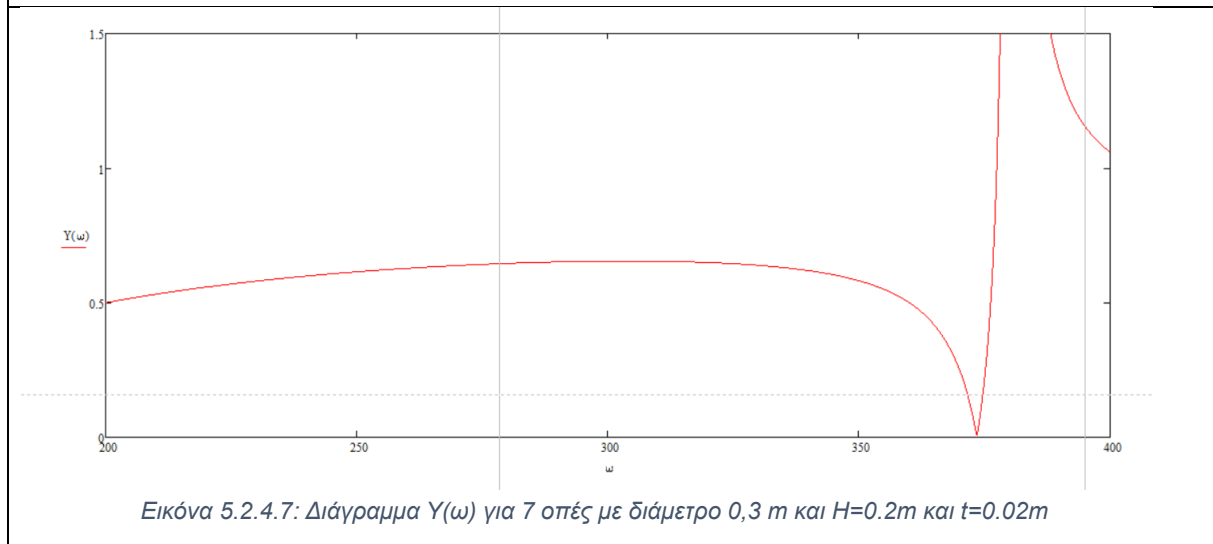


Εικόνα 5.2.4.5: Διάγραμμα  $Y(\omega)$  για 14 σπές με διάμετρο 0,6 m και  $H=0.2m$  και  $t=0.02m$

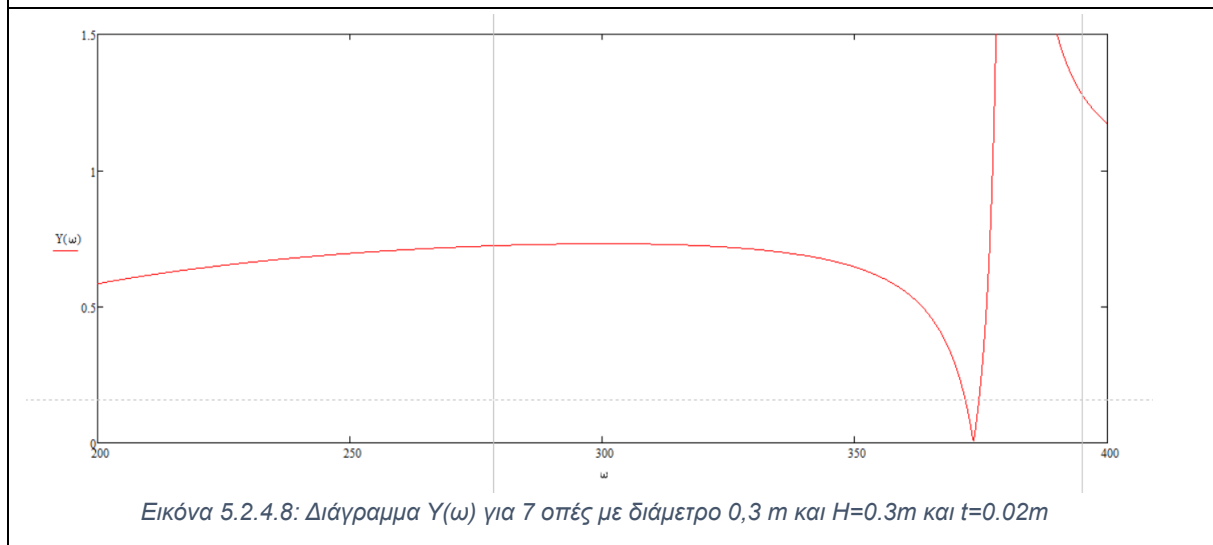
## Εφαρμογή Μεταλλικών στη Θεμελίωση Μηχανών Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας για Δυναμική Φόρτιση



Εικόνα 5.2.4.6: Διάγραμμα  $Y(\omega)$  για 14 οπές με διάμετρο 0,6 m και  $H=0.3m$  και  $t=0.02m$



Εικόνα 5.2.4.7: Διάγραμμα  $Y(\omega)$  για 7 οπές με διάμετρο 0,3 m και  $H=0.2m$  και  $t=0.02m$



Εικόνα 5.2.4.8: Διάγραμμα  $Y(\omega)$  για 7 οπές με διάμετρο 0,3 m και  $H=0.3m$  και  $t=0.02m$

Χαρακτηριστικά μοντέλου για $\rho c=2,4 \text{ tns/m}^2$ και 4 στρώσεις				
	36 οπές		14 οπές	
D=0,3 m	H=0,3 m	H=0,2 m	H=0,3 m	H=0,2 m
$m_e$	129,083	86,055	130,279	86,852
$m_i$	5,9545	3,969	2,3156	1,543
Συνολική Μάζα 4 στρώσεων	405,114	360,101	397,784	353,586
$M$	2.129,083	2.086,055	2.130,279	2.086,852
$K_i$	105.5016,08	790.202,80	410.284,0316	307.301,0092
$K_e$	32.760.000	32.760.000	32.760.000	32.760.000

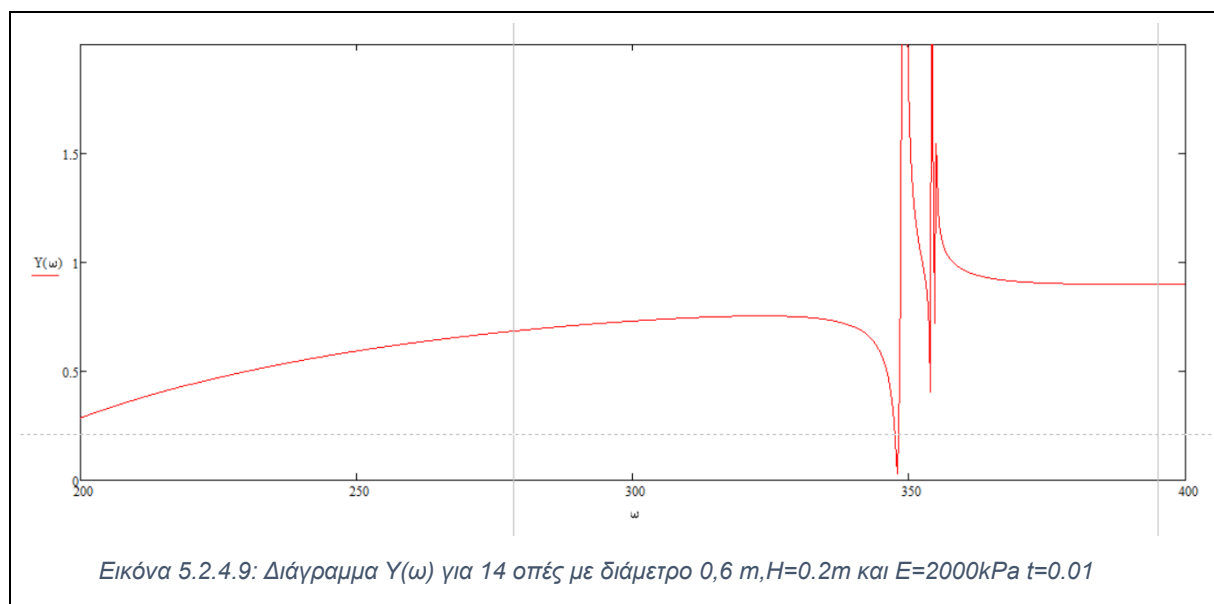
Πίνακας 5-9: Πίνακας χαρακτηριστικών για  $t=0.02$  πάχος ελαστομερρούς μεταξύ πλακών

Χαρακτηριστικά μοντέλου για $\rho c=2,4 \text{ tns/m}^2$ και 4 στρώσεις				
	14 οπές, D=0,6 m		7 οπές, D=0,3 m	
	H=0,3 m	H=0,2 m	H=0,3 m	H=0,2 m
$m_e$	128,094	85,396	130,659	87,1063
$m_i$	9,2626	6,1751	1,1578	0,7718
Συνολική Μάζα 4 στρώσεων	412,0704	366,284	395,452	351,5131
$M$	2.128,094	2.085,396	2.130,659	2.087,1063
$K_i$	978.991,224	779.461,779	205.142,0158	153.650,546
$K_e$	32.760.000	32.760.000	32.760.000	32.760.000

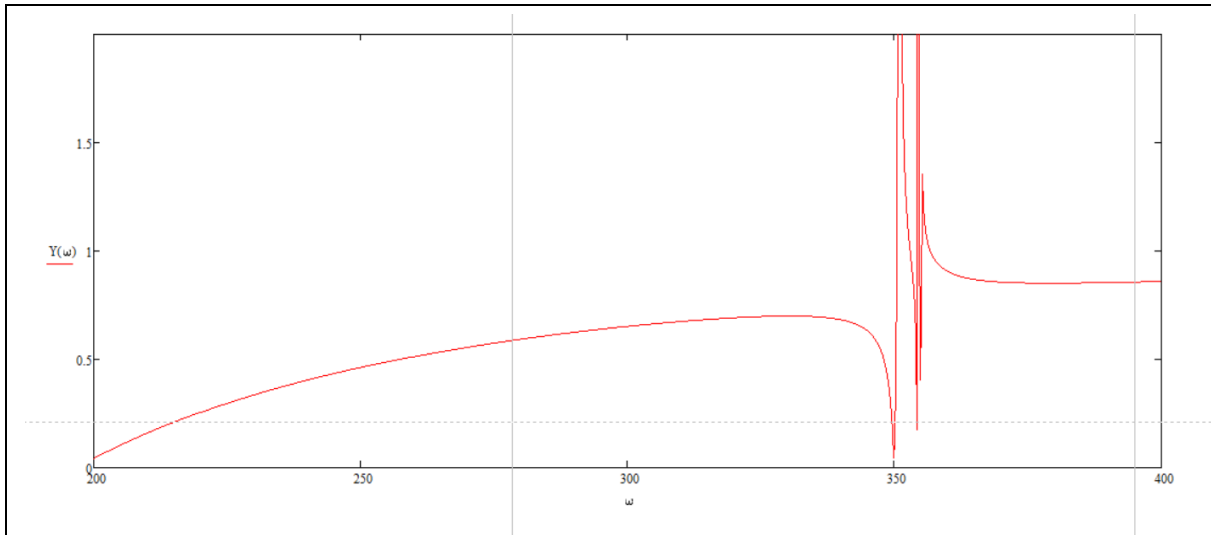
Πίνακας 5-10: Πίνακας χαρακτηριστικών για  $t=0.02$  πάχος ελαστομερρούς μεταξύ πλακών

Παρατηρώντας τα παραπάνω διαγράμματα συμπεραίνουμε ότι όσο αυξάνεται το πάχος του ελαστομερούς-σιλομέρ δεν βοηθάει στην απόσβεση των κυμάτων για το εύρος συχνοτήτων που διερευνάμε. Η αύξηση του πάχους τη πλάκας μετακινεί το διάγραμμα προς τα αριστερά, με αποτέλεσμα να έχουμε τοπικό μέγιστο. Τέλος όπως και προηγουμένως παρατηρούμε καλύτερη απόδοση σε μικρότερες μάζες εσωτερικές και με μικρότερη δυσκαμψία εσωτερική.

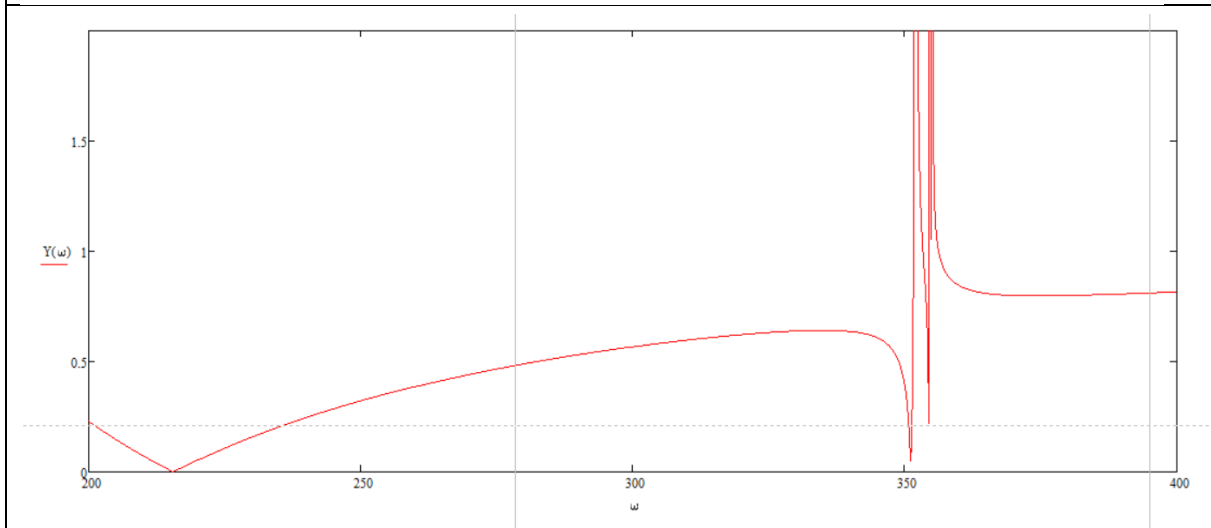
Με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα το ενδιάμεσο ελαστομερές θα έχει πάχος  $t=0.01\text{m}$  με  $t=0.02\text{m}$  και πάχος πλάκας  $H=0.2\text{m}$ . Στην συνέχεια θα γίνει αλλαγή του μέτρου ελαστικότητας του υλικού από  $1800\text{kPa}$  μέχρι  $4000\text{kPa}$ . Παρακάτω παρατίθενται τα πιο αξιοσημείωτα αποτελέσματα.

Εικόνα 5.2.4.9: Διάγραμμα  $Y(\omega)$  για 14 οπές με διάμετρο 0,6 m,  $H=0.2\text{m}$  και  $E=2000\text{kPa}$   $t=0.01$

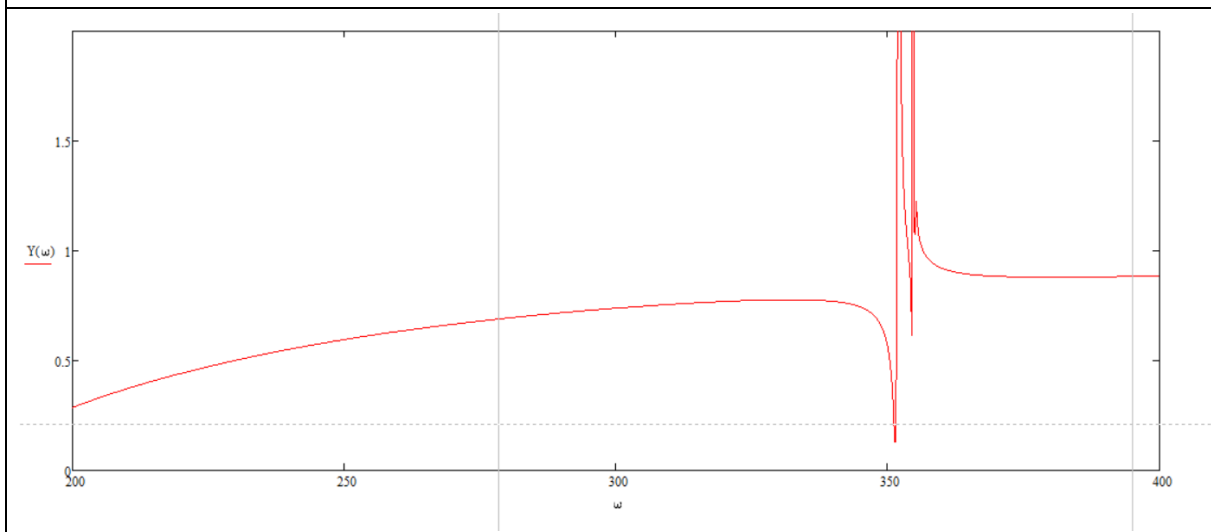
## Εφαρμογή Μεταλλικών στη Θεμελίωση Μηχανών Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας για Δυναμική Φόρτιση



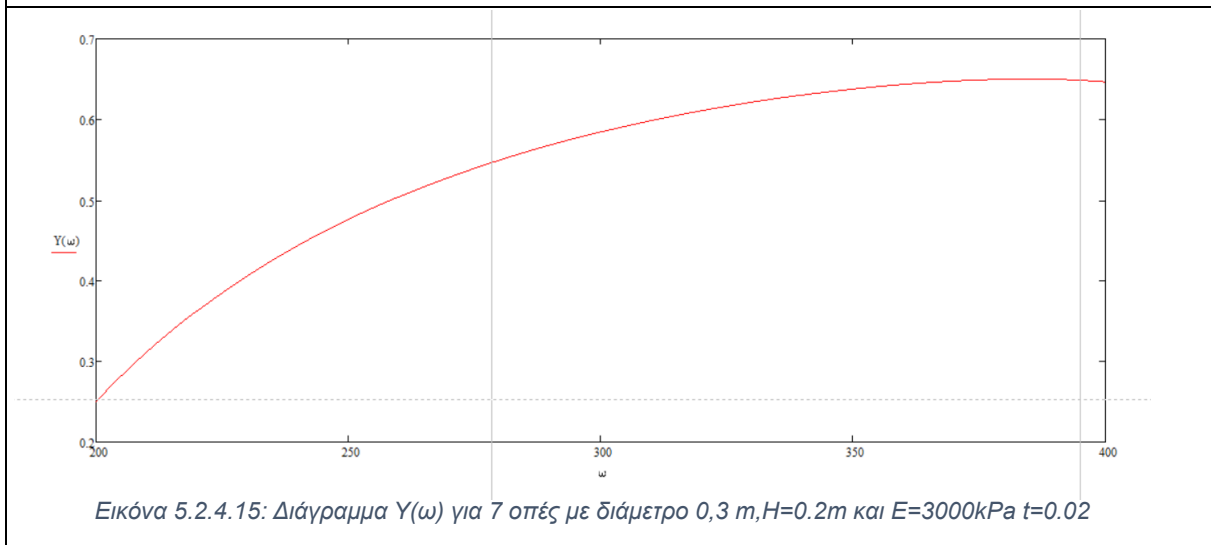
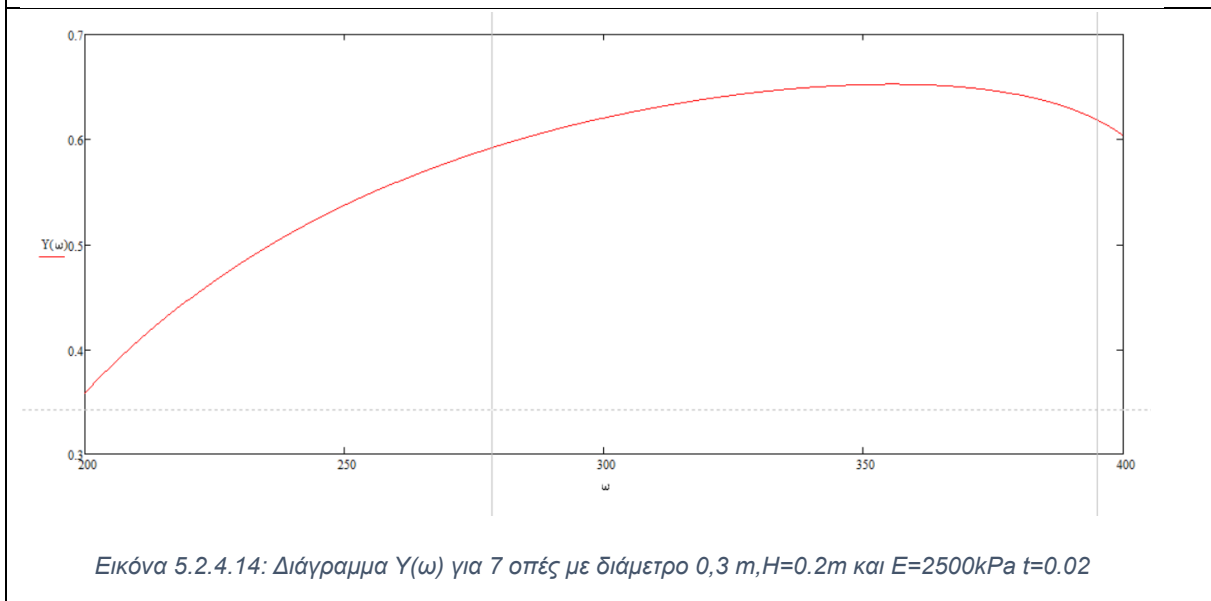
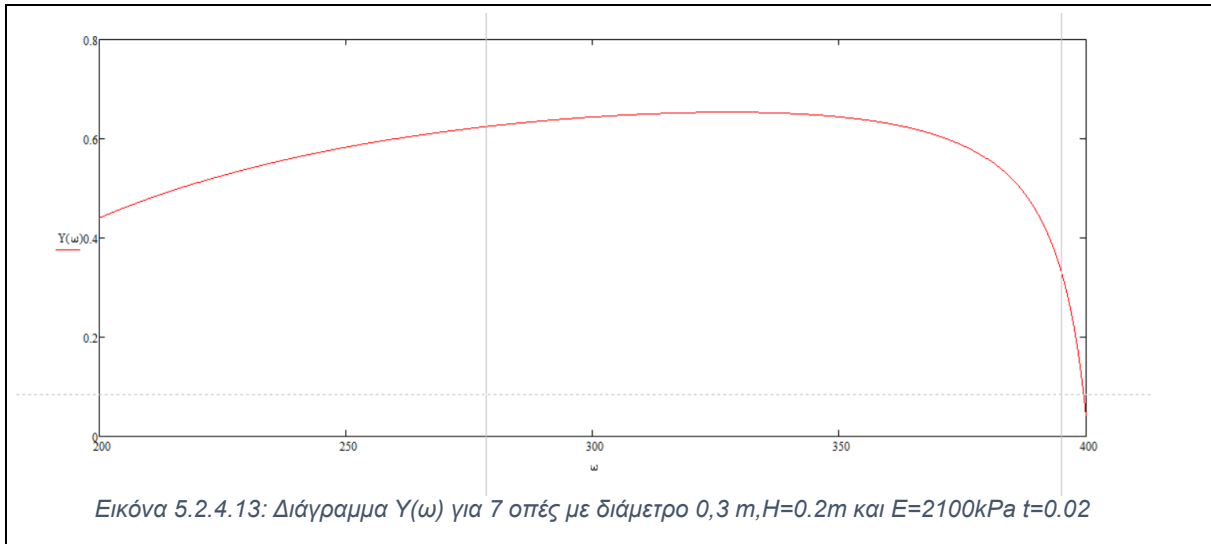
Εικόνα 5.2.4.10: Διάγραμμα  $Y(\omega)$  για 14 σπές με διάμετρο 0,6 m,  $H=0.2m$  και  $E=2500kPa$   $t=0.01$



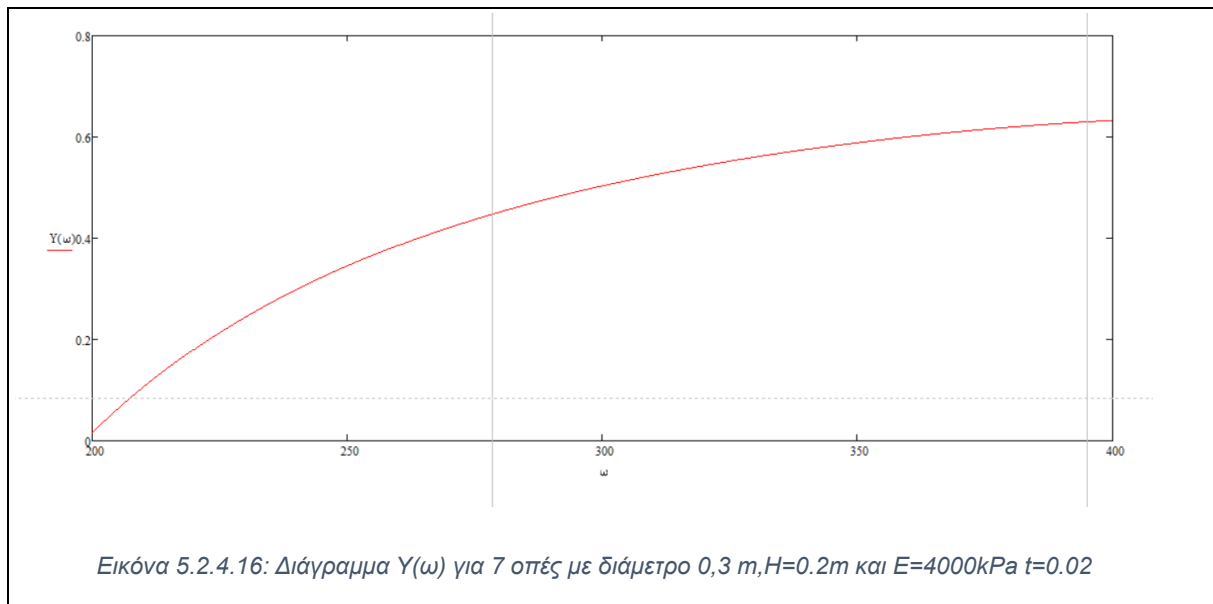
Εικόνα 5.2.4.11: Διάγραμμα  $Y(\omega)$  για 14 σπές με διάμετρο 0,6 m,  $H=0.2m$  και  $E=3000kPa$   $t=0.01$



Εικόνα 5.2.4.12: Διάγραμμα  $Y(\omega)$  για 7 σπές με διάμετρο 0,6 m,  $H=0.2m$  και  $E=2000kPa$   $t=0.01$



## Εφαρμογή Μεταλλικών στη Θεμελίωση Μηχανών Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας για Δυναμική Φόρτιση



<b>Χαρακτηριστικά μοντέλου για <math>\rho c=2,4 \text{ tns/m}^2</math> και 4 στρώσεις</b>				
<b><math>D=0,6m, H=0.2m, t=0.01</math></b>				
	<b>14 οπές</b>			<b>7 οπές</b>
	<b><math>E=2000kPa</math></b>	<b><math>E=2500kPa</math></b>	<b><math>E=3000kPa</math></b>	<b><math>E=2000kPa</math></b>
<b><math>m_e</math></b>	85,396	85,396	85,396	86,3780
<b><math>m_i</math></b>	6,1751	6,1751	6,1751	3,0875
<b>Συνολική Μάζα 4 στρώσεων</b>	366,284	366,284	366,284	357,862
<b><math>M</math></b>	2.085,396	2.085,396	2.085,396	2.086,378
<b><math>K_i</math></b>	779.461,779	779.461,779	779.461,779	389.730,889
<b><math>K_e</math></b>	72.800.000	91.000.000	109.200.000	72.800.000

*Πίνακας 5-11: Πίνακας χαρακτηριστικών για διάφορα μέτρα ελαστικότητας για τα ελαστομεροί*

<b>Χαρακτηριστικά μοντέλου για <math>\rho c=2,4 \text{ tns/m}^2</math> και 4 στρώσεις</b>				
<b>7 οπές, <math>D=0,3 m, H=0.2m, t=0.02m</math></b>				
	<b><math>E=2100kPa</math></b>	<b><math>E=2500kPa</math></b>	<b><math>E=3000kPa</math></b>	<b><math>E=4000kPa</math></b>
<b><math>m_e</math></b>	87,1063	87,1063	87,1063	87,1063
<b><math>m_i</math></b>	0,7718	0,7718	0,7718	0,7718
<b>Συνολική Μάζα 4 στρώσεων</b>	351,5131	351,5131	351,5131	351,5131
<b><math>M</math></b>	2.087,1063	2.087,1063	2.087,1063	2.087,1063
<b><math>K_i</math></b>	153.650,546	153.650,546	153.650,546	153.650,546
<b><math>K_e</math></b>	38.220.000	45.500.000	54.600.000	72.800.000

*Πίνακας 5-12: Πίνακας χαρακτηριστικών για διάφορα μέτρα ελαστικότητας για τα ελαστομεροί*

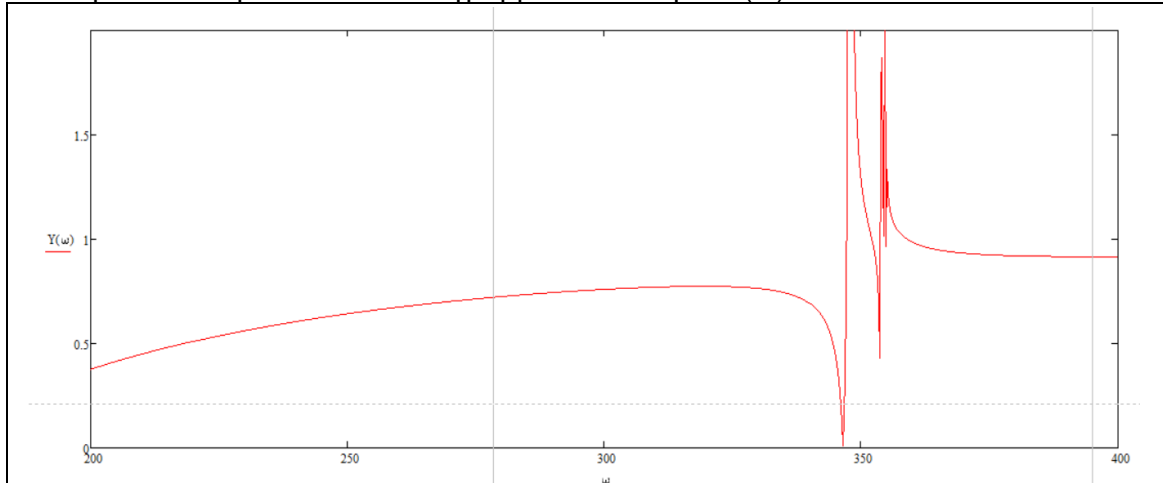
Παρατηρώντας τα παραπάνω διαγράμματα συμπεραίνουμε ότι ενώ αρχικά είχαμε καλύτερη απόδοση για  $t=0.01m$  με  $E=1800kPa$  όσο αυξάνεται το μέτρο ελαστικότητας μετακινείται το διάγραμμα και δεν έχουμε ομαλό διάγραμμα  $Y(\omega)$ . Σε αντίθεση με αυτό για  $t=0.02m$  όσο αυξάνεται το μέτρο ελαστικότητας έχουμε μικρότερο λόγο μετακινήσεων για το εύρος που μας ενδιαφέρει. Τέλος έγινε δοκιμή για διάμετρο  $D=0.6m$  για 7 οπές, παρόλη την αλλαγή της εσωτερικής μάζας στην μισή, δεν παρατηρείται μεγάλη αυξομείωση στις μετακινήσεις, όσο όταν μειώνεται η διάμετρος σε  $0,3m$  για 7 οπές.



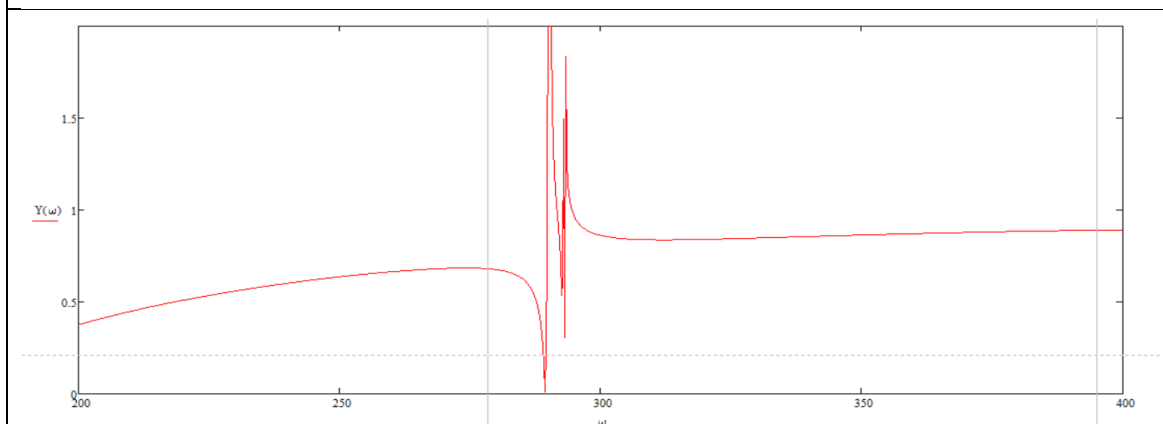
### 5.2.5. Μοντελοποίηση με διαφορετικά χαρακτηριστικά αφρολέξ-ελαστομερούς μεταξύ κυλίνδρων χάλυβα

Στην συνέχεια της μοντελοποίησης, έγινε αύξηση της στρώσης αφρολέξ-ελαστομερούς μεταξύ των κυλίνδρων χάλυβα μέχρι  $h=0.04m$ . Με την αύξηση του πάχους γίνεται μείωση της εσωτερικής δυσκαμψίας  $K_i$ . Η διερεύνηση συνεχίστηκε για τα μοντέλα που αναφέραμε παραπάνω για βελτιστοποίηση τους και με μέτρο ελαστικότητας  $E=1800kPa$ .

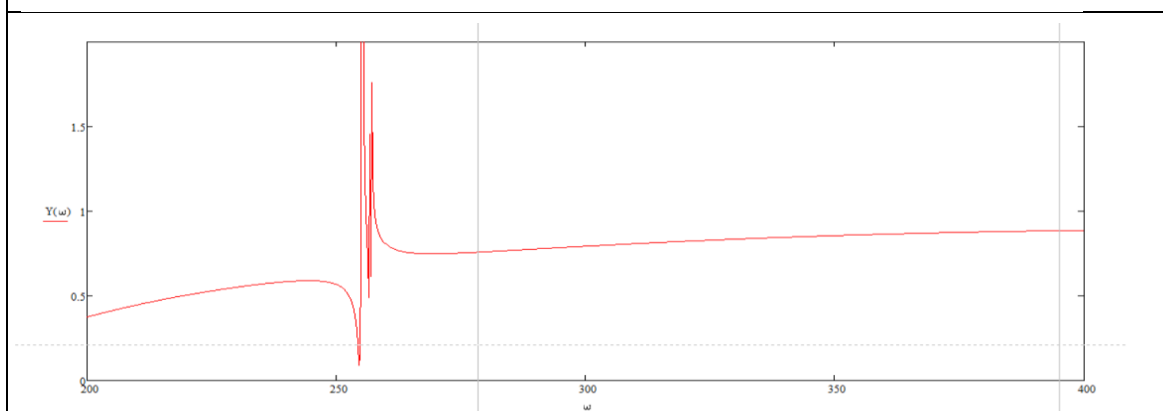
Παρακάτω παρατίθενται τα διαγράμματα του λόγου  $Y(\omega)$ .



Εικόνα 5.2.5.1: Διάγραμμα  $Y(\omega)$  για 14 σπές με  $H=0,2m$ ,  $D=0,6m$ ,  $t=0,01m$  και  $h=0,01m$

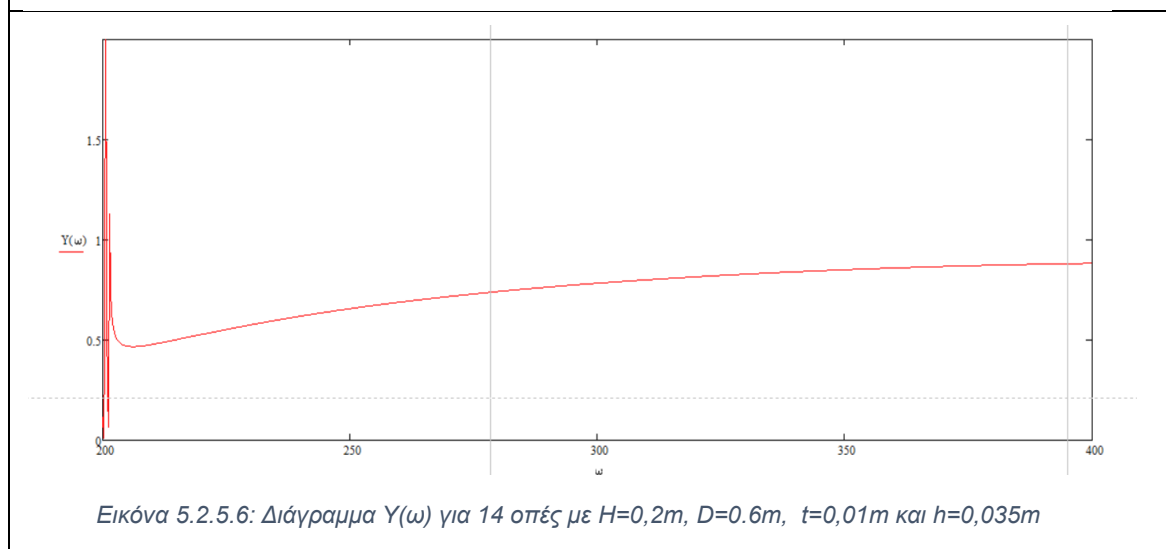
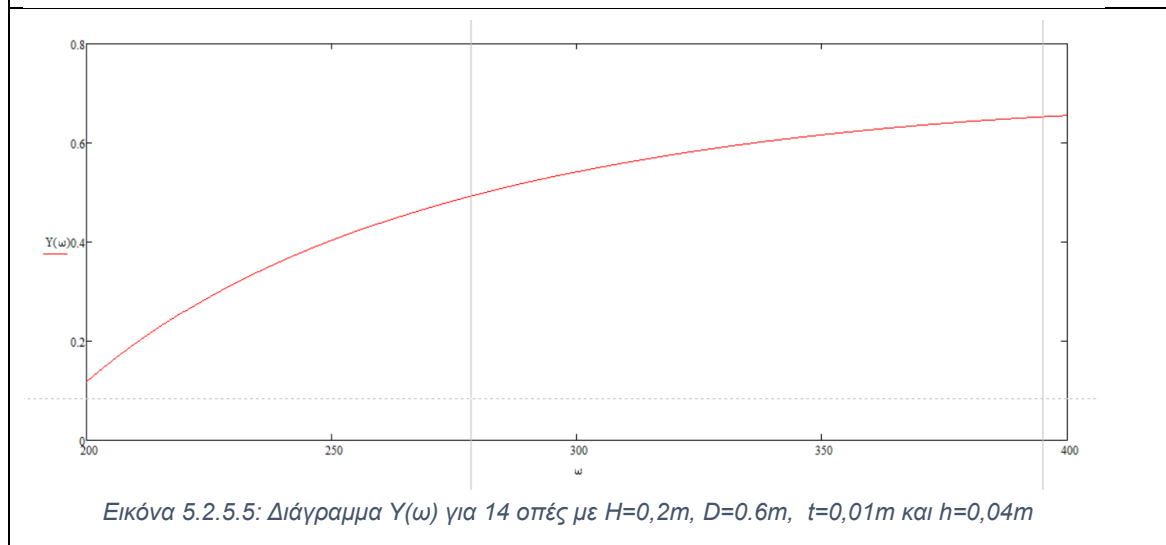
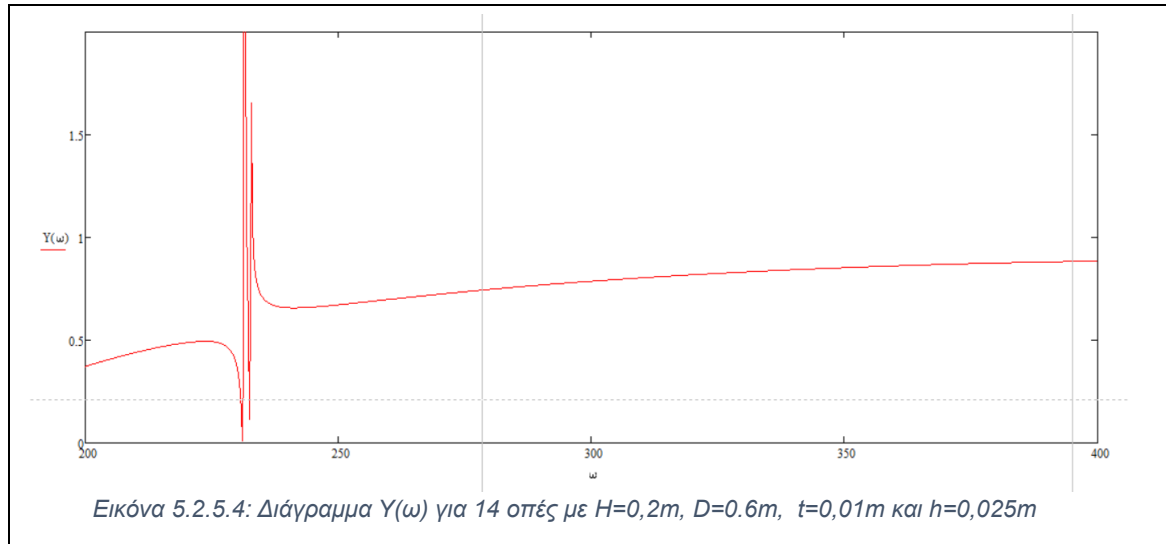


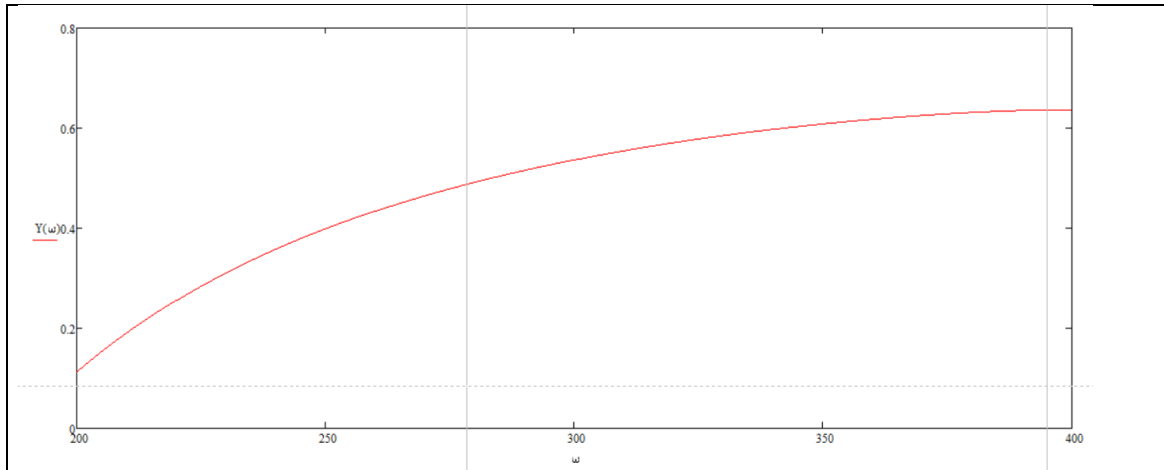
Εικόνα 5.2.5.2: Διάγραμμα  $Y(\omega)$  για 14 σπές με  $H=0,2m$ ,  $D=0,6m$ ,  $t=0,01m$  και  $h=0,015m$



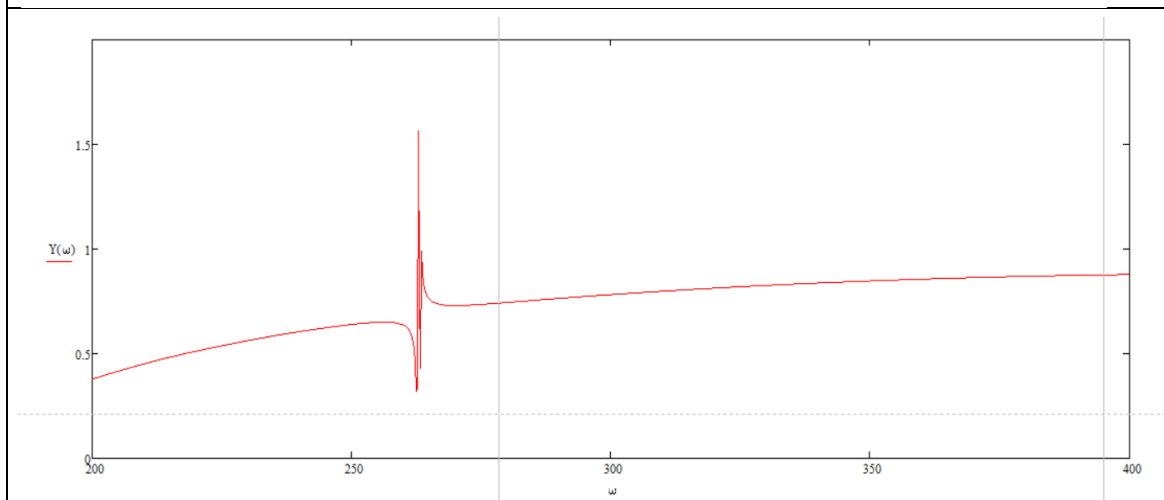
Εικόνα 5.2.5.3: Διάγραμμα  $Y(\omega)$  για 14 σπές με  $H=0,2m$ ,  $D=0,6m$ ,  $t=0,01m$  και  $h=0,020m$

## Εφαρμογή Μεταλλικών στη Θεμελίωση Μηχανών Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας για Δυναμική Φόρτιση

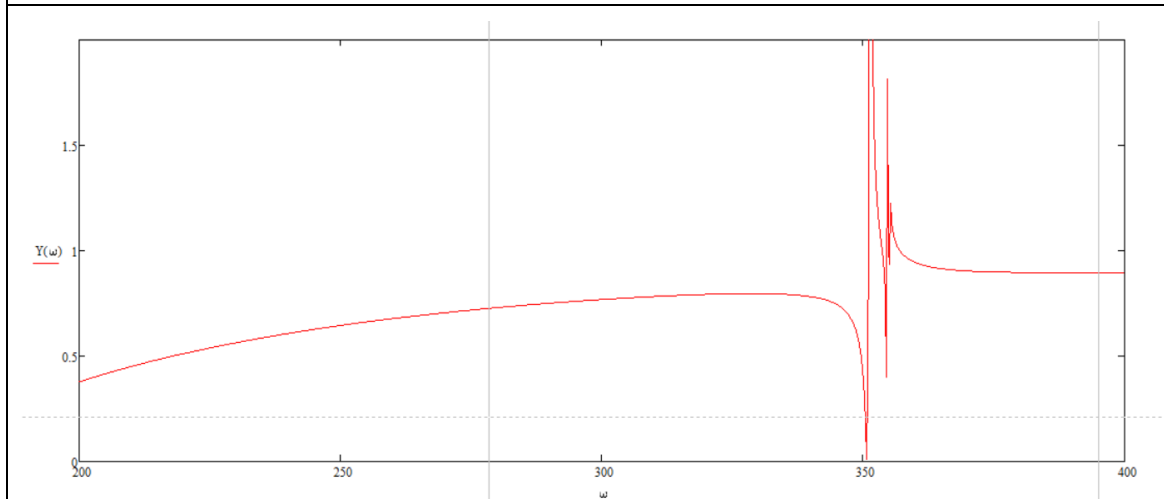




Εικόνα 5.2.5.7: Διάγραμμα  $Y(\omega)$  για 14 σπές με  $H=0,2m$ ,  $D=0,3m$ ,  $t=0,01m$  και  $h=0,01m$

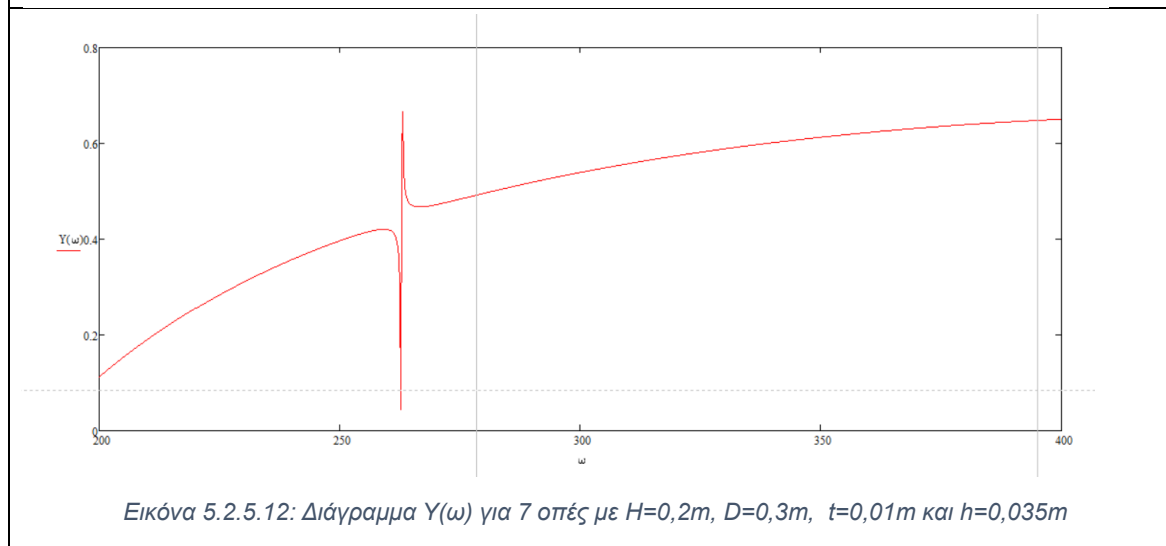
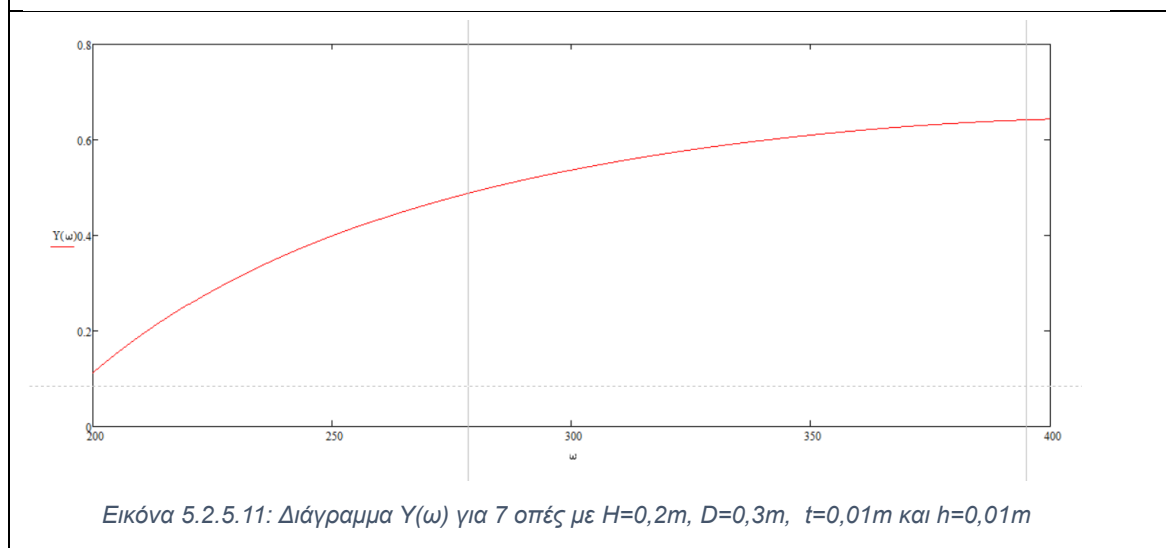
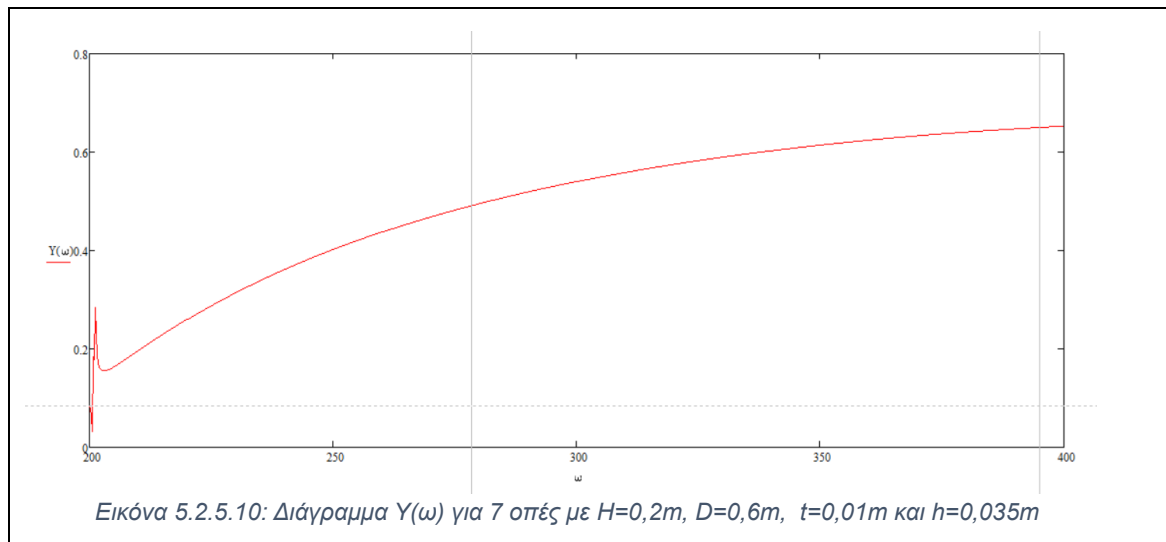


Εικόνα 5.2.5.8: Διάγραμμα  $Y(\omega)$  για 14 σπές με  $H=0,2m$ ,  $D=0,3m$ ,  $t=0,01m$  και  $h=0,035m$



Εικόνα 5.2.5.9: Διάγραμμα  $Y(\omega)$  για 7 σπές με  $H=0,2m$ ,  $D=0,6m$ ,  $t=0,01m$  και  $h=0,01m$

## Εφαρμογή Μεταλλικών στη Θεμελίωση Μηχανών Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας για Δυναμική Φόρτιση



<b>Χαρακτηριστικά μοντέλου για <math>\rho_c=2,4 \text{ tns/m}^2</math> και 4 στρώσεις</b>				
<b>14 οπές <math>D=0,6m</math>, <math>H=0,2m</math>, <math>t=0,01</math></b>				
	<b><math>h=0,01m</math></b>	<b><math>h=0,015m</math></b>	<b><math>h=0,02m</math></b>	<b><math>h=0,025m</math></b>
<b><math>m_e</math></b>	85,396	85,36377	85,3311	85,2983
<b><math>m_i</math></b>	6,1751	6,1751	6,1751	6,1751

Συνολική Μάζα 4 στρώσεων	366,284	366,155	366,0251	365,8937
<b>M</b>	2.085,396	2.085,3637	2.085,3311	2.085,2983
<b>K<sub>i</sub></b>	779.461,779	532.178,8227	408.636,3046	334.589,9619
<b>K<sub>e</sub></b>	65.520.000	65.520.000	65.520.000	65.520.000

Πίνακας 5-13: Πίνακας χαρακτηριστικών για διαφορετικά πάχη ελαστομερούς-αφρολέξ

Χαρακτηριστικά μοντέλου για $\rho_c=2,4 \text{ tns/m}^2$ και 4 στρώσεις				
H=0.2m, t=0.01				
	14 οπές, D=0,6m		14 οπές, D=0,3m	
	h=0.035m	h=0.04m	h=0,01	h=0,035
<b>m<sub>e</sub></b>	85,231	85,198	86,852	86,7676
<b>m<sub>i</sub></b>	6,1751	6,1751	1,543	1,543
Συνολική Μάζα 4 στρώσεων	365,627	365,493	353,586	353,245
<b>M</b>	2.085,231	2.085,198	2.086,852	2.086,767
<b>K<sub>i</sub></b>	250.135,216	223.817,328	307.301,092	106.749,862
<b>K<sub>e</sub></b>	65.520.000	65.520.000	65.520.000	65.520.000

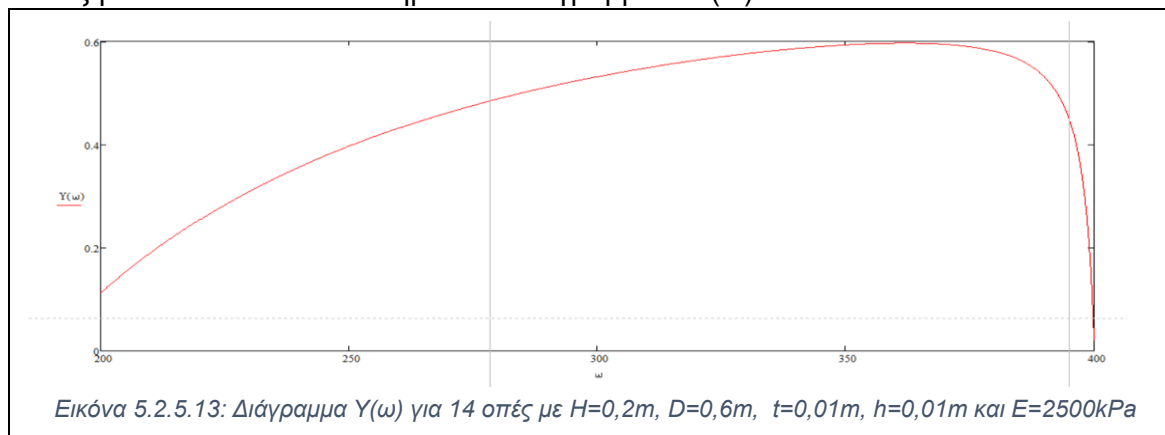
Πίνακας 5-14: Πίνακας χαρακτηριστικών για διαφορετικά πάχη ελαστομερούς-αφρολέξ

Χαρακτηριστικά μοντέλου για $\rho_c=2,4 \text{ tns/m}^2$ και 4 στρώσεις				
H=0.2m, t=0.01				
	7 οπές, D=0,6m		7 οπές, D=0,3m	
	h=0.01m	h=0.035m	h=0,01	h=0,035
<b>m<sub>e</sub></b>	86,3780	86,295	87,1063	87,063
<b>m<sub>i</sub></b>	3,087	3,087	0,771	0,771
Συνολική Μάζα 4 στρώσεων	357,862	357,533	351,5131	351,342
<b>M</b>	2.086,378	2.086,295	2.087,106	2.087,063
<b>K<sub>i</sub></b>	389.730,889	125.067,608	153.650,546	53.374,931
<b>K<sub>e</sub></b>	65.520.000	65.520.000	65.520.000	65.520.000

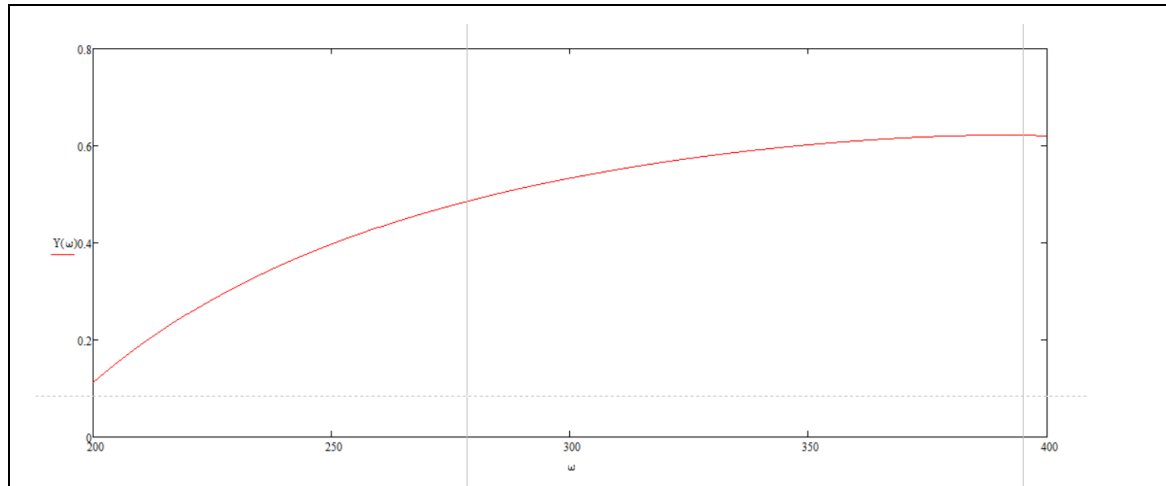
Πίνακας 5-15: Πίνακας χαρακτηριστικών για διαφορετικά πάχη ελαστομερούς-αφρολέξ

Με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα παρατηρούμε πως για σταθερή εσωτερική μάζα χάλυβα ανάλογα με την διάμετρο του , χρειάζεται διαφορετικό πάχος ελαστομερούς-αφρολέξ για καλύτερη απόδοση. Πιο αναλυτικά για μεγαλύτερη διάμετρο χάλυβα προτιμάται μεγαλύτερο πάχος ελαστομερούς μέσα στις οπές ενώ αντίστοιχα για μικρότερη το αντίθετο. Η αύξηση του πάχους μετακινεί το διάγραμμα προς τα αριστερά με αποτέλεσμα το τοπικό ακρότατο να μην συμβαίνει στο διάστημα μεταξύ 30 με 60 Hz.

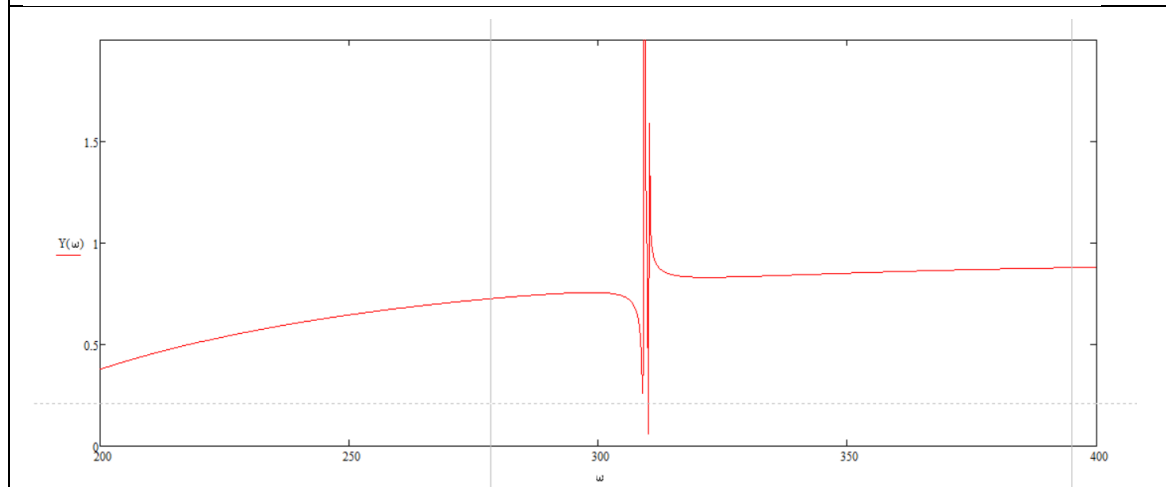
Μετά την αλλαγή πάχους , ακολουθήθηκε όπως παραπάνω αλλαγή του μέτρου ελαστικότητας αντίστοιχα για κάθε μη ευνοϊκό πάχος ελαστομερούς για την ανάλογη διάταξη. Ακολουθούν τα πιο σημαντικά διαγράμματα  $\Upsilon(\omega)$ .



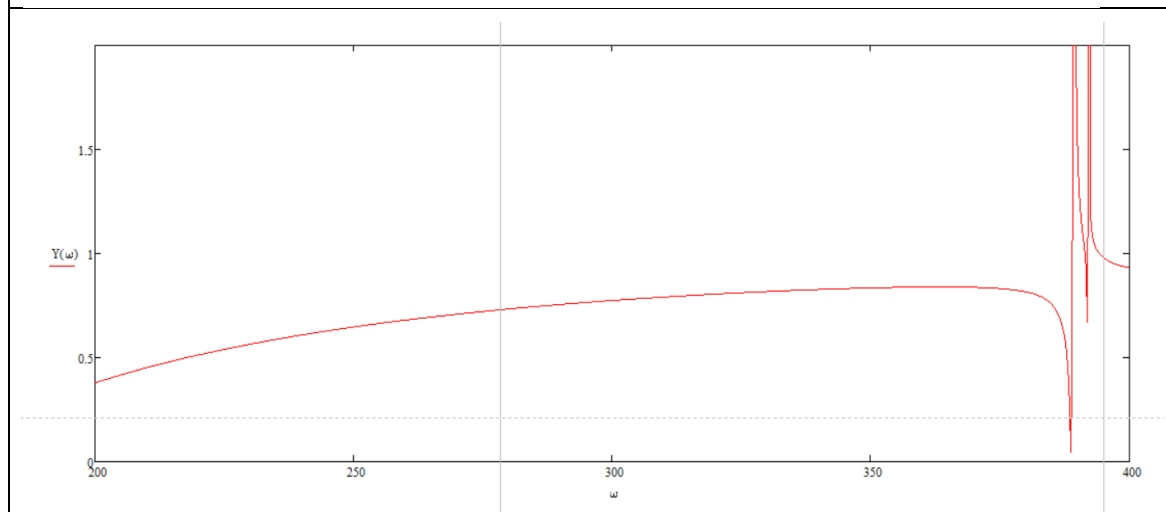
## Εφαρμογή Μεταλλικών στη Θεμελίωση Μηχανών Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας για Δυναμική Φόρτιση



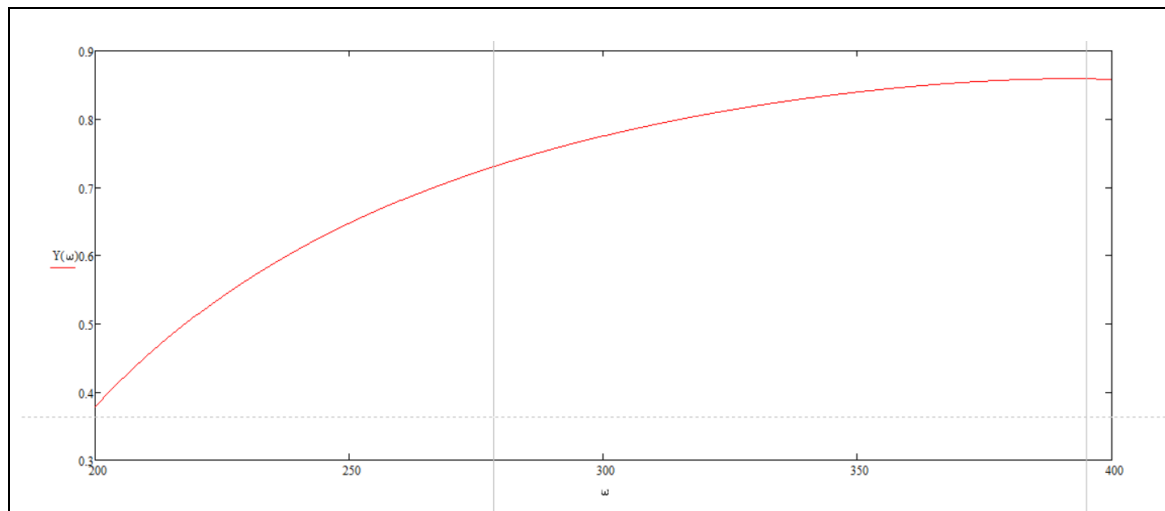
Εικόνα 5.2.5.14: Διάγραμμα  $Y(\omega)$  για 14 σπές με  $H=0,2m$ ,  $D=0,6m$ ,  $t=0,01m$ ,  $h=0,01m$  και  $E=3500kPa$



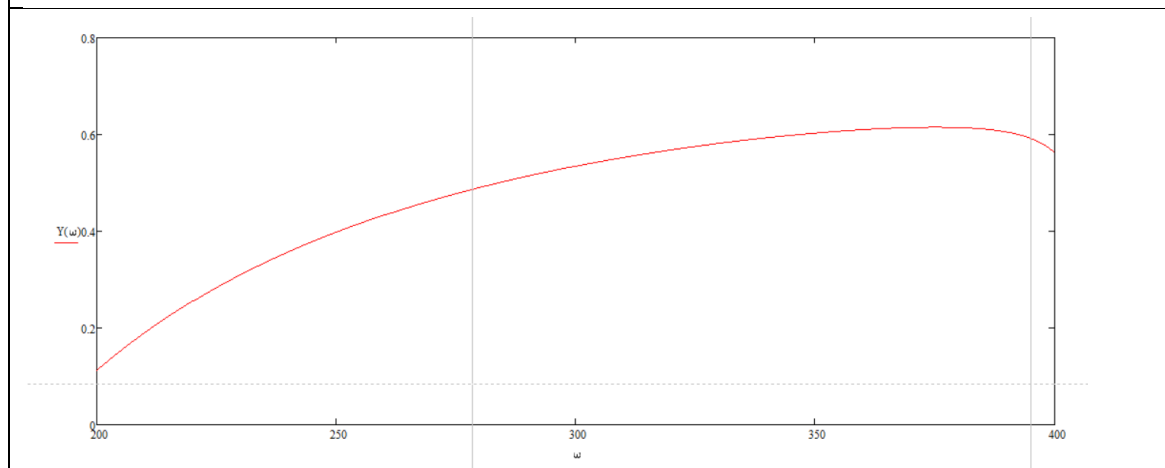
Εικόνα 5.2.5.15: Διάγραμμα  $Y(\omega)$  για 14 σπές με  $H=0,2m$ ,  $D=0,3m$ ,  $t=0,035m$ ,  $h=0,01m$  και  $E=2500kPa$



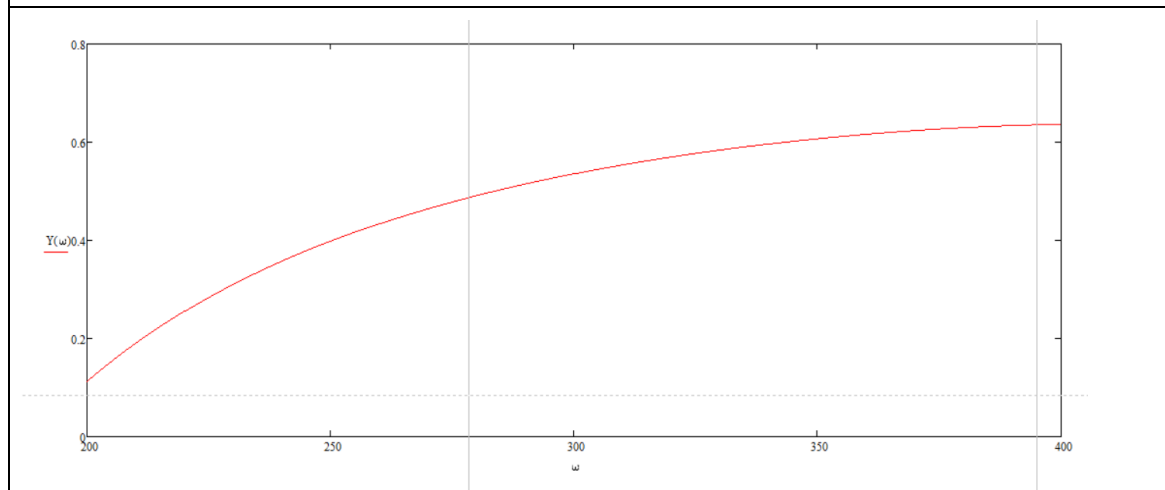
Εικόνα 5.2.5.16: Διάγραμμα  $Y(\omega)$  για 14 σπές με  $H=0,2m$ ,  $D=0,3m$ ,  $t=0,035m$ ,  $h=0,01m$  και  $E=4000kPa$



Εικόνα 5.2.5.17: Διάγραμμα  $Y(\omega)$  για 14 σπές με  $H=0,2m$ ,  $D=0,3m$ ,  $t=0,01m$ ,  $h=0,01m$  και  $E=2500kPa$

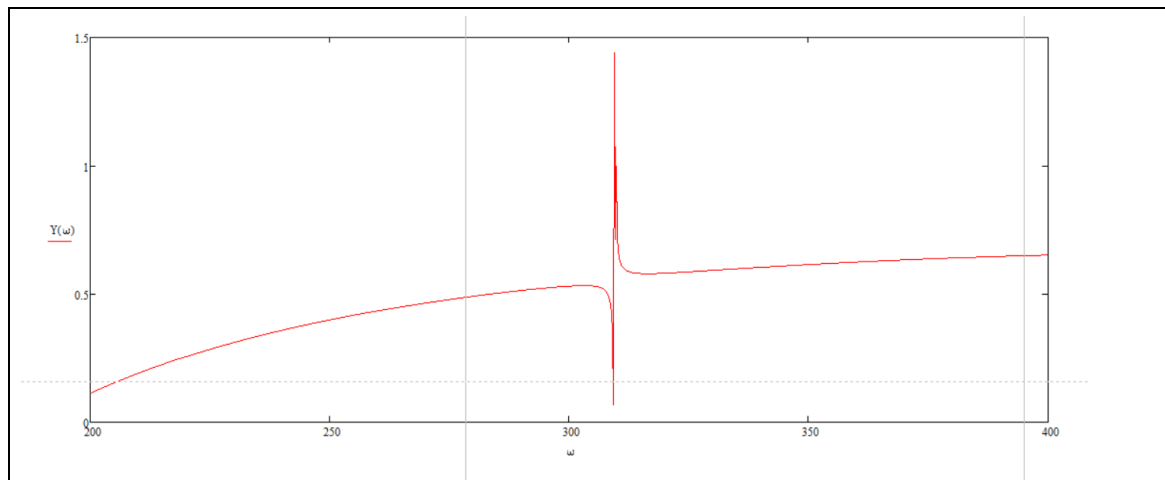


Εικόνα 5.2.5.18: Διάγραμμα  $Y(\omega)$  για 7 σπές με  $H=0,2m$ ,  $D=0,6m$ ,  $t=0,01m$ ,  $h=0,01m$  και  $E=2500kPa$

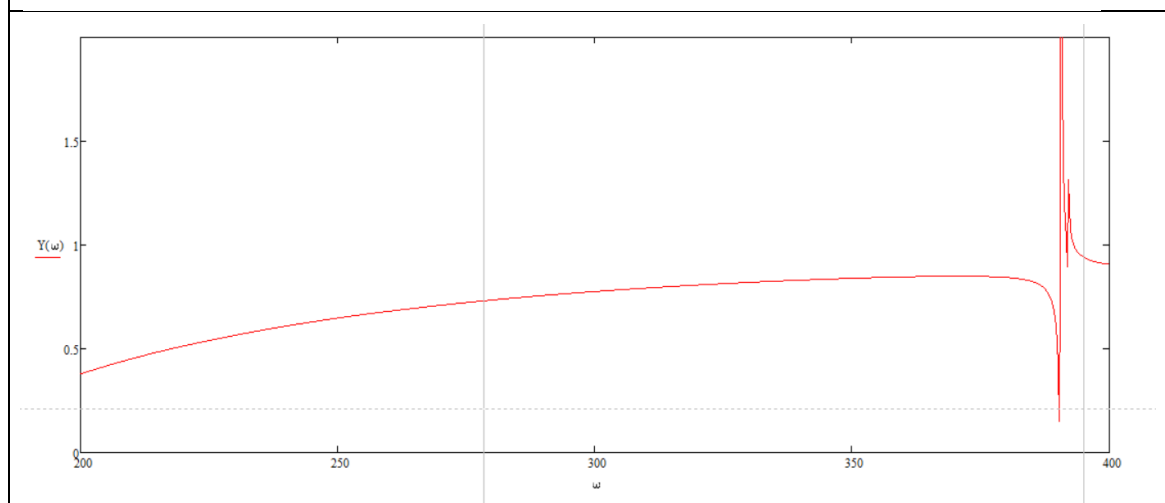


Εικόνα 5.2.5.19: Διάγραμμα  $Y(\omega)$  για 7 σπές με  $H=0,2m$ ,  $D=0,6m$ ,  $t=0,01m$ ,  $h=0,01m$  και  $E=3500kPa$

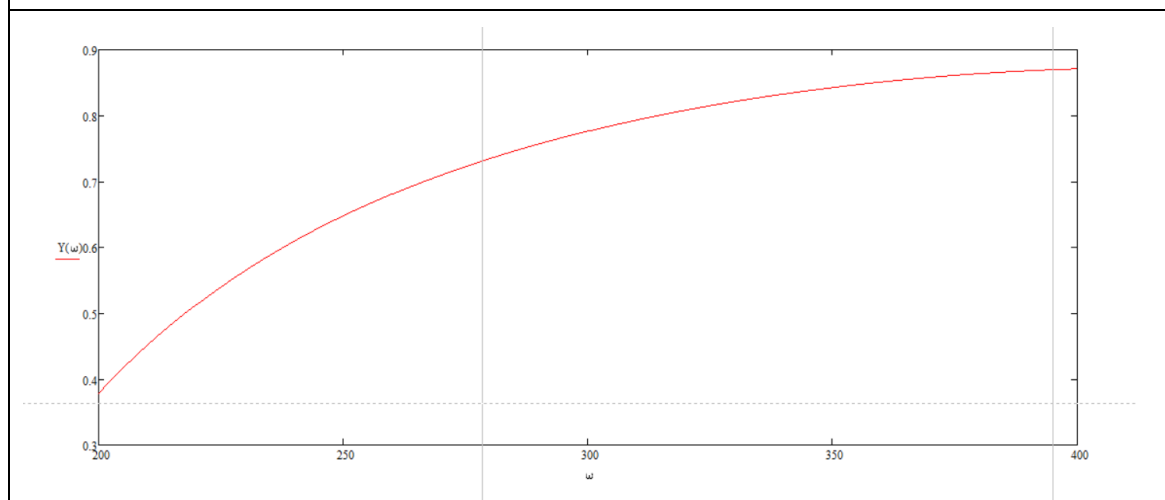
## Εφαρμογή Μεταλλικών στη Θεμελίωση Μηχανών Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας για Δυναμική Φόρτιση



Εικόνα 5.2.5.20: Διάγραμμα  $Y(\omega)$  για 7 οπές με  $H=0,2m$ ,  $D=0,3m$ ,  $t=0,035m$ ,  $h=0,01m$  και  $E=2500kPa$



Εικόνα 5.2.5.21: Διάγραμμα  $Y(\omega)$  για 7 οπές με  $H=0,2m$ ,  $D=0,3m$ ,  $t=0,035m$ ,  $h=0,01m$  και  $E=4000kPa$



Εικόνα 5.2.5.22: Διάγραμμα  $Y(\omega)$  για 7 οπές με  $H=0,2m$ ,  $D=0,3m$ ,  $t=0,01m$ ,  $h=0,01m$  και  $E=2500kPa$



Χαρακτηριστικά μοντέλου για $\rho_c=2,4 \text{ tns/m}^2$ και 4 στρώσεις					
14 οπές, $H=0.2\text{m}$ , $t=0.01$					
	$D=0,6\text{m}$ , $h=0,01\text{m}$		$D=0,3\text{m}$ , $h=0,035\text{m}$		$D=0,3\text{m}$ , $h=0,01\text{m}$
	$E=2500\text{kPa}$	$E=3500\text{kPa}$	$E=2500\text{kPa}$	$E=4000\text{kPa}$	$E=2500\text{kPa}$
$m_e$	85,396	85,396	86,7676	86,7676	86,85279
$m_i$	6,1751	6,1751	1,543	1,543	1,5437
Συνολική Μάζα 4 στρώσεων	366,284	366,284	353,245	353,245	353,58629
$M$	2.085,3961	2.085,396	2.086,767	2.086,767	2086,8527
$K_i$	1.082.585,80	1.515.620,126	148.263,69	237.221,916	426807,072
$K_e$	65.520.000	65.520.000	65.520.000	65.520.000	65.520.000

Πίνακας 5-16: Πίνακας χαρακτηριστικών για διαφορετικό μέτρο ελαστικότητας ελαστομερούς-αφρολέξ

Χαρακτηριστικά μοντέλου για $\rho_c=2,4 \text{ tns/m}^2$ και 4 στρώσεις					
$H=0.2\text{m}$ , $t=0.01$					
	7 οπές, $D=0,6\text{m}$ , $h=0,01\text{m}$		7 οπές, $D=0,3\text{m}$ , $h=0,035\text{m}$		$D=0,6\text{m}$ , $h=0,01\text{m}$
	$E=2500\text{kPa}$	$E=3500\text{kPa}$	$E=2500\text{kPa}$	$E=4000\text{kPa}$	$E=2500\text{kPa}$
$m_e$	86,3780	86,3780	87,063	87,063	87,1063
$m_i$	3,087	3,087	0,771	0,771	0,771889
Συνολική Μάζα 4 στρώσεων	357,862	357,862	351,342	351,342	351,5131
$M$	2.086,378	2.086,378	2.087,063	2.087,063	2087,1063
$K_i$	541.292,902	757.810,0632	74.131,8489	118.610,958	213403,53
$K_e$	65.520.000	65.520.000	65.520.000	65.520.000	65.520.000

Πίνακας 5-17: Πίνακας χαρακτηριστικών για διαφορετικό μέτρο ελαστικότητας ελαστομερούς-αφρολέξ

Με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα παρατηρούμε πως ανάλογα το μέτρο ελαστικότητας βελτιώνεται η απόδοση του μοντέλου για τα διάφορα πάχη. Πιο αναλυτικά, όπως αναφέραμε πιο πριν, για μεγαλύτερη διάμετρο χάλυβα προτιμάται μεγαλύτερο πάχος ελαστομερούς, όμως αν αυξήσουμε το μέτρο ελαστικότητας, πρέπει να μειώσουμε το πάχος του ελαστομερούς. Αυτό συμβαίνει διότι με την αύξηση του μέτρου ελαστικότητας, αυξάνεται η εσωτερική δυσκαμψία, άρα έχουμε μεγαλύτερη απόσβεση μεταξύ των κυλίνδρων του χάλυβα. Με βάση αυτά, καταλήγουμε στο ότι δεν υπάρχει κάποια συγκεκριμένη διάσταση και μέτρο ελαστικότητας του ελαστομερούς-αφρολέξ που μπορεί να τοποθετηθεί στο μοντέλο, αλλά εξαρτάται από τα διάφορα χαρακτηριστικά των οπών του χάλυβα.

### 5.2.6. Τελικά μοντέλα αναλύσεων

Μετά το πέρας των παραπάνω αναλύσεων οι τελικές διαμορφώσεις των πιο ευνοϊκών χαρακτηριστικών, για καλύτερη απόδοση σε όλο το εύρος των συχνοτήτων, είναι οι εξής:

- Μοντέλο 1 με πάχος πλάκας  $H=0,2\text{m}$  με 14 οπές, πληρούμενες με χάλυβα διαμέτρου  $D=0,6\text{m}$ , περιελκόμενου με αφρολέξ πάχους  $t=0.01$  με μέτρο ελαστικότητας  $2500\text{kPa}$  και με ενδιάμεσες στρώσεις σιλομέρ μεταξύ των πλακών πάχους  $h=0,01\text{m}$  με μετρο ελαστικότητας  $E=1800\text{kPa}$ ,
- Μοντέλο 2 με πάχος πλάκας  $H=0,2\text{m}$  με 7 οπές, πληρούμενες με χάλυβα διαμέτρου  $D=0,6\text{m}$ , περιελκόμενου με αφρολέξ πάχους  $t=0.01$  με μέτρο ελαστικότητας  $2500\text{kPa}$  και με ενδιάμεσες στρώσεις σιλομέρ μεταξύ των πλακών πάχους  $h=0,01\text{m}$  με μετρο ελαστικότητας  $E=1800\text{kPa}$ ,
- Μοντέλο 3 με πάχος πλάκας  $H=0,2\text{m}$  με 14 οπές, πληρούμενες με χάλυβα διαμέτρου  $D=0,6\text{m}$ , περιελκόμενου με αφρολέξ πάχους  $t=0.01$  με μέτρο ελαστικότητας  $2500\text{kPa}$  και με ενδιάμεσες στρώσεις σιλομέρ μεταξύ των πλακών πάχους  $h=0,01\text{m}$  με μετρο ελαστικότητας  $E=1800\text{kPa}$ ,

## Εφαρμογή Μεταλλικών στη Θεμελίωση Μηχανών Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας για Δυναμική Φόρτιση

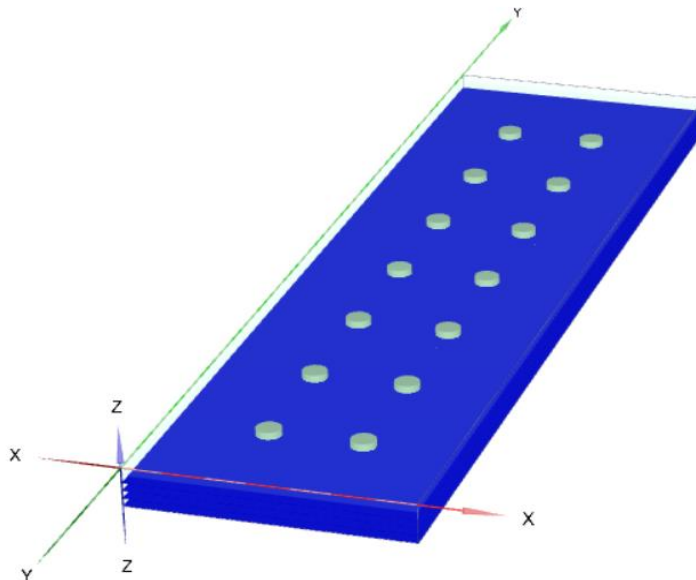
- Μοντέλο 4 με πάχος πλάκας  $H=0,2\text{m}$  με 7 οπές, πληρούμενες με χάλυβα διαμέτρου  $D=0,6\text{m}$ , περιεκόμενου με αφρολέξ πάχους  $t=0,01$  με μέτρο ελαστικότητας  $2500\text{kPa}$  και με ενδιάμεσες στρώσεις σιλομέρ μεταξύ των πλακών πάχους  $h=0,01\text{m}$  με μέτρο ελαστικότητας  $E=1800\text{kPa}$ .

<b>Χαρακτηριστικά μοντέλων</b>		
<b><math>H=0,2\text{m}</math>, <math>t=0,01</math>, <math>h=0,01\text{m}</math>, <math>D=0,6\text{m}</math>, <math>E_{\text{αφρ}}=2500\text{kPa}</math>, <math>E_{\text{σιλ}}=1800\text{kPa}</math></b>		
	<b>14 οπές</b>	<b>7 οπές</b>
$m_e$	85,396	86,3780
$m_i$	6,1751	3,0875
Συνολική Μάζα 4 στρώσεων	366,284	357,862
$M$	2.085,396	2.086,378
$K_i$	1.082.585,805	541.292,902
$K_e$	65.520.000	65.520.000

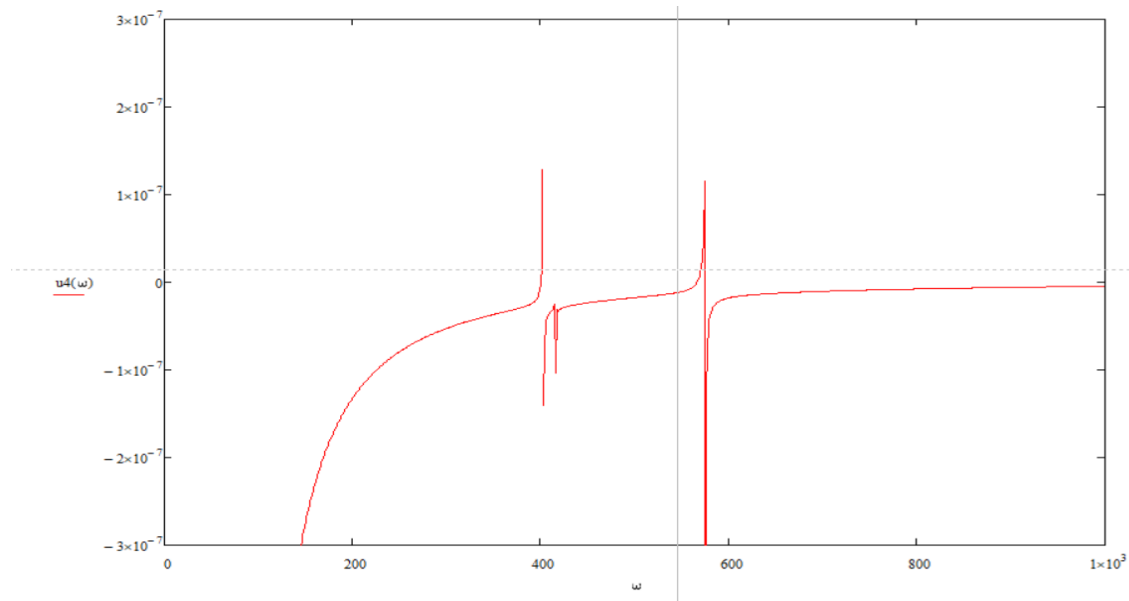
*Πίνακας 5-18: Χαρακτηρίστηκα μοντέλων*

<b>Χαρακτηριστικά μοντέλων</b>		
<b><math>H=0,2\text{m}</math>, <math>t=0,01</math>, <math>h=0,01\text{m}</math>, <math>D=0,3\text{m}</math>, <math>E_{\text{αφρ}}=2500\text{kPa}</math>, <math>E_{\text{σιλ}}=1800\text{kPa}</math></b>		
	<b>14 οπές</b>	<b>7 οπές</b>
$m_e$	86,85279	87,1063
$m_i$	1,5437	0,771889
Συνολική Μάζα 4 στρώσεων	353,58629	351,5131
$M$	2086,8527	2087,1063
$K_i$	426807,072	213403,53
$K_e$	65.520.000	65.520.000

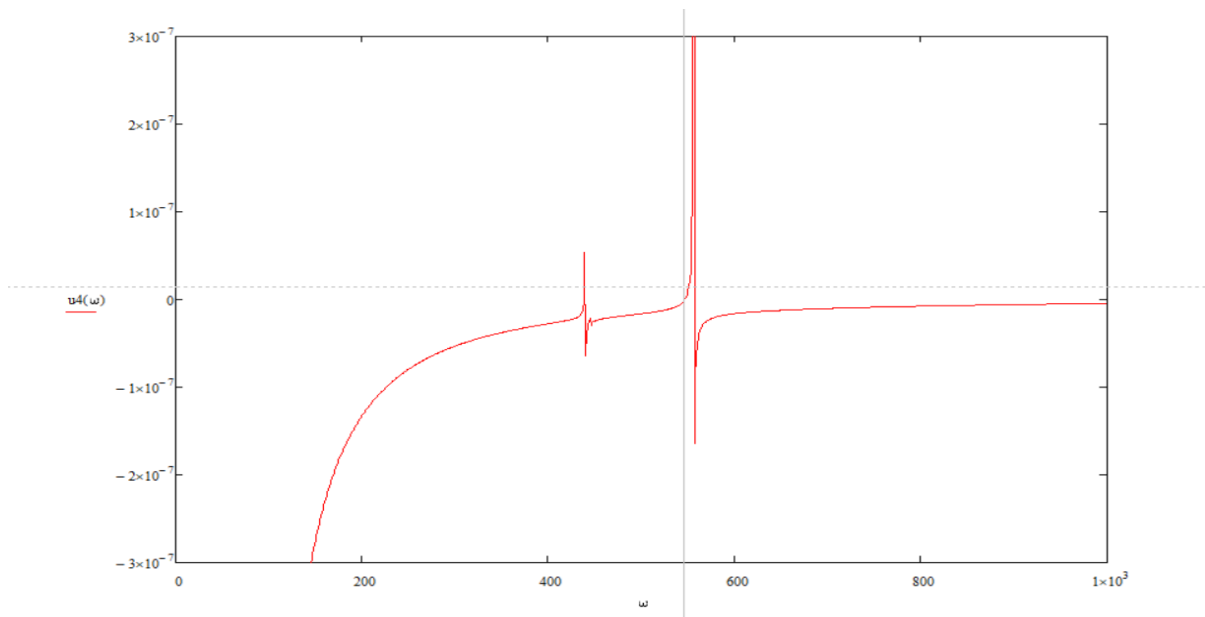
*Πίνακας 5-19: Χαρακτηρίστηκα μοντέλων*



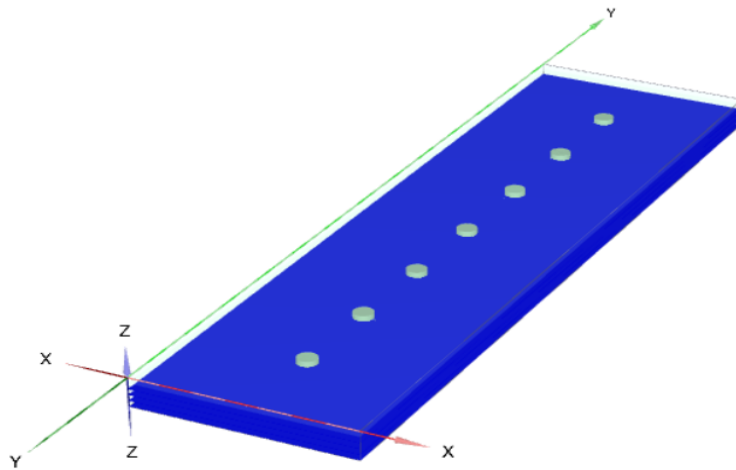
*Εικόνα 5.2.6.1: Διάταξη μοντέλων 1,3*



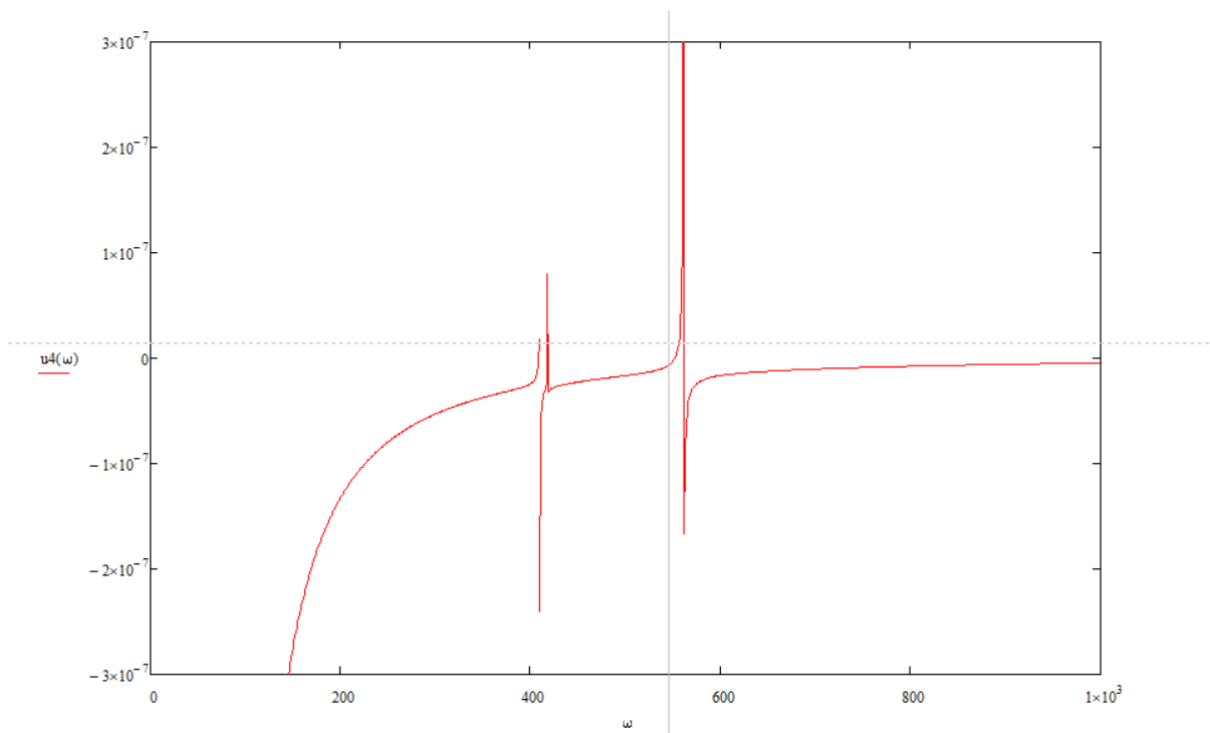
Εικόνα 5.2.6.2 Διάγραμμα μετατοπίσεων μοντέλου 1



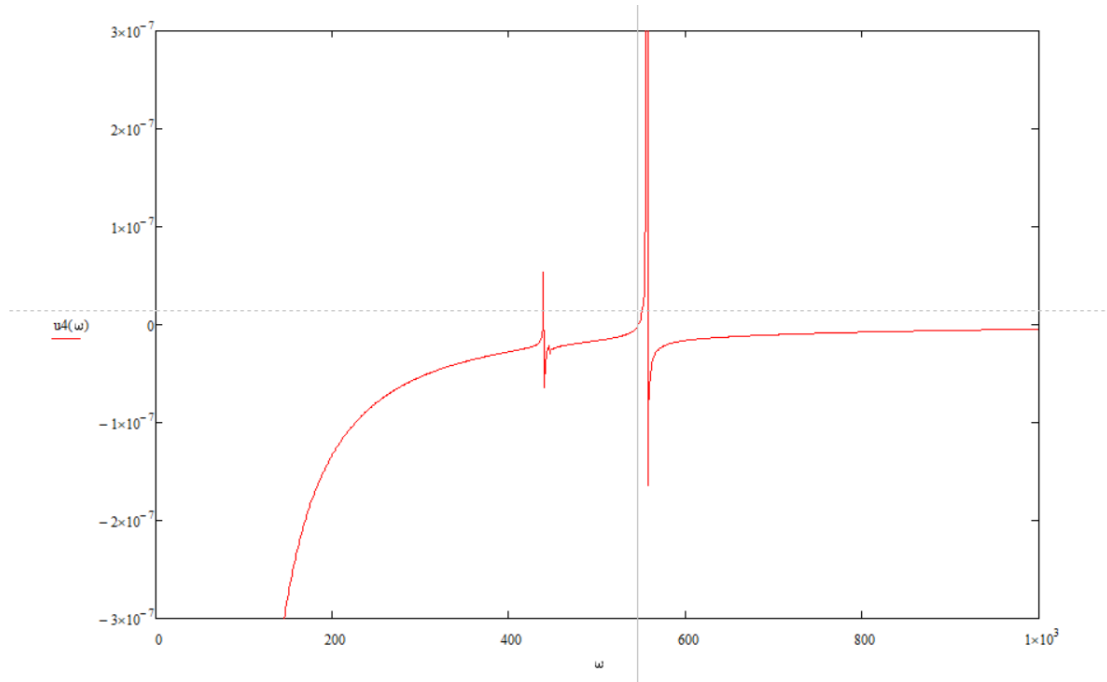
Εικόνα 5.2.6.3 Διάγραμμα μετατοπίσεων μοντέλου 3



Εικόνα 5.2.6.4: Διάταξη μοντέλων 2, 4



Εικόνα 5.2.6.5: Διάγραμμα μετατοπίσεων μοντέλου 2



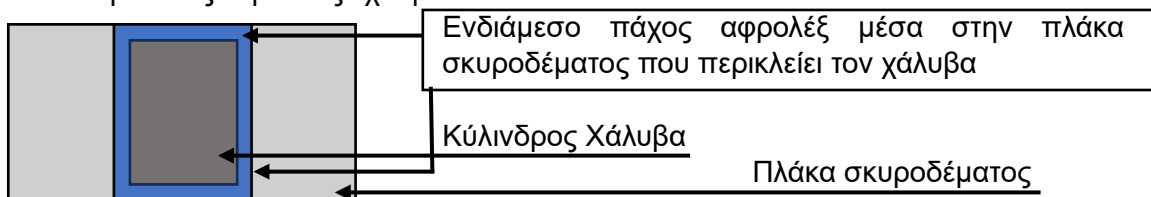
Εικόνα 5.2.6.6: Διάγραμμα μετατοπίσεων μοντέλου 4

## 6. Ανάλυση με πεπερασμένα στο πρόγραμμα Plaxis

### 6.1. Διαδικασία περιγραφής του μοντέλου στο Plaxis

Με βάση τα αποτελέσματα των αναλυτικών εξισώσεων καταλήξαμε στην διαμόρφωση τεσσάρων τελικών μοντέλων προς πεπερασμένη επίλυση με το πρόγραμμα Plaxis. Για την επίτευξη της σωστής προσομοίωσης του μοντέλου στο πρόγραμμα έγιναν οι παρακάτω παραδοχές.

Αρχικά γίνεται η περιγραφή της πλάκας από σκυρόδεμα με τις ανάλογες σπές των περιπτώσεων. Στην συνέχεια τοποθετείται ο χάλυβας, με πάχος 0,01m λιγότερο από πάνω και κάτω, άρα με  $h=0,18m$  και τοποθετείται περιμετρικά σε όλη την διατομή του ελαστομερούς αφρολέξ πάχους 0,01m. Αυτό συμβαίνει διότι θέλουμε να αναγνωριστεί η δυσκαμψία γύρω από την εσωτερική μάζα και να μην έχει επαφή με το εξωτερικό ελατήριο. Τέλος περιγράφουμε το πάχος του ενδιάμεσου σιλομέρ και επαναλαμβάνουμε την διαδικασία για όσες στρώσεις έχουμε.



Εικόνα 6.1-1: Τομή πλάκας σκυροδέματος

Βάσει των αναλυτικών εξισώσεων μας τα σύνορα του μοντέλου μας τα θεωρούμε κατά  $z$ ,  $x$  και  $y$  περιορισμένα, ορίζοντας πάκτωση.

Για την περιγραφή των χαρακτηριστικών των υλικών έγιναν παραδοχές για να έχουμε και ανάλογα αποτελέσματα στο πρόγραμμα. Πιο αναλυτικά για την εύρεση του μέτρου ελαστικότητας των υλικών, για να βρούμε την σωστή δυσκαμψία, υπολογίσαμε την δύναμη που ασκείται σε έναν κύλινδρο για μέτρο ελαστικότητας υλικών 2500kPa, για μοναδιαία μετατόπιση. Με αυτόν τον τρόπο, μετρώντας την δύναμη που ασκείται στην μία μονάδα, ορίσαμε την δυσκαμψία που έχουν τα υλικά βάση του προγράμματος και στην συνέχεια ανάλογα υπολογίστηκε το μέτρο ελαστικότητας του μοντέλου μας για να έχουμε το νούμερο της δυσκαμψίας που υπολογίσαμε από τις αναλυτικές εξισώσεις.

Αφού περιγράψαμε το μοντέλο μας, δημιουργούμε τα διάφορα στάδια ανάλυσης και ορίζουμε ένα σημείο αναφοράς. Το σημείο αναφοράς μας επιλέγουμε να είναι τοποθετημένο στο πάνω μέρος της πλάκας, και δημιουργούμε το διάγραμμα μετατοπίσεων με το χρόνο. Μας ενδιαφέρει η εξέταση των μετακινήσεων στο εύρος τιμών 30 με 60Hz.

Για την διέγερση της ταλαντούμενης μάζας, επιβάλαμε ημιτονοειδής δύναμη με 1000kN για διέγερση συχνότητας 30,40,50 και 60 Hz, με ιδιοπερίοδο 0,033, 0,025, 0,2, 0,016 s. Ο χρόνος που απαιτήσαμε να ασκούνται αυτές, είναι ίσος με 4s, έτσι ώστε να φτάσει η κατασκευή σε μία σταθερή τιμή μετακίνησης, καθώς στην αρχή υπάρχει μεγάλη διακύμανση. Μετά το πέρας αυτών των κύκλων ταλαντώσεων βγαίνει η τελική μετακίνηση της κατασκευής μας.

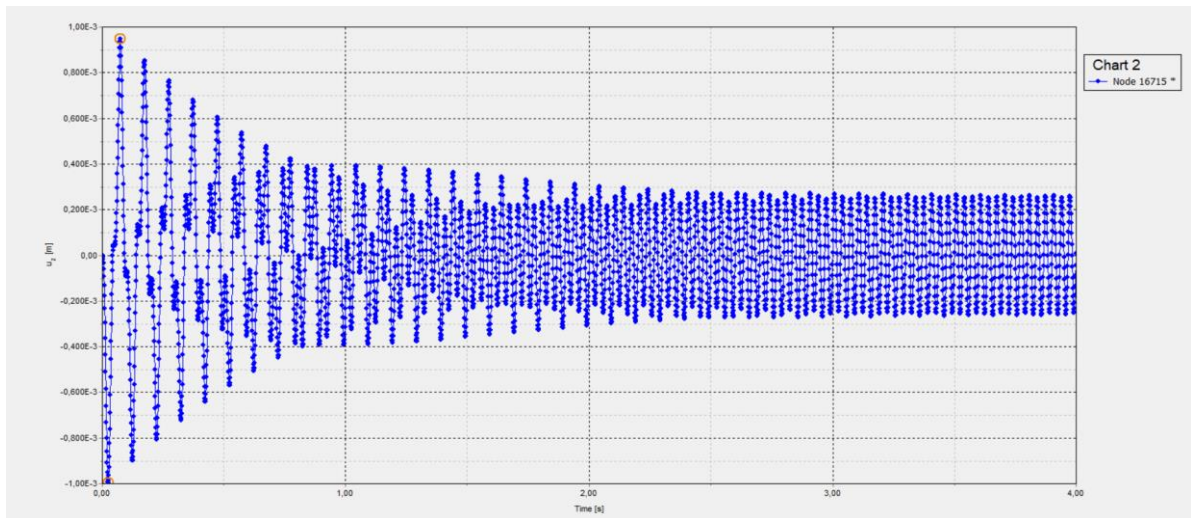
Τέλος μετά τον ορισμό του μοντέλου μας, ορίζουμε ένα αντίστοιχο μοντέλο με μία απλή πλάκα έδρασης από μπετό, με το ίδιο ύψος, με μία στρώση έδρασης από κάτω, από σιλομέρ πάχους  $t=0,01m$ , όπως στο μοντέλο μας. Ακολουθούμε την ίδια διαδικασία που περιγράφηκε παραπάνω και δημιουργούμε το διάγραμμα μετατοπίσεων με χρόνο. Μέσω του προγράμματος Plaxis, τοποθετούμε τα δύο διαγράμματα μετακινήσεων μαζί και συγκρίνουμε τις δύο βάσεις.

## 6.2. Μοντέλο 1

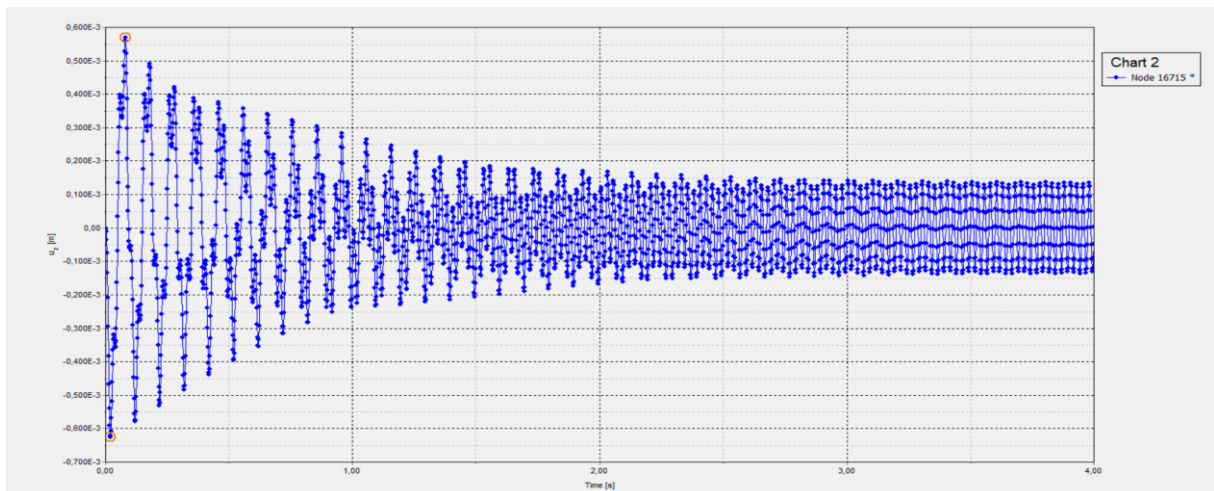
Ακολουθώντας την διαδικασία που περιγράφηκε, δημιουργούμε το μοντέλο 1. Το μοντέλο 1 βάση των αναλυτικών εξισώσεων αποτελείται από πλάκα σκυροδέματος πάχους  $H=0,2\text{m}$  με 14 οπές, πληρούμενες με χάλυβα διαμέτρου  $D=0,6\text{m}$ , περιελκόμενου με αφρολέξ πάχους  $t=0.01$  με μέτρο ελαστικότητας  $2500\text{kPa}$  και με ενδιάμεσες στρώσεις σιλομέρ μεταξύ των πλακών πάχους  $h=0,01\text{m}$  με μετρο ελαστικότητας  $E=1800\text{kPa}$ .

Για το πεπερασμένο μοντέλο μας έγινε η παραδοχή πως το μέτρο ελαστικότητας του ελαστομερούς-αφρολεξ είναι ίσο με το μέτρο ελαστικότητας επί την δυσκαμψία της μίας μονάδας του μοντέλου μας διαιρώντας το με την δυσκαμψία της μονάδας στο Plaxis, δηλαδή  $2500 \cdot 77327,55/212467=909,87$ .

Παρακάτω παρατίθεται τα διαγράμματα μετατοπίσεων για 30,40,50 και 60Hz.



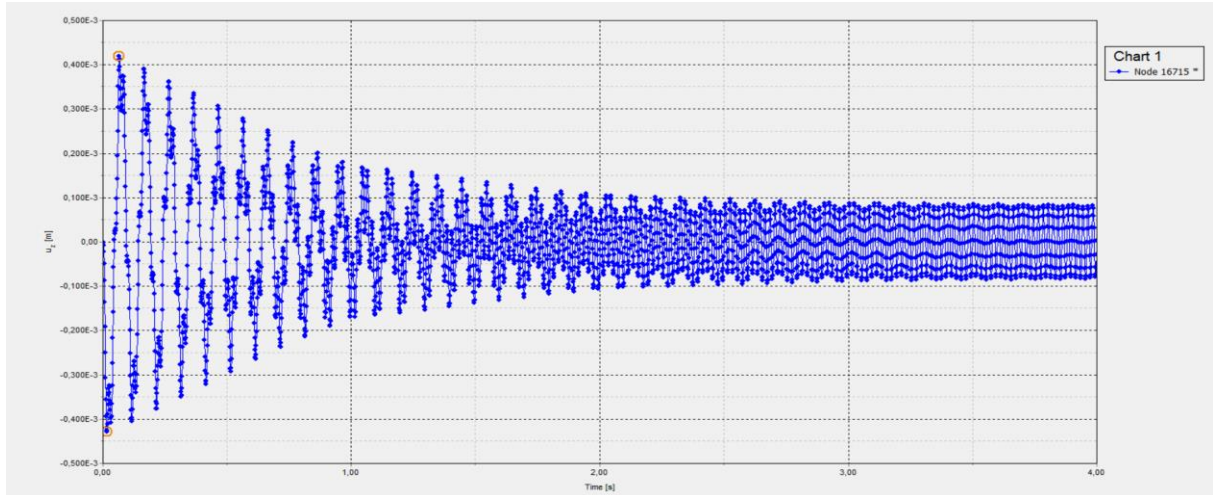
Εικόνα 6.2-1:Διάγραμμα μετατοπίσεων για 30Hz,  $u_1=2,61 \cdot 10^{-4}$



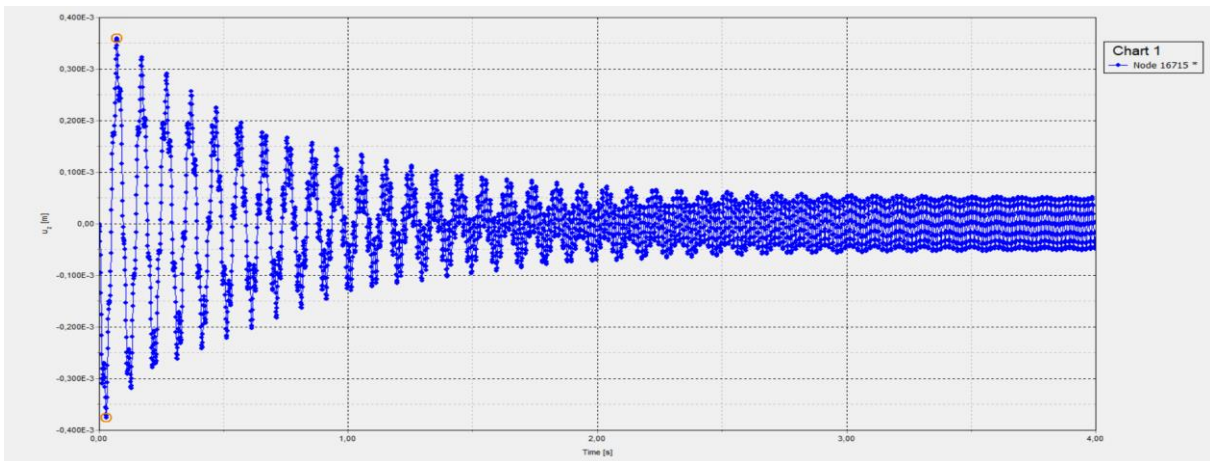
Εικόνα 6.2-2:Διάγραμμα μετατοπίσεων για 40Hz,  $u_1=1,36 \cdot 10^{-4}$



## Εφαρμογή Μεταλλικών στη Θεμελίωση Μηχανών Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας για Δυναμική Φόρτιση

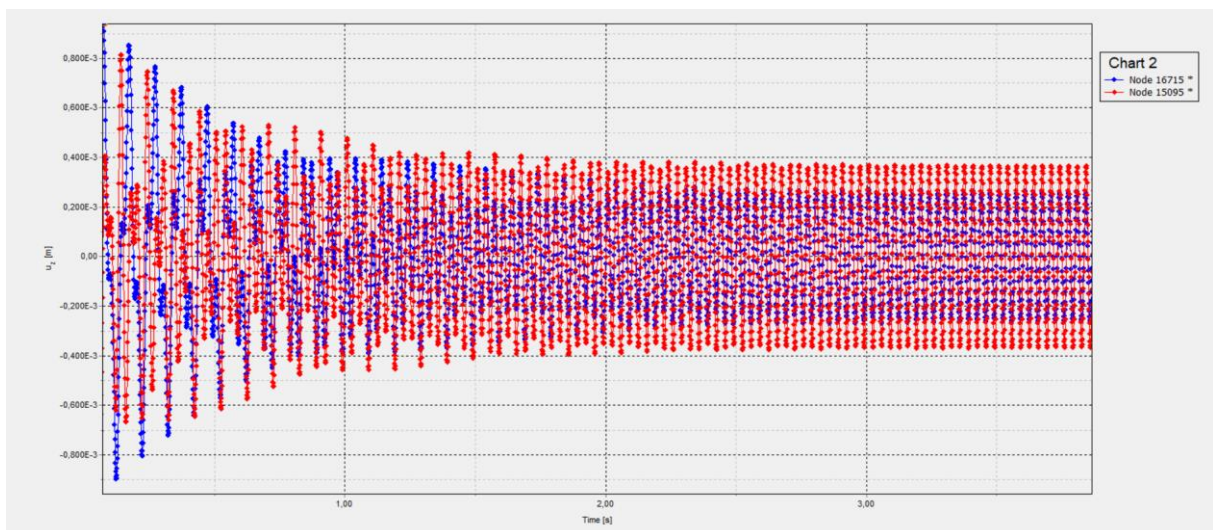


Εικόνα 6.2-3: Διάγραμμα μετατοπίσεων για 50Hz,  $u_1=8,45 \cdot 10^{-5}$



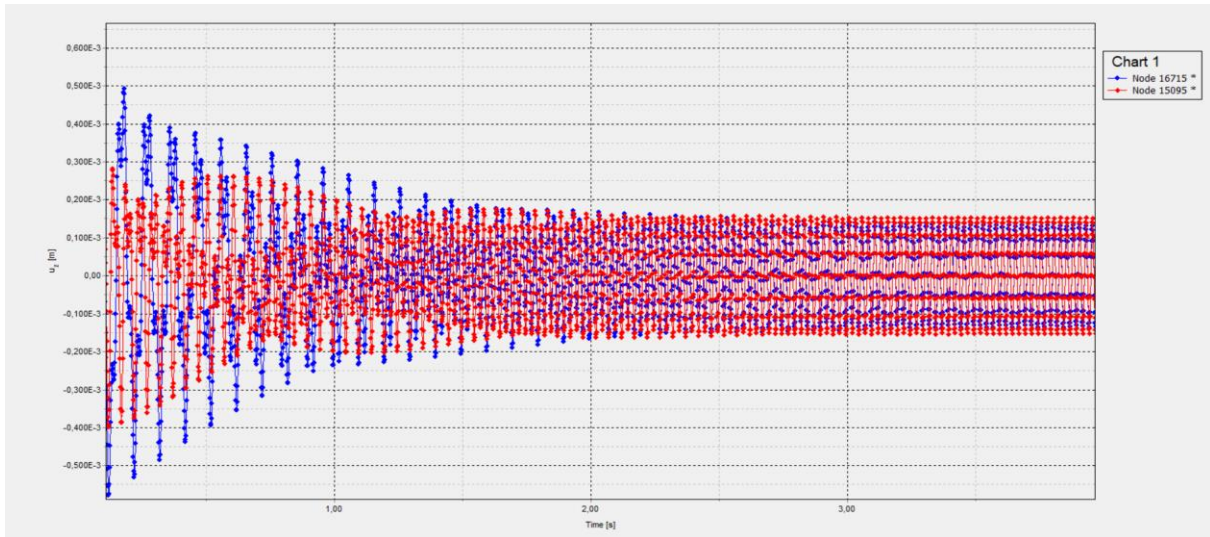
Εικόνα 6.2-4: Διάγραμμα μετατοπίσεων για 60Hz,  $u_1=5,15 \cdot 10^{-5}$

Στην συνέχεια έγινε σύγκριση αυτού με την αντίστοιχη απλή έδραση, σύμφωνα πάλι με τις αναλύσεις των πεπερασμένων στοιχείων, τοποθετώντας τα δύο διαγράμματα μαζί. (μπλε το μοντέλο και κόκκινο η απλή βάση έδρασης)

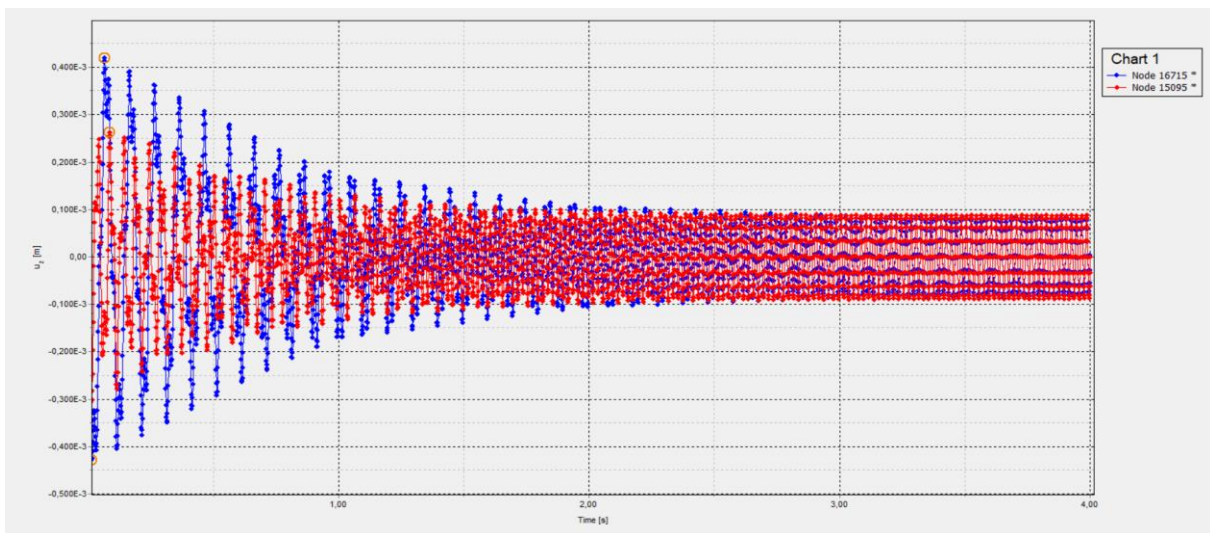


Εικόνα 6.2-5: Διάγραμμα για 30Hz με  $u_0=3,64 \cdot 10^{-4}$  και  $u_1=2,61 \cdot 10^{-4}$

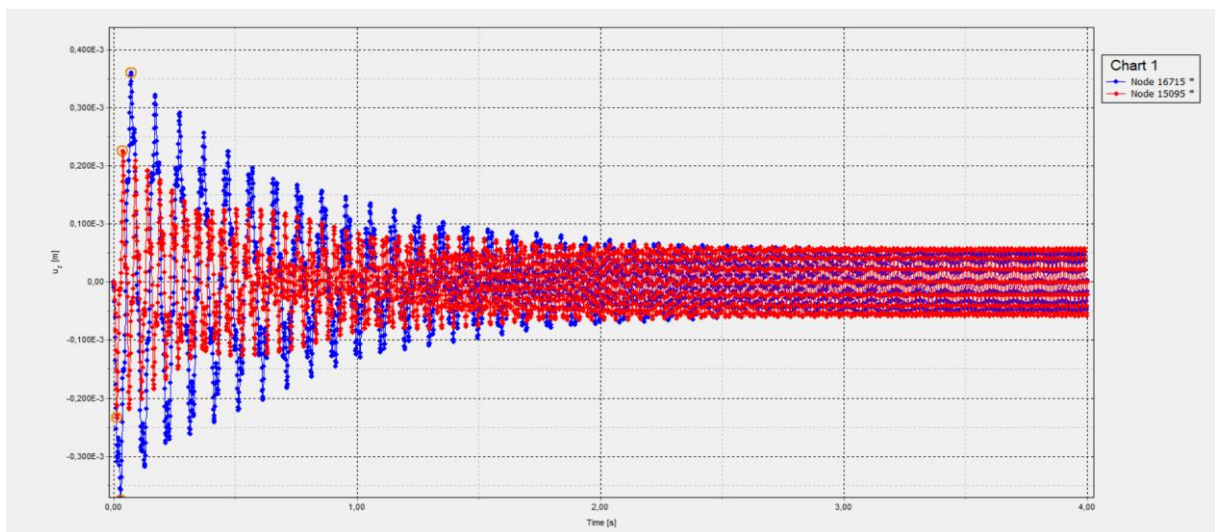




Εικόνα 6.2-6: Διάγραμμα για 40Hz με  $u_0=1,529 \cdot 10^{-4}$  και  $u_1=1,36 \cdot 10^{-4}$

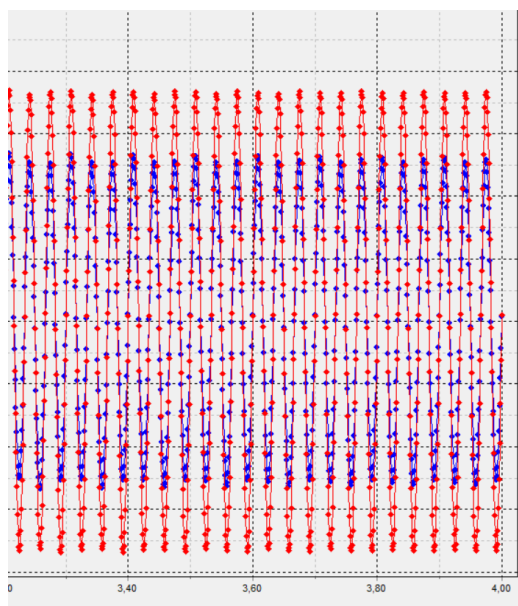


Εικόνα 6.2-7 : Διάγραμμα για 50Hz με  $u_0=8,85 \cdot 10^{-5}$  και  $u_1=8,45 \cdot 10^{-5}$

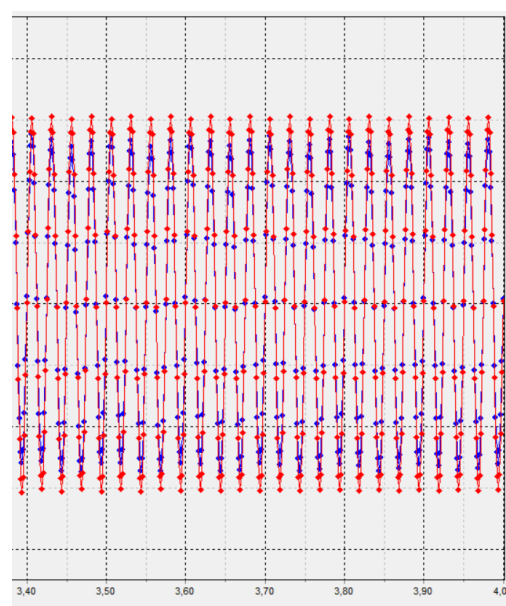


Εικόνα 6.2-8 : Διάγραμμα για 60Hz με  $u_0=5,80 \cdot 10^{-5}$  και  $u_1=5,15 \cdot 10^{-5}$

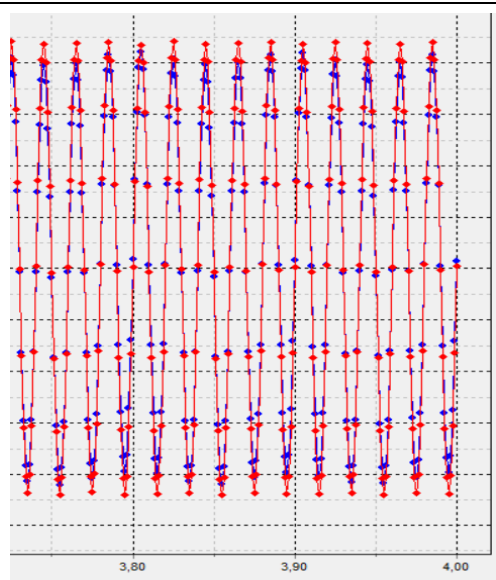
## Εφαρμογή Μεταλλικών στη Θεμελίωση Μηχανών Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας για Δυναμική Φόρτιση



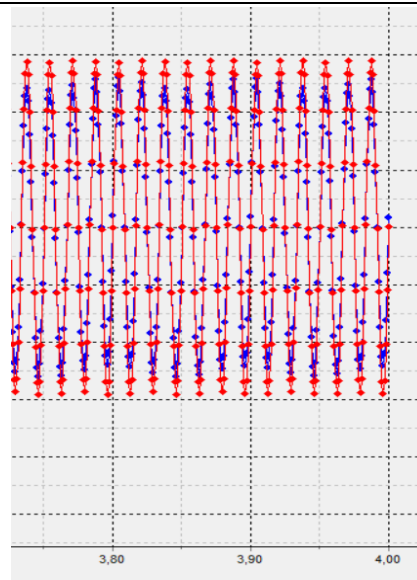
Εικόνα 6.2-9: Μεγέθυνση 30Hz



Εικόνα 6.2-10: Μεγέθυνση 40Hz



Εικόνα 6.2-11: Μεγέθυνση 50Hz



Εικόνα 6.2-12: Μεγέθυνση 60Hz

Παρατηρώντας τα παραπάνω διαγράμματα παρατηρούμε πως για τα 30,40,50 και 60Hz ο λόγος  $\gamma(\omega)$  είναι 0,71 , 0,88 , 0,95 και 0,88 αντίστοιχα. Σε αντίθεση με τα αντίστοιχα διαγράμματα με τις αναλυτικές εξισώσεις που ο λόγος κυμαίνονταν κάτω από 0,6, στο πρόγραμμα πεπερασμένων αυξάνεται κατά 0,2.

### 6.3. Μοντέλο 2

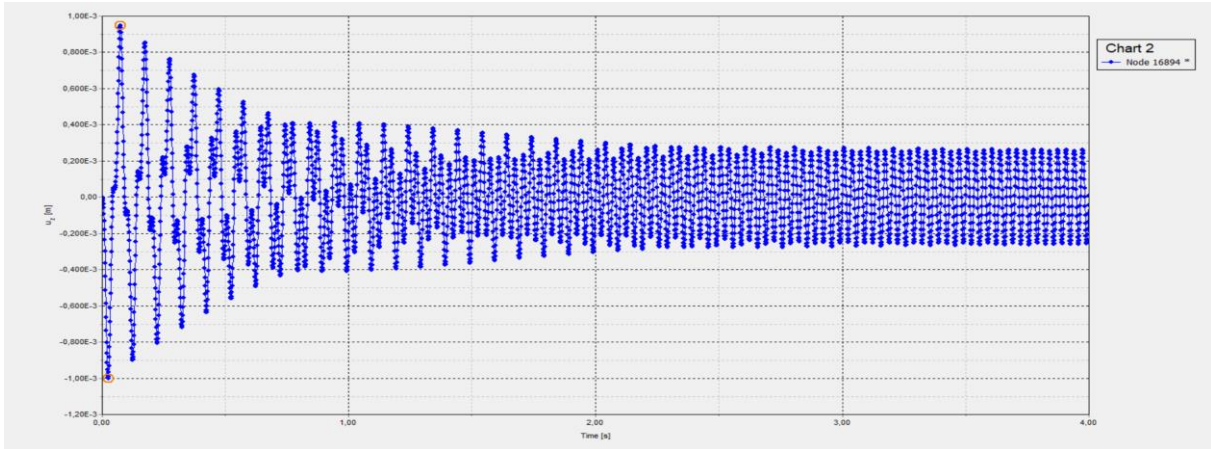
Ακολουθώντας την διαδικασία που περιγράφηκε , δημιουργούμε το μοντέλο 2. Το μοντέλο 2 βάση των αναλυτικών εξισώσεων αποτελείται από πλάκα σκυροδέματος πάχους  $H=0,2m$  με 7 οπές, πληρούμενες με χάλυβα διαμέτρου  $D=0,6m$ , περιελκόμενου με αφρολέξ πάχους  $t=0.01$  με μέτρο ελαστικότητας  $2500kPa$  και με ενδιάμεσες στρώσεις σιλομέρ μεταξύ των πλακών πάχους  $h=0,01m$  με μετρο ελαστικότητας  $E=1800kPa$ .

Για το πεπερασμένο μοντέλο μας έγινε η παραδοχή πως το μέτρο ελαστικότητας του ελαστομερούς-αφρολεξ είναι ίσο με το μέτρο ελαστικότητας επί την δυσκαμψία της μίας

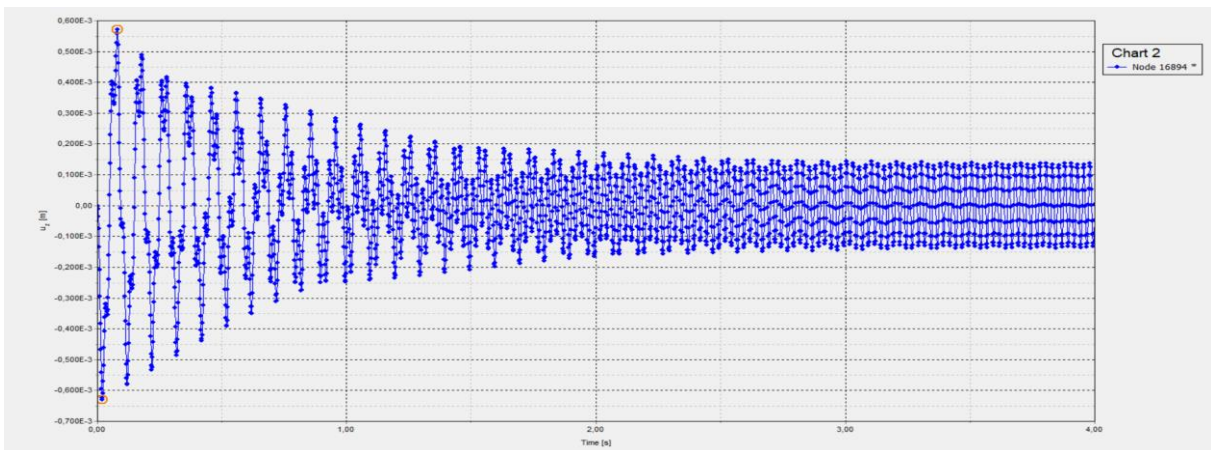


μονάδας του μοντέλου μας διαιρώντας το με την δυσκαμψία της μονάδας στο Plaxis, δηλαδή  $2500 \cdot 77327,55 / 212467 = 909,87$ .

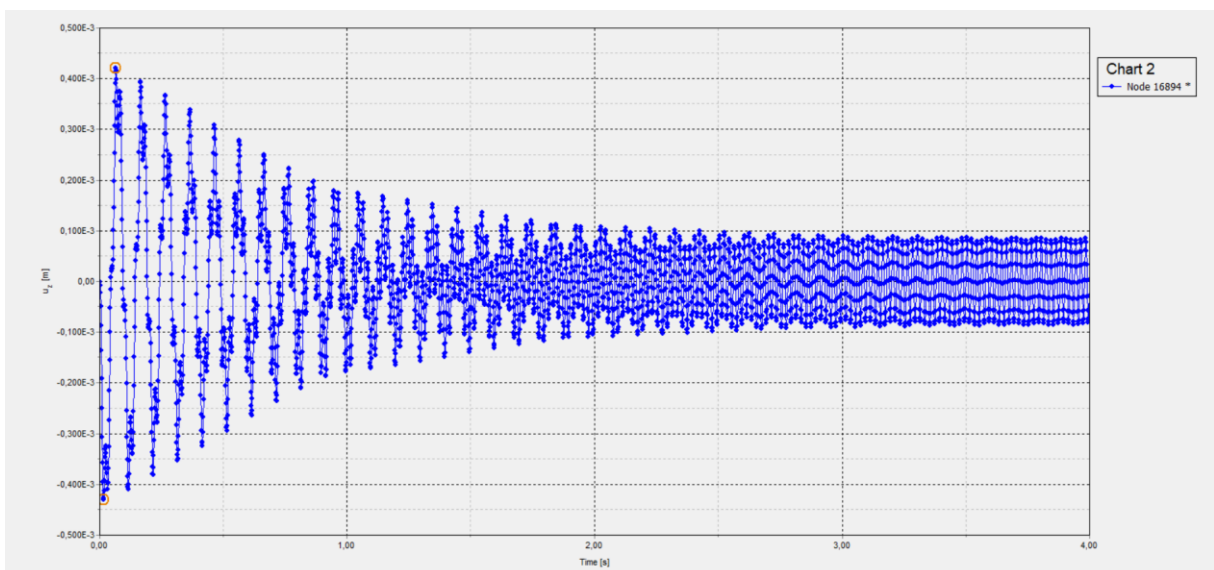
Παρακάτω παρατίθεται τα διαγράμματα μετατοπίσεων για 30,40,50 και 60Hz.



Εικόνα 6.3-3: Διάγραμμα μετατοπίσεων για 30Hz,  $u_2 = 2,58 \cdot 10^{-4}$

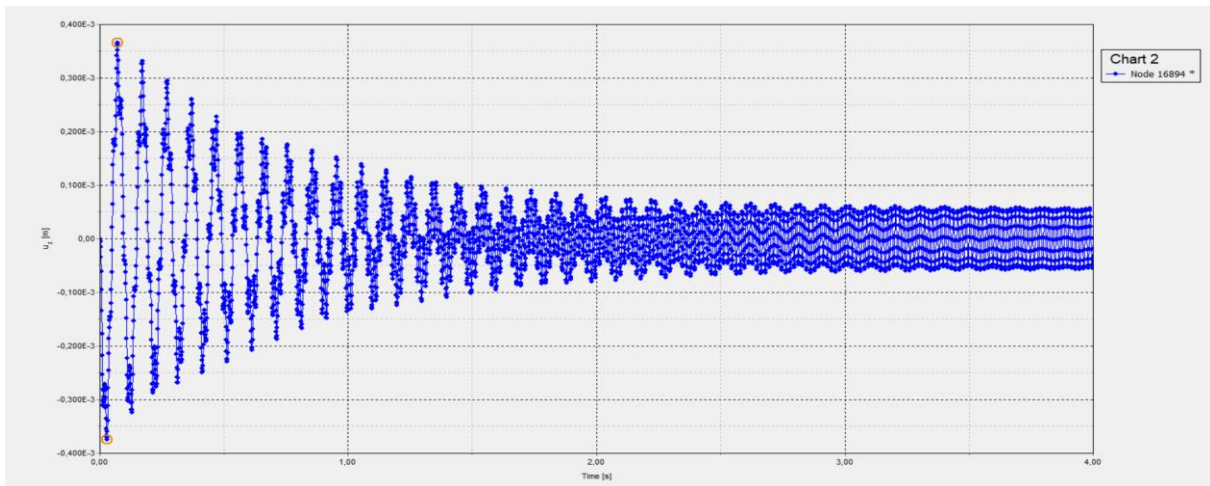


Εικόνα 6.3-2: Διάγραμμα μετατοπίσεων για 40Hz,  $u_2 = 1,37 \cdot 10^{-4}$



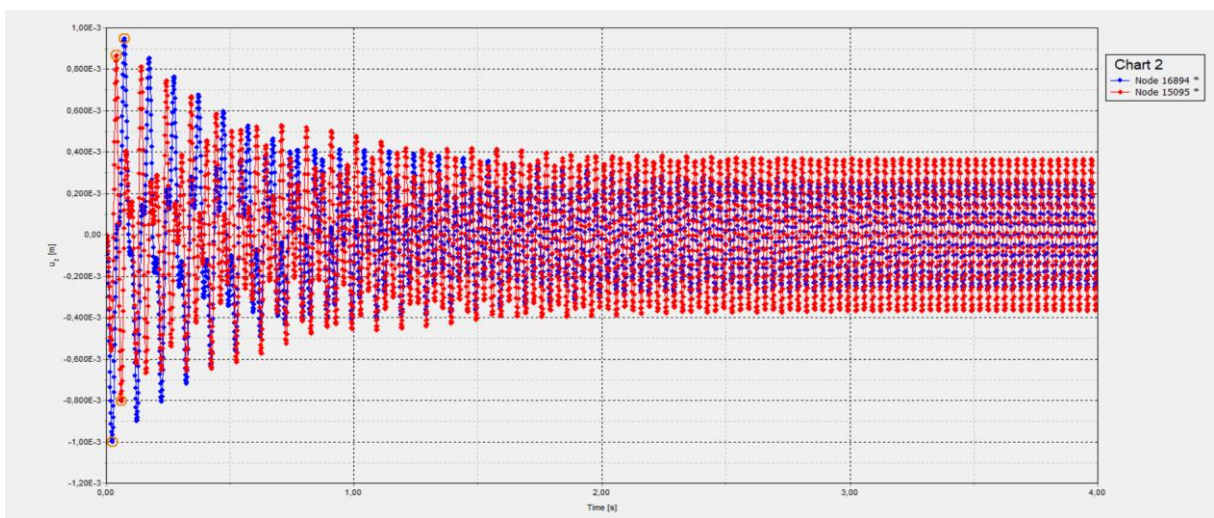
Εικόνα 6.3-1: Διάγραμμα μετατοπίσεων για 50Hz,  $u_2 = 8,50 \cdot 10^{-5}$

## Εφαρμογή Μεταυλικών στη Θεμελίωση Μηχανών Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας για Δυναμική Φόρτιση

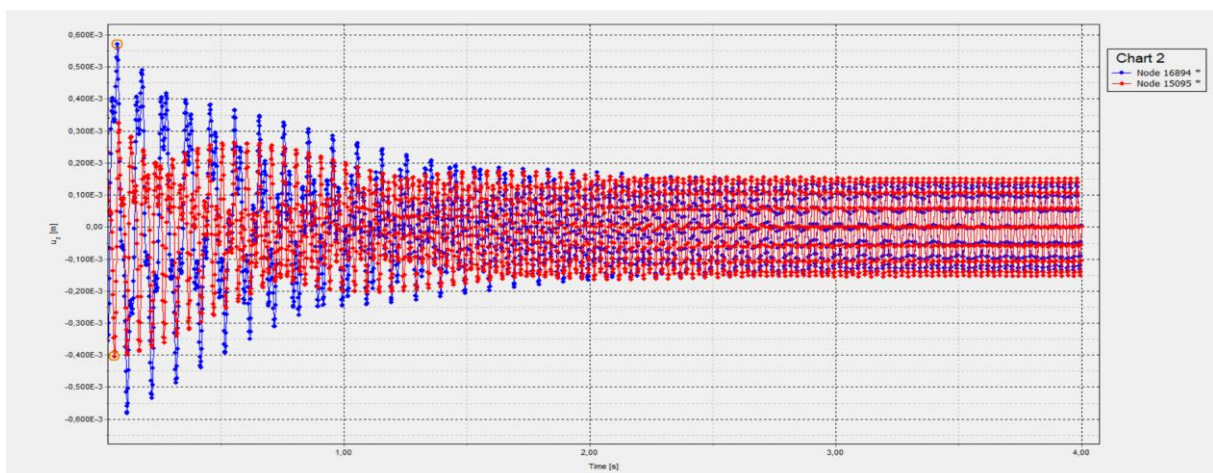


Εικόνα 6.3-4: Διάγραμμα μετατοπίσεων για 60Hz,  $u_2=5,68 \cdot 10^{-5}$

Στην συνέχεια έγινε σύγκριση αυτού με την αντίστοιχη απλή έδραση, σύμφωνα πάλι με τις αναλύσεις των πεπερασμένων στοιχείων, τοποθετώντας τα δύο διαγράμματα μαζί. (μπλε το μοντελο και κοκκινο η απλή βάση έδρασης).

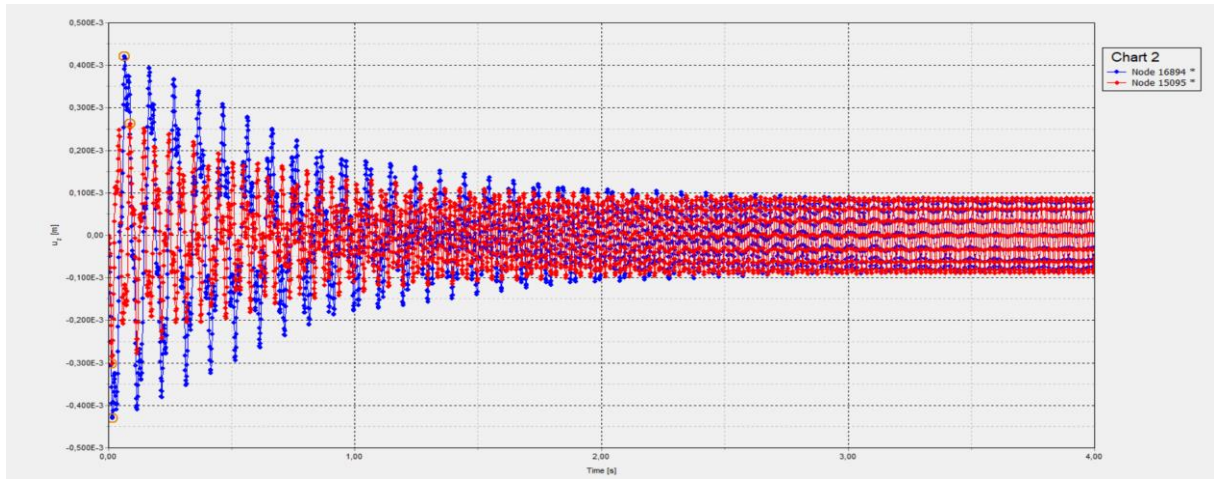


Εικόνα 6.3-5: Διάγραμμα για 30Hz με  $u_0=3,64 \cdot 10^{-4}$  και  $u_2=2,58 \cdot 10^{-4}$

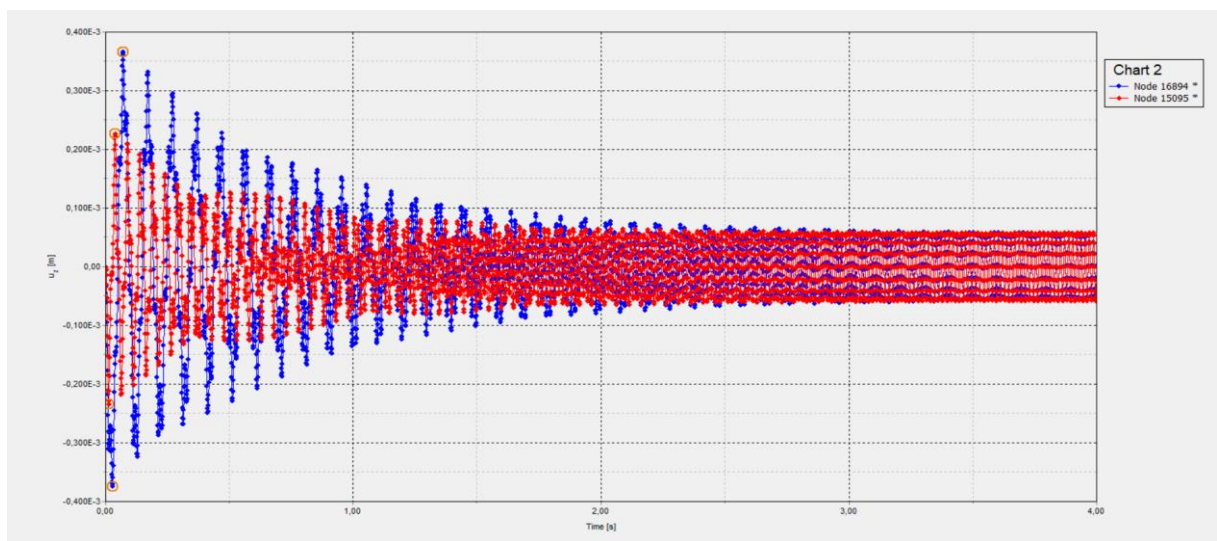


Εικόνα 6.3-6: Διάγραμμα για 40Hz με  $u_0=1,529 \cdot 10^{-4}$  και  $u_2=1,37 \cdot 10^{-4}$

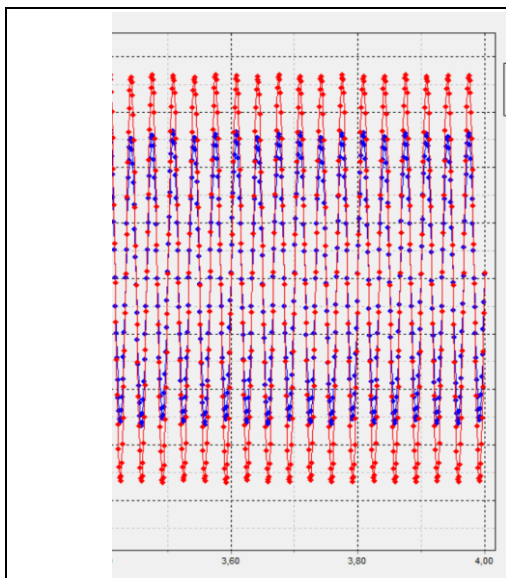




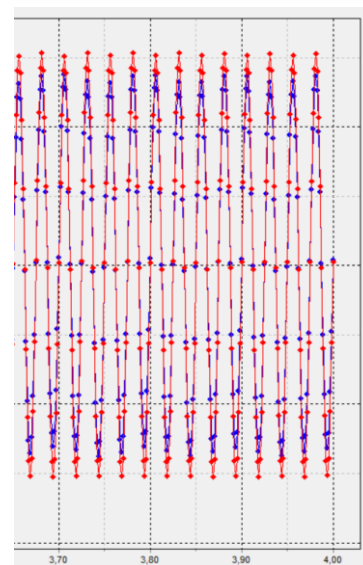
Εικόνα 6.3-7: Διάγραμμα για 50Hz με  $u_0=8,84 \cdot 10^{-5}$  και  $u_2=8,5 \cdot 10^{-5}$



Εικόνα 6.3-8: Διάγραμμα για 60Hz με  $u_0=5,80 \cdot 10^{-5}$  και  $u_2=5,68 \cdot 10^{-5}$

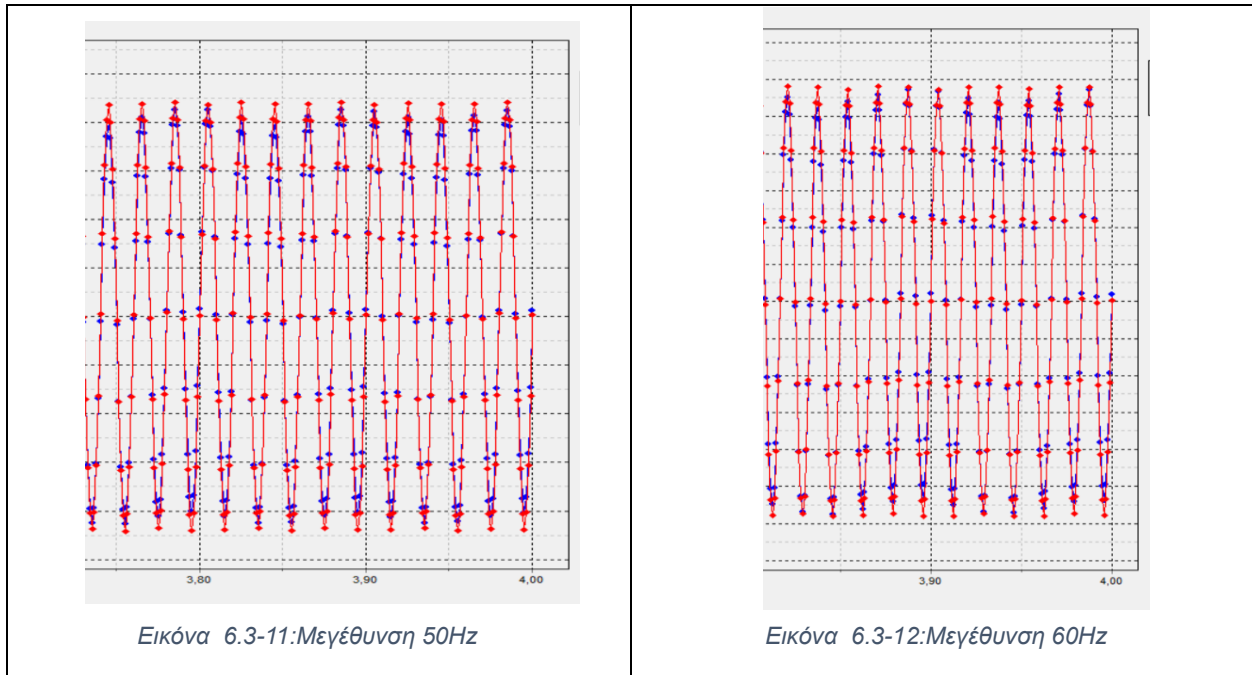


Εικόνα 6.3-9:Μεγέθυνση 30Hz



Εικόνα 6.3-10:Μεγέθυνση 40Hz

## Εφαρμογή Μεταλλικών στη Θεμελίωση Μηχανών Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας για Δυναμική Φόρτιση



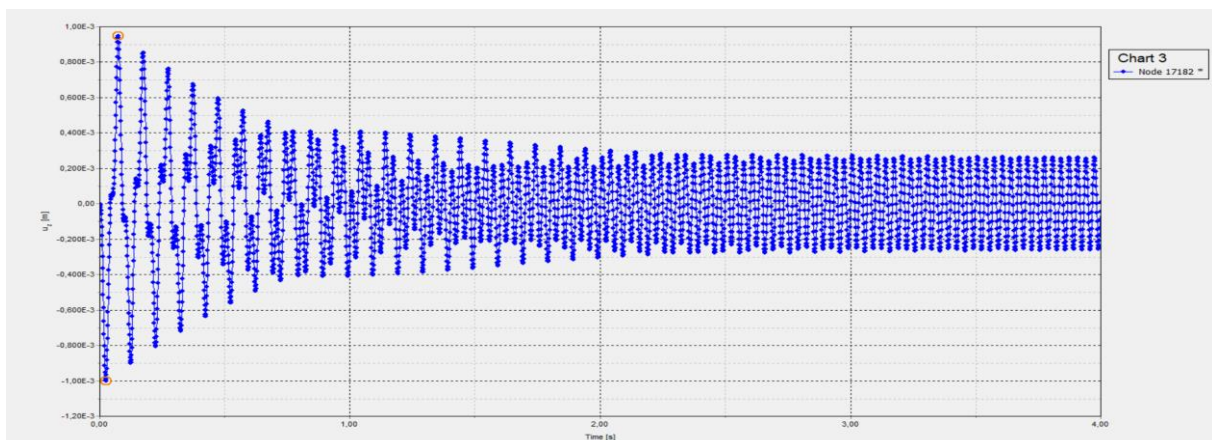
Σύμφωνα με τα παραπάνω διαγράμματα για τις συχνότητες 30,40,50 και 60Hz ο λόγος  $\gamma(\omega)$  είναι 0,70 , 0,90 , 0,96 και 0,98 αντίστοιχα. Συγκρίνοντας το μοντέλο 1 με το 2 , ενώ στα 30Hz υπάρχει παρόμοιος λόγος , στην αύξηση της συχνότητας υπάρχει κατακόρυφη αύξηση του λόγου.

### 6.4. Μοντέλο 3

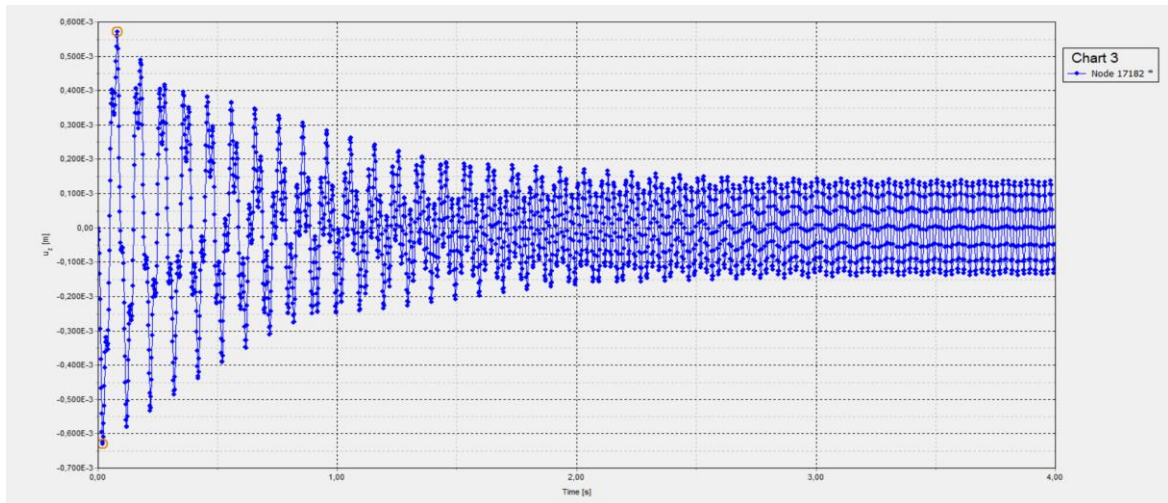
Ακολουθώντας την διαδικασία που περιγράφηκε , δημιουργούμε το μοντέλο 3. Το μοντέλο 3 βάση των αναλυτικών εξισώσεων αποτελείται από πλάκα σκυροδέματος πάχους  $H=0,2m$  με 14 οπές, πληρούμενες με χάλυβα διαμέτρου  $D=0,3m$ , περιελκόμενου με αφρολέξ πάχους  $t=0.01$  με μέτρο ελαστικότητας  $2500kPa$  και με ενδιάμεσες στρώσεις σιλομέρ μεταξύ των πλακών πάχους  $h=0,01m$  με μετρο ελαστικότητας  $E=1800kPa$ .

Για το πεπερασμένο μοντέλο μας έγινε η παραδοχή πως το μέτρο ελαστικότητας του ελαστομερούς-αφρολεξ είναι ίσο με το μέτρο ελαστικότητας επί την δυσκαμψία της μίας μονάδας του μοντέλου μας διαιρώντας το με την δυσκαμψία της μονάδας στο Plaxis, δηλαδή  $2500*21950,07/212467=259$ .

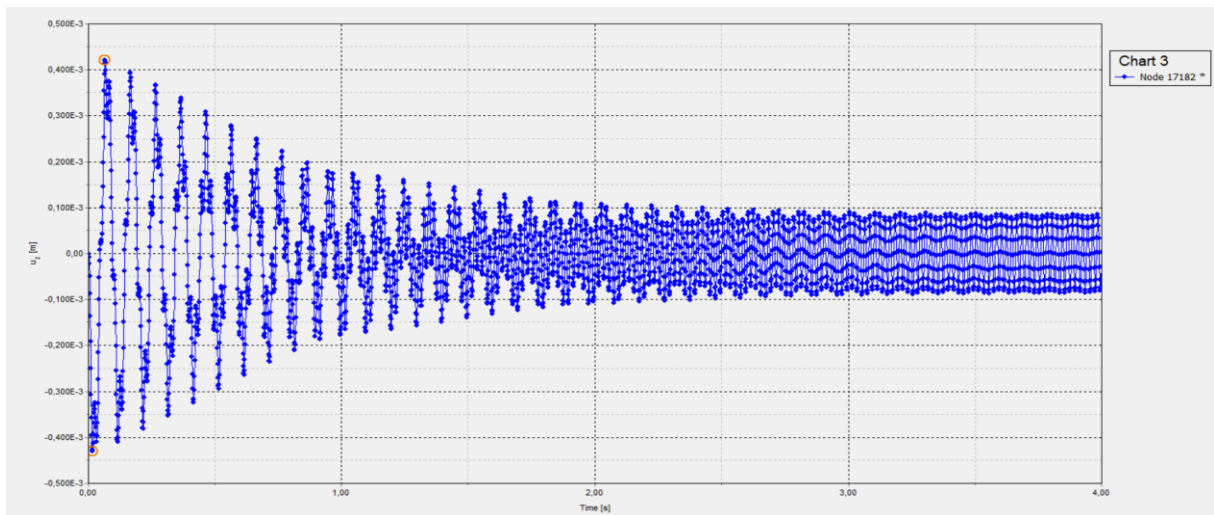
Παρακάτω παρατίθεται το διάγραμμα μετατοπίσεων



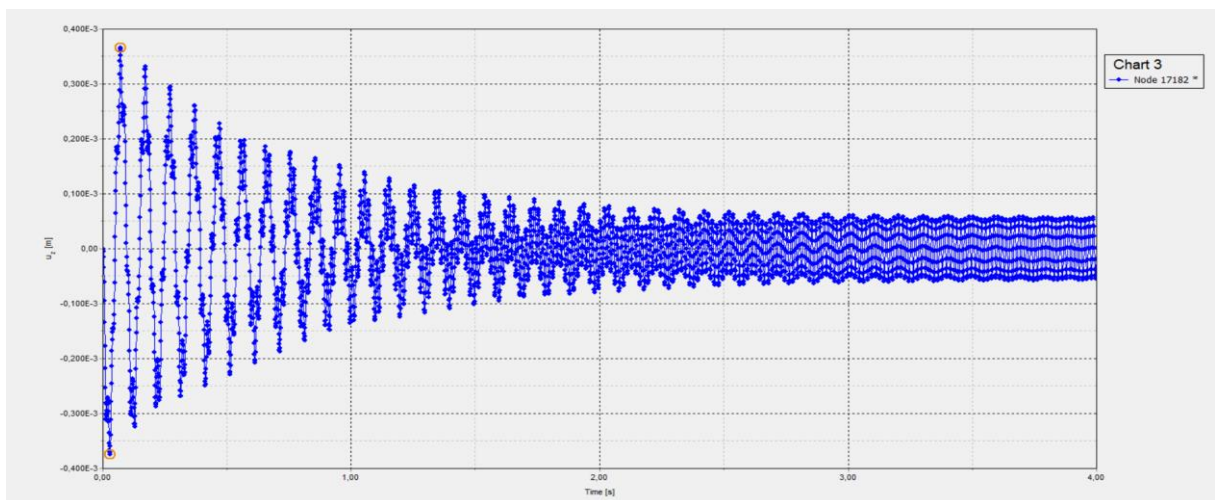
Εικόνα 6.4-1:Διάγραμμα μετατοπίσεων για 30Hz,  $u_3=2,57*10^{-4}$



Εικόνα 6.4-2: Διάγραμμα μετατοπίσεων για 40Hz,  $u_3=1,36 \cdot 10^{-4}$



Εικόνα 6.4-3: Διάγραμμα μετατοπίσεων για 50Hz,  $u_3=8,50 \cdot 10^{-5}$

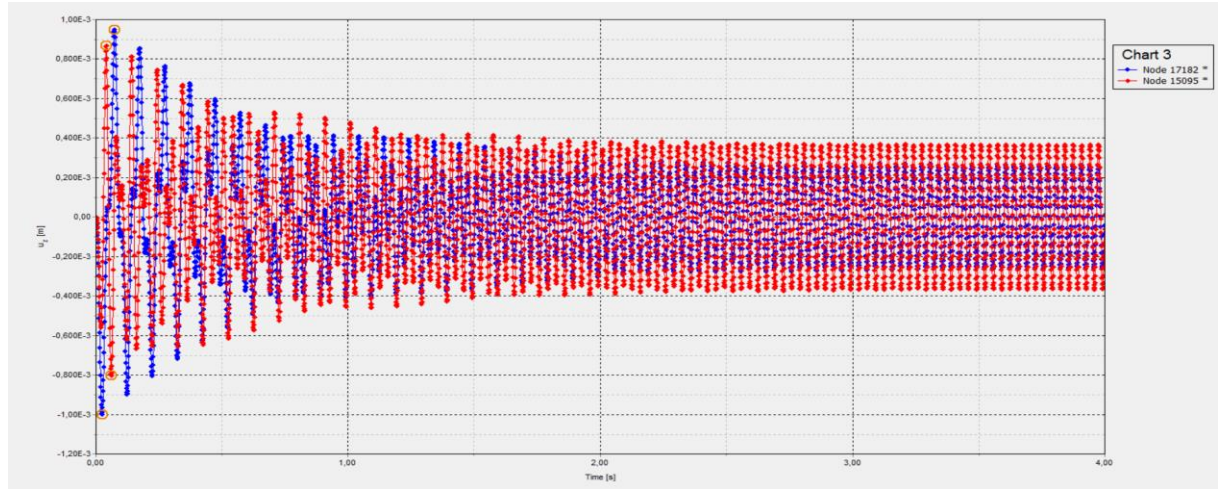


Εικόνα 6.4-4: Διάγραμμα μετατοπίσεων για 60Hz,  $u_3=5,68 \cdot 10^{-5}$

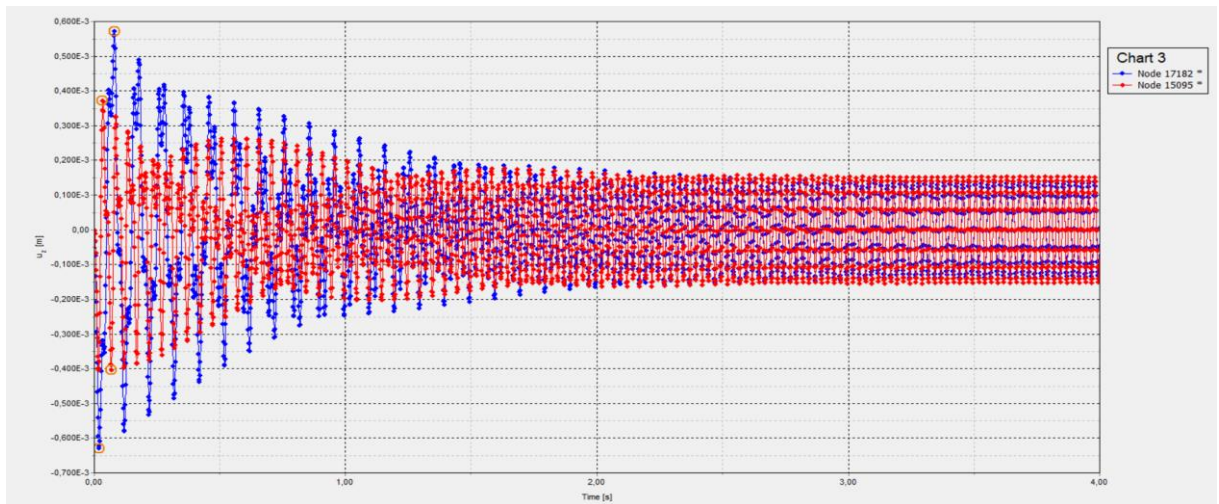


## Εφαρμογή Μεταλλικών στη Θεμελίωση Μηχανών Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας για Δυναμική Φόρτιση

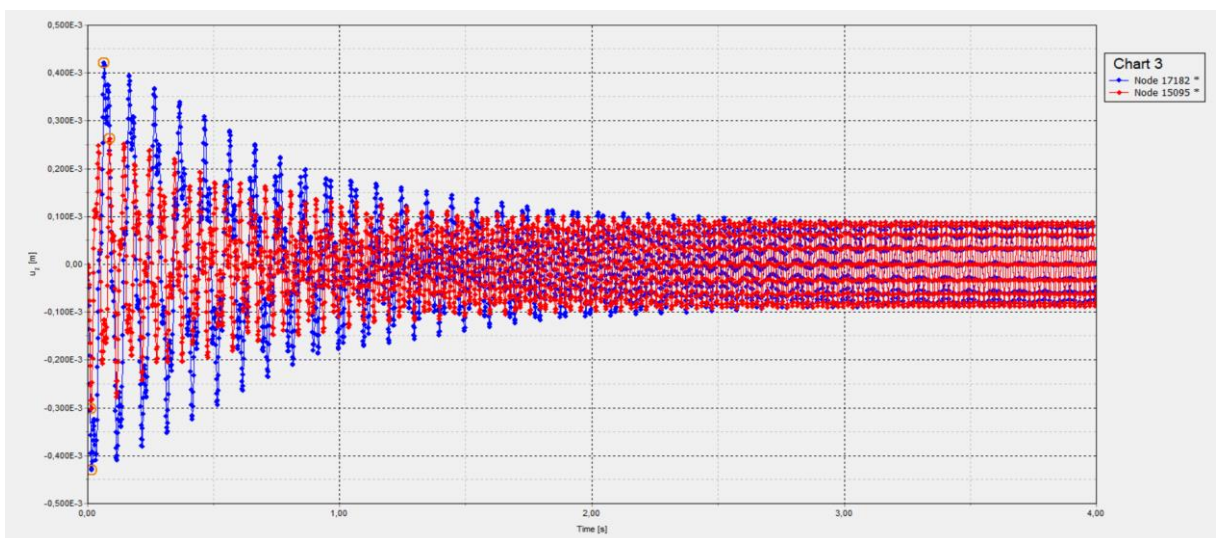
Στην συνέχεια έγινε σύγκριση αυτού με την αντίστοιχη απλή έδραση , σύμφωνα πάλι με τις αναλύσεις των πεπερασμένων στοιχείων, τοποθετώντας τα δύο διαγράμματα μαζί.(μπλε το μοντελο και κοκκινο η απλή βάση έδρασης).



Εικόνα 6.4-5: Διάγραμμα για 30Hz με  $u_0=3,64*10^{-4}$  και  $u_3=2,57*10^{-4}$

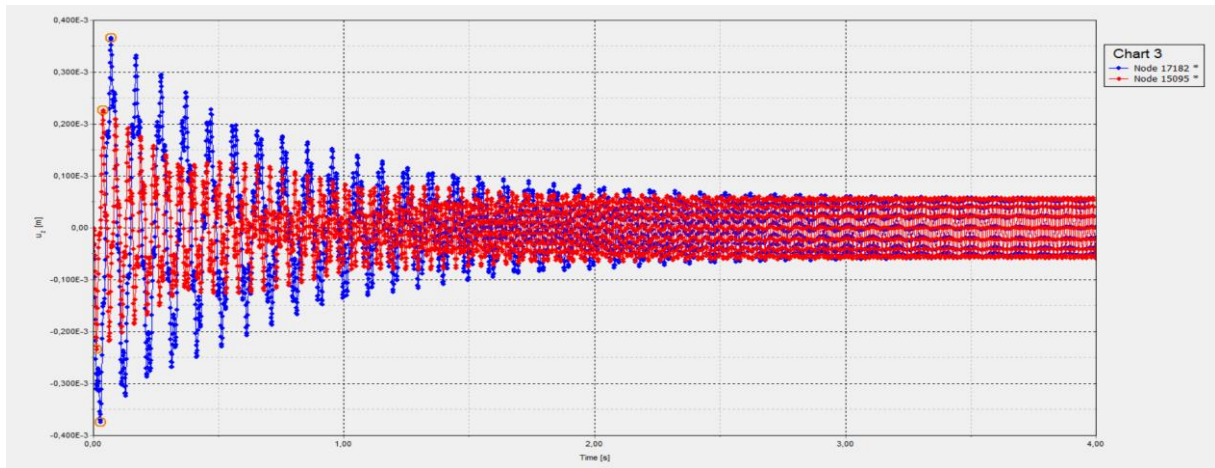


Εικόνα 6.4-6: Διάγραμμα για 40Hz με  $u_0=1,529*10^{-4}$  και  $u_3=1,36*10^{-4}$

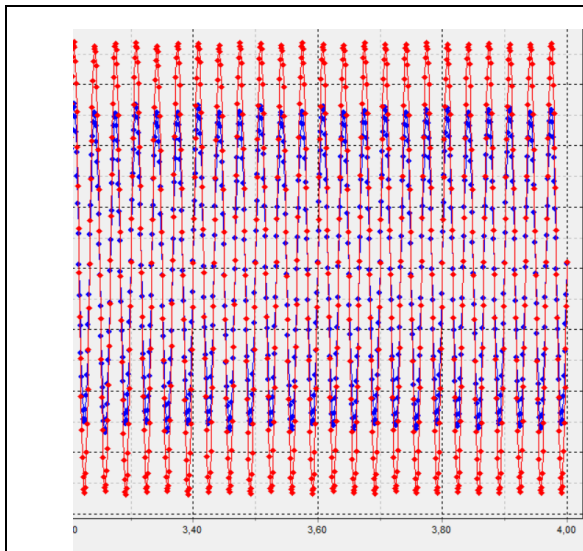


Εικόνα 6.4-7: Διάγραμμα για 50Hz με  $u_0=8,85*10^{-5}$  και  $u_3=8,50*10^{-5}$

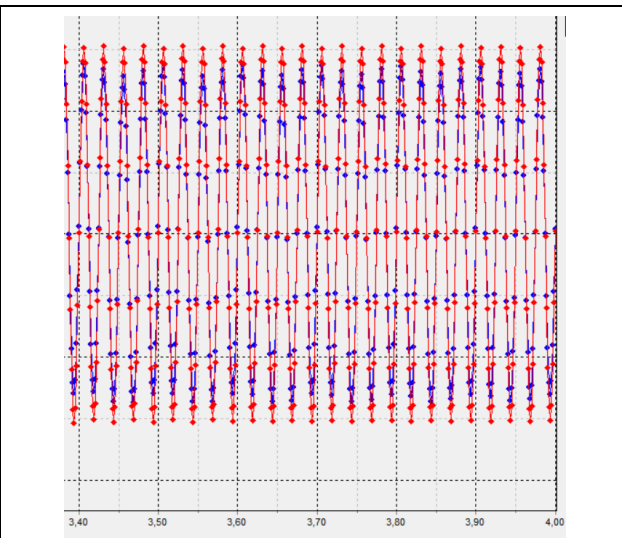




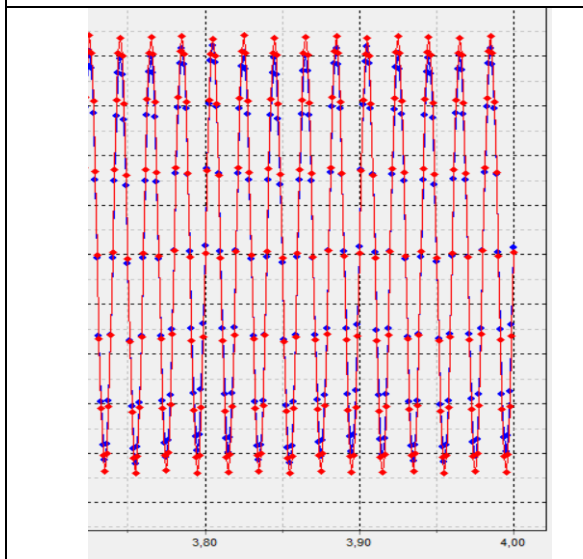
Εικόνα 6.4-8: Διάγραμμα για 60Hz με  $u_0=5,80 \cdot 10^{-5}$  και  $u_3=5,68 \cdot 10^{-5}$



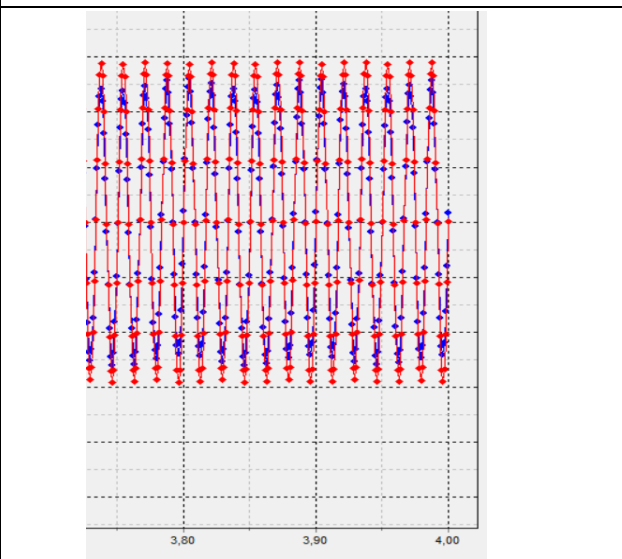
Εικόνα 6.4-9: Μεγέθυνση 30Hz



Εικόνα 6.4-10: Μεγέθυνση 40Hz



Εικόνα 6.4-11: Μεγέθυνση 50Hz



Εικόνα 6.4-12: Μεγέθυνση 60Hz

## Εφαρμογή Μεταλλικών στη Θεμελίωση Μηχανών Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας για Δυναμική Φόρτιση

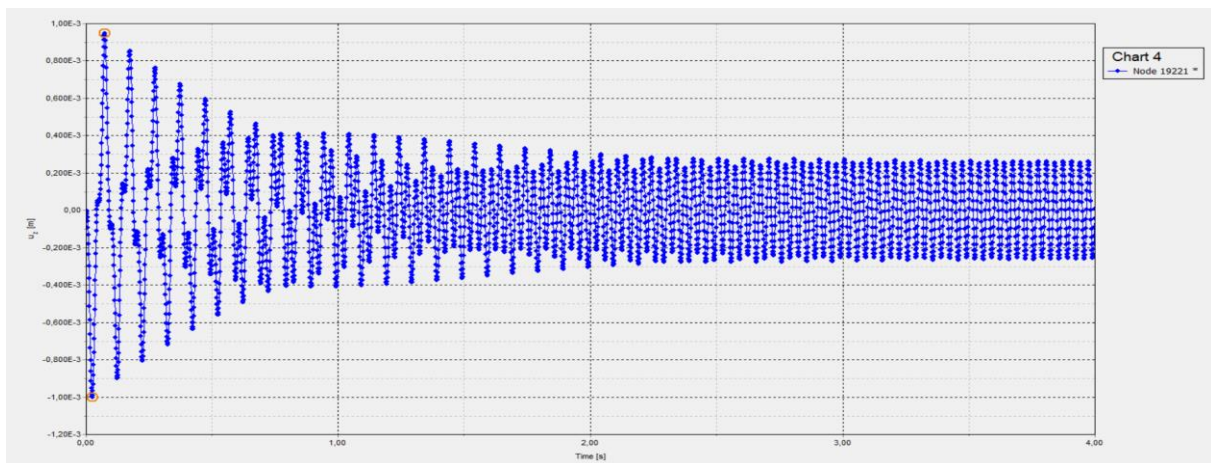
Σύμφωνα με τα παραπάνω διαγράμματα για τις συχνότητες 30,40,50 και 60Hz ο λόγος  $\gamma(\omega)$  είναι 0,70 , 0,90 , 0,96 και 0,98 αντίστοιχα. Συγκρίνοντας το μοντέλο 1 με το 3 , ενώ στα 30Hz υπάρχει παρόμοιος λόγος , στην αύξηση της συχνότητας υπάρχει κατακόρυφη αύξηση του λόγου. Τέλος τα αποτελέσματα του μοντέλου 3 είναι παρόμοια με αυτά του μοντέλου 2, αυτό συμβαίνει διότι η επιφάνεια του χάλυβα είναι ίδια.

### 6.5. Μοντέλο 4

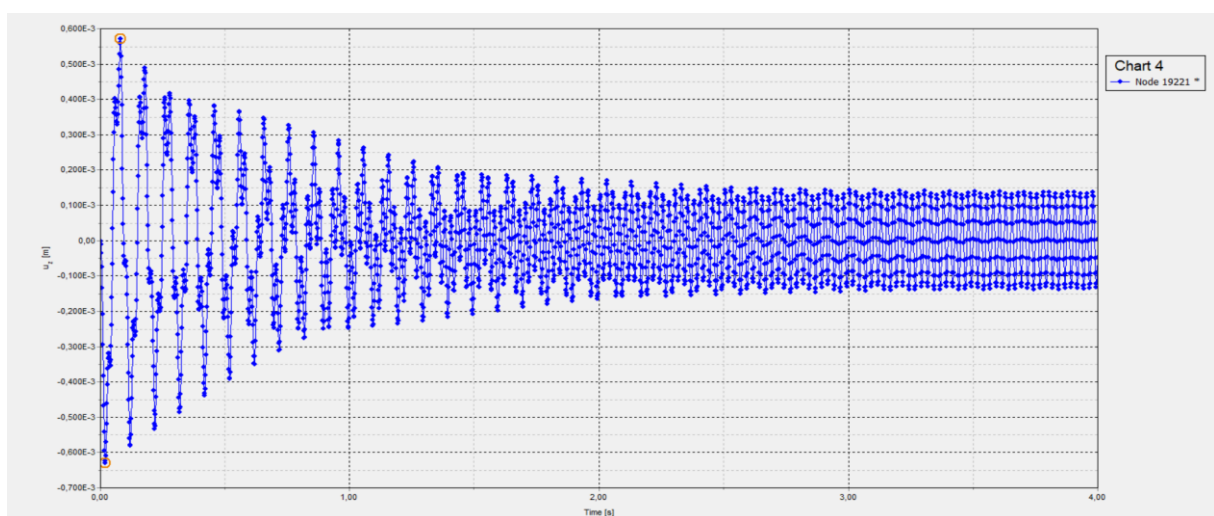
Ακολουθώντας την διαδικασία που περιγράφηκε , δημιουργούμε το μοντέλο 3. Το μοντέλο 3 βάση των αναλυτικών εξισώσεων αποτελείται από πλάκα σκυροδέματος πάχους  $H=0,2\text{m}$  με 7 οπές, πληρούμενες με χάλυβα διαμέτρου  $D=0,3\text{m}$ , περιελκόμενου με αφρολέξ πάχους  $t=0.01$  με μέτρο ελαστικότητας  $2500\text{kPa}$  και με ενδιάμεσες στρώσεις σιλομέρ μεταξύ των πλακών πάχους  $h=0,01\text{m}$  με μετρο ελαστικότητας  $E=1800\text{kPa}$ .

Για το πεπερασμένο μοντέλο μας έγινε η παραδοχή πως το μέτρο ελαστικότητας του ελαστομερούς-αφρολεξ είναι ίσο με το μέτρο ελαστικότητας επί την δυσκαμψία της μίας μονάδας του μοντέλου μας διαιρώντας το με την δυσκαμψία της μονάδας στο Plaxis, δηλαδή  $2500 \cdot 21950,07/212467=259$ .

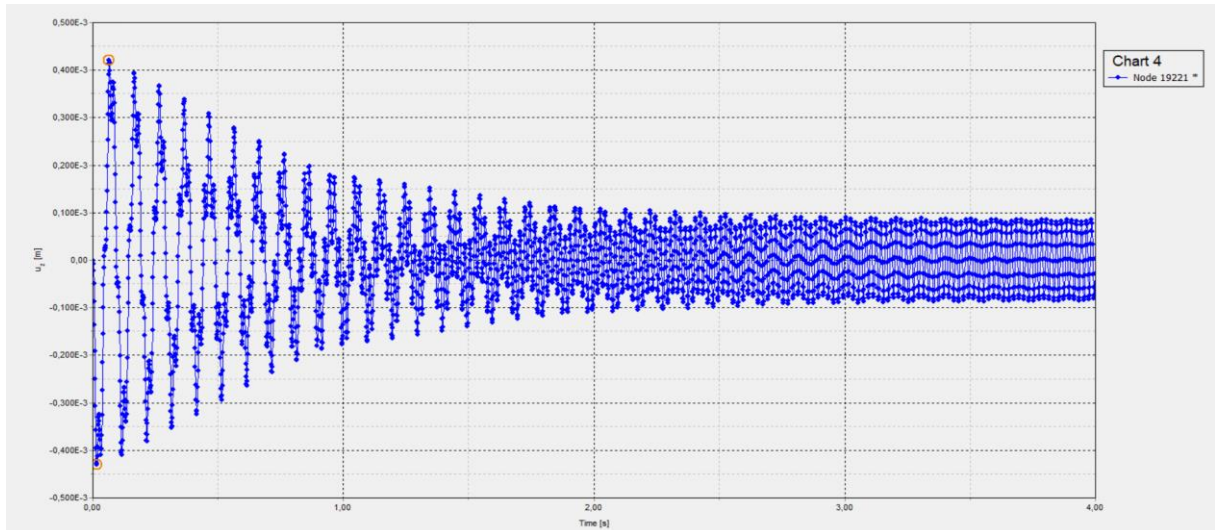
Παρακάτω παρατίθεται το διάγραμμα μετατοπίσεων



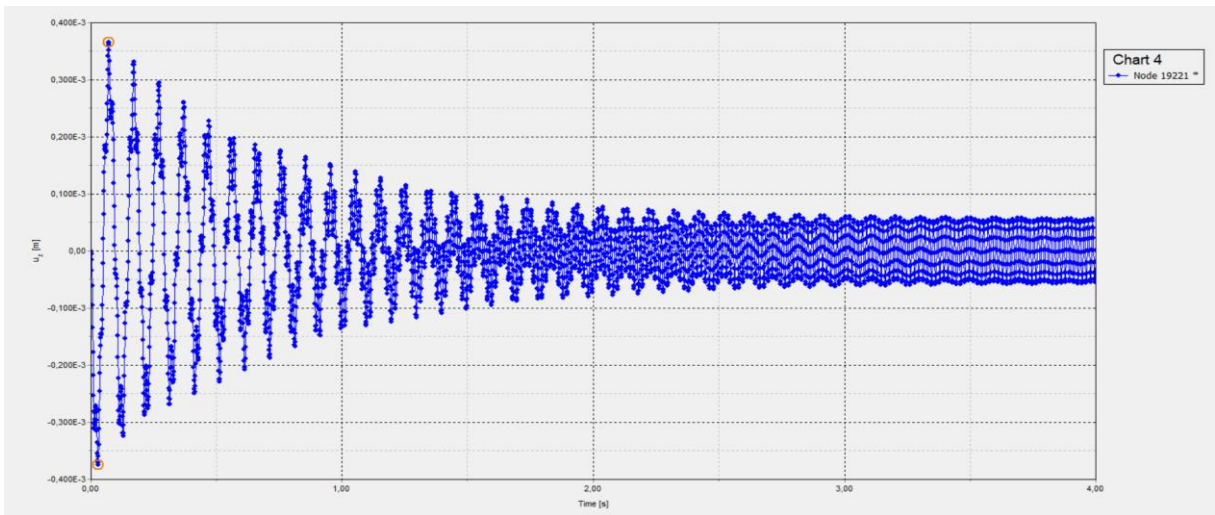
Εικόνα 6.5-1: Διάγραμμα μετατοπίσεων για 30Hz,  $u_4=2,57 \cdot 10^{-4}$



Εικόνα 6.5-2: Διάγραμμα μετατοπίσεων για 40Hz,  $u_4=1,36 \cdot 10^{-4}$



Εικόνα 6.5-3: Διάγραμμα μετατοπίσεων για 50Hz,  $u_4=8,50 \cdot 10^{-5}$

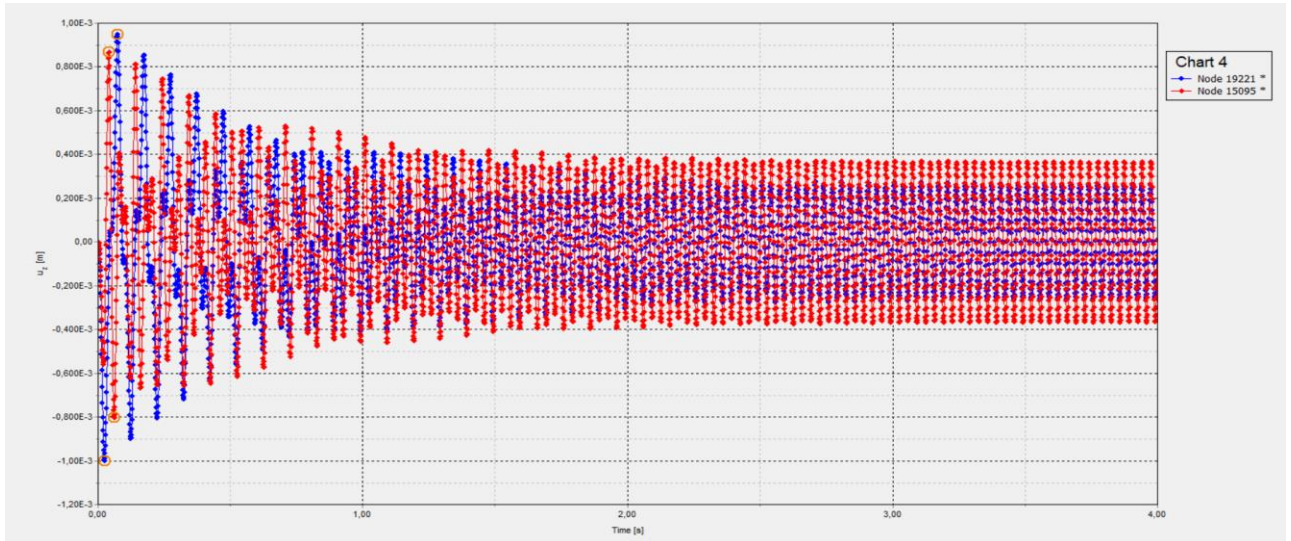


Εικόνα 6.5-4: Διάγραμμα μετατοπίσεων για 60Hz,  $u_4=5,68 \cdot 10^{-5}$

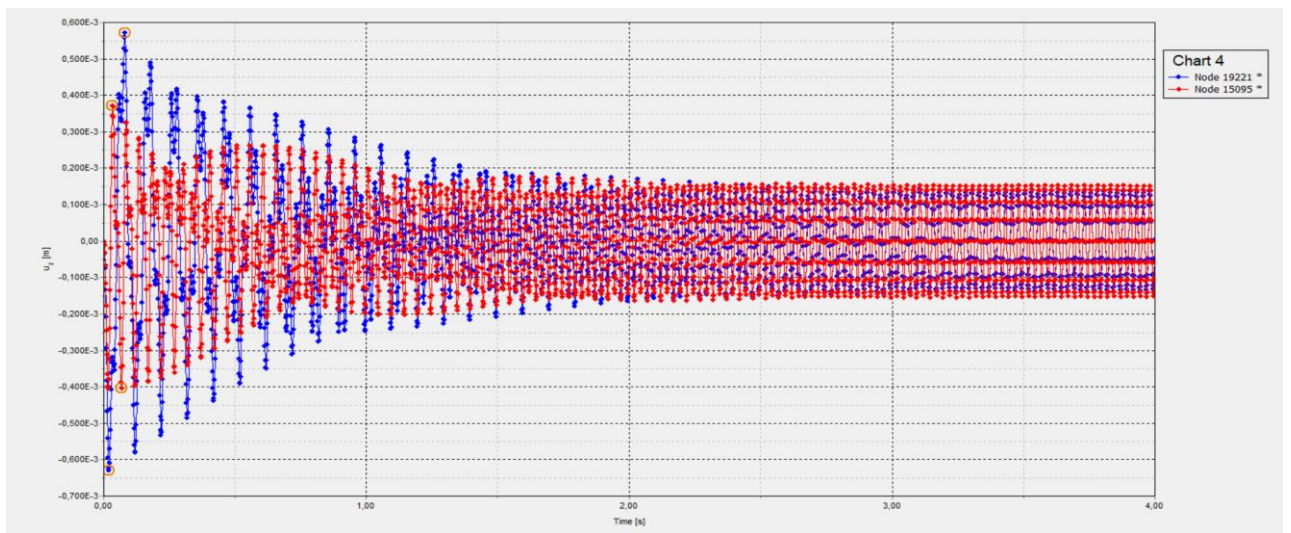
Στην συνέχεια έγινε σύγκριση αυτού με την αντίστοιχη απλή έδραση, σύμφωνα πάλι με τις αναλύσεις των πεπερασμένων στοιχείων, τοποθετώντας τα δύο διαγράμματα μαζί. (μπλε το μοντελο και κοκκινο η απλή βάση έδρασης).



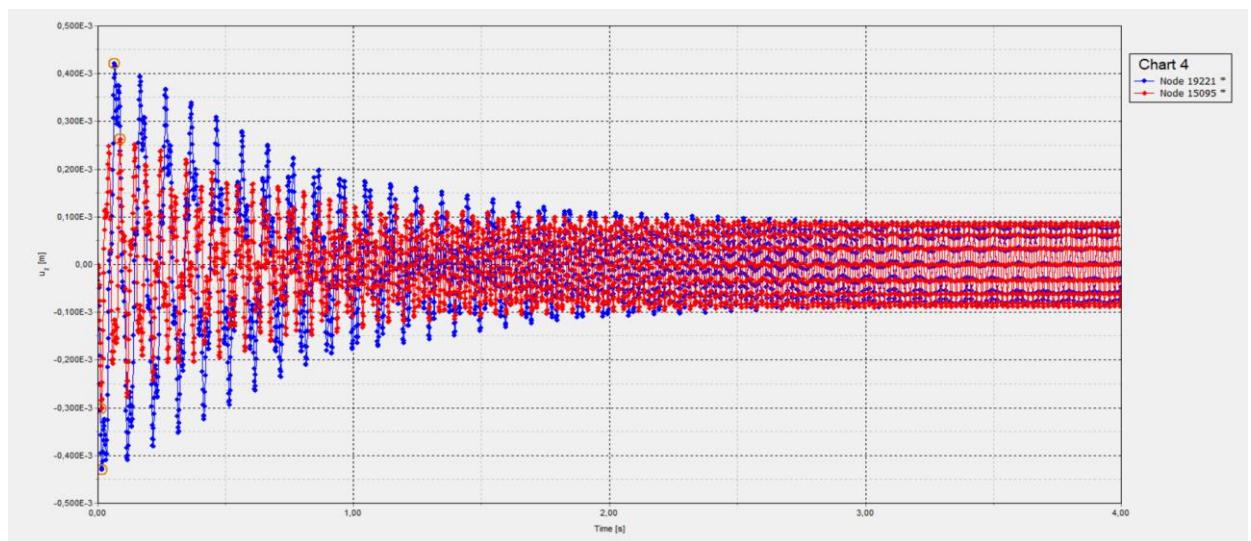
# Εφαρμογή Μεταλλικών στη Θεμελίωση Μηχανών Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας για Δυναμική Φόρτιση



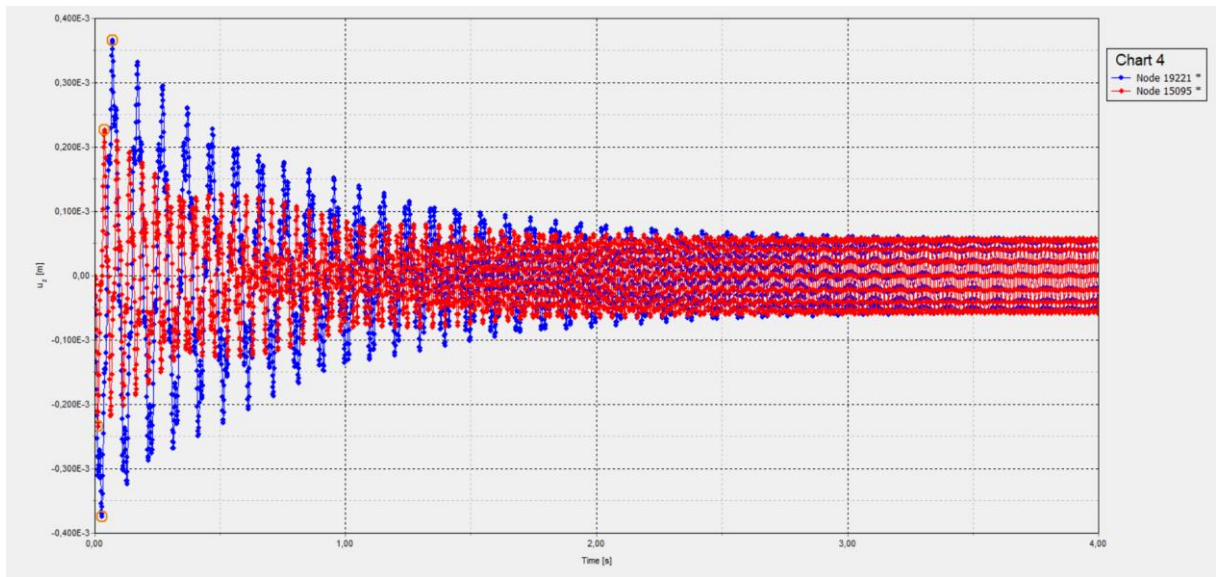
Εικόνα 6.5-5: Διάγραμμα για 30Hz με  $u_0=3,64 \cdot 10^{-4}$  και  $u_4=2,57 \cdot 10^{-4}$



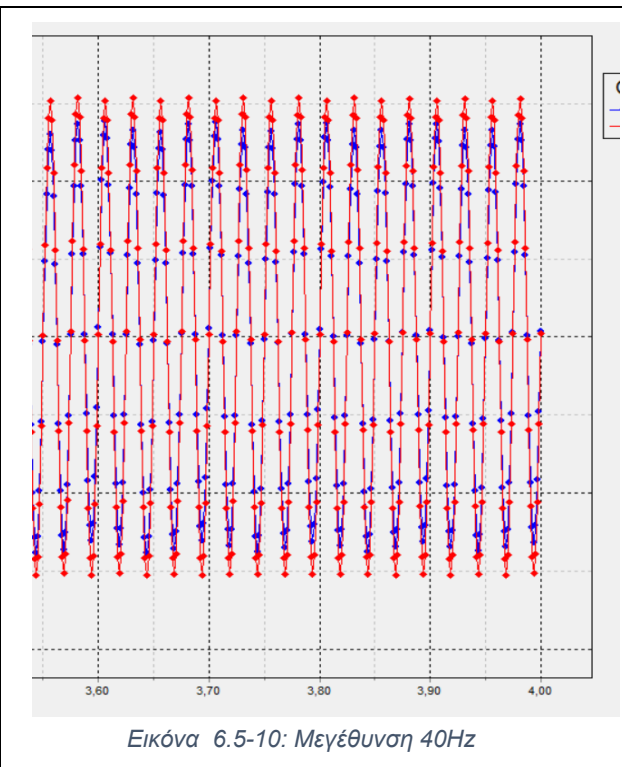
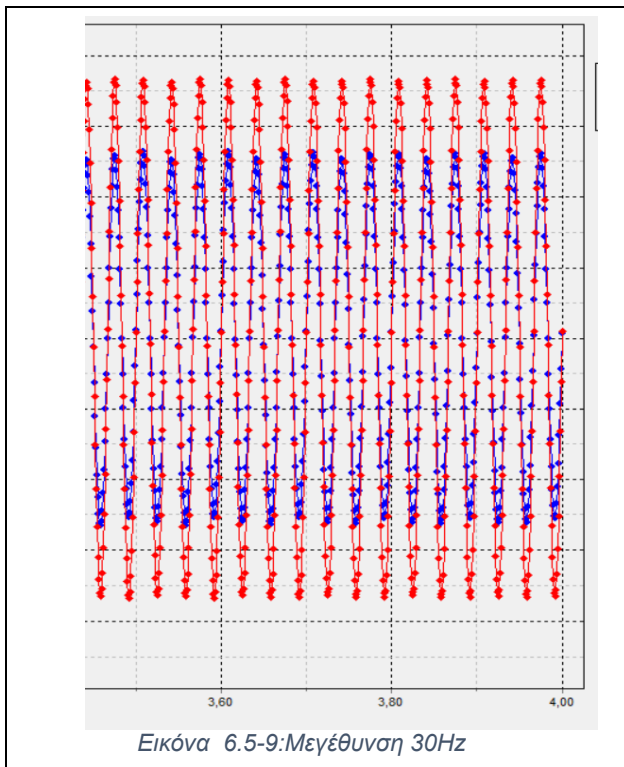
Εικόνα 6.5-6: Διάγραμμα για 40Hz με  $u_0=1,529 \cdot 10^{-4}$  και  $u_4=1,36 \cdot 10^{-4}$



Εικόνα 6.5-7: Διάγραμμα για 50Hz με  $u_0=8,85 \cdot 10^{-5}$  και  $u_4=8,50 \cdot 10^{-5}$



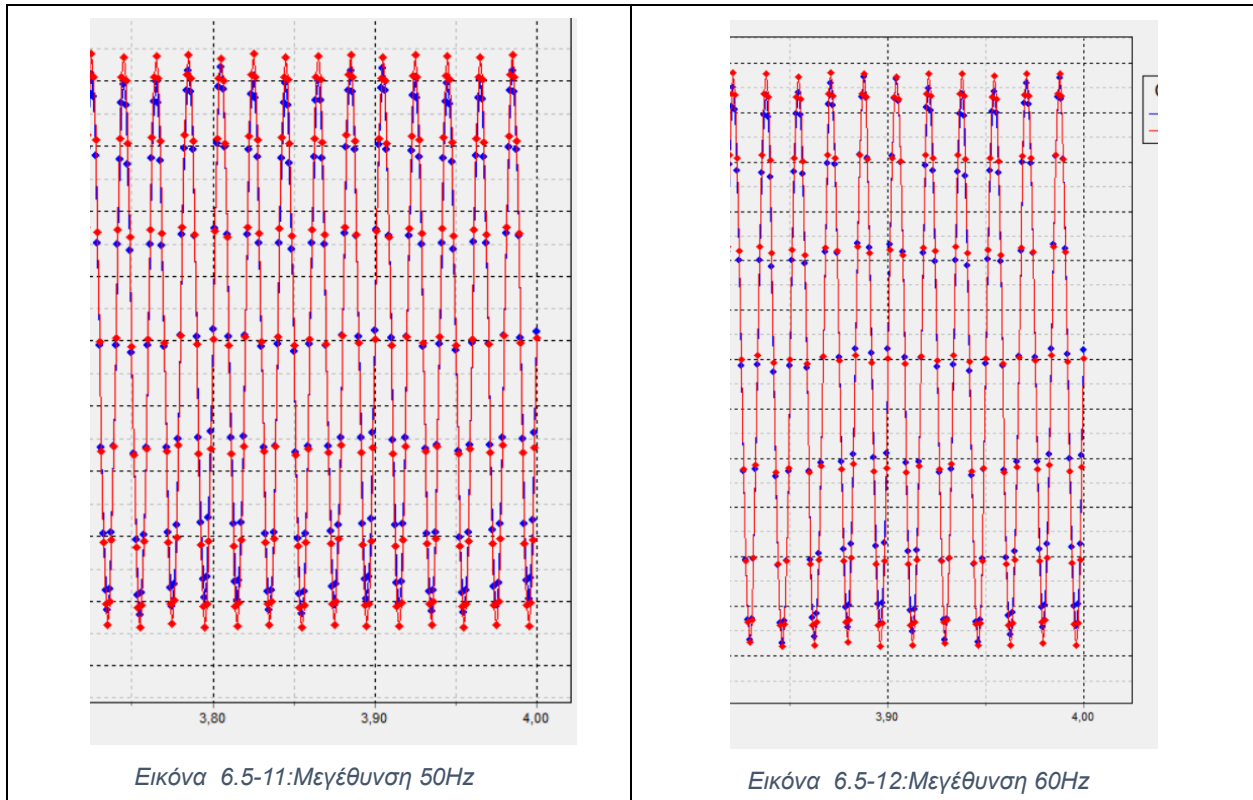
Εικόνα 6.5-8: Διάγραμμα για 60Hz με  $u_0=5,80 \cdot 10^{-5}$  και  $u_4=5,68 \cdot 10^{-5}$



Εικόνα 6.5-9: Μεγέθυνση 30Hz

Εικόνα 6.5-10: Μεγέθυνση 40Hz

## Εφαρμογή Μεταλλικών στη Θεμελίωση Μηχανών Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας για Δυναμική Φόρτιση



Στην Εικόνα 4.5-3 βλέπουμε το διάγραμμα του λόγου  $Y(\omega)$  για τιμές κάτω τις μονάδας ενώ στην Εικόνα 4.5-4 για τιμές πάνω από την μονάδα για διέγερση συχνότητας 40Hz.

Σύμφωνα με τα παραπάνω διαγράμματα για τις συχνότητες 30,40,50 και 60Hz ο λόγος  $Y(\omega)$  είναι 0,70 , 0,90 , 0,96 και 0,98 αντίστοιχα. Συγκρίνοντας όλα τα μοντέλα μεταξύ τους δεν παρατηρούμε μεγάλες αποκλίσεις μεταξύ τους και η συμπεριφορά τους είναι παρόμοια αν όχι ίδια.

Παρατηρούμε ότι και προηγουμένως, δεν υπάρχει αξιοσημείωτη αλλαγή.

## 7. Συμπεράσματα

Συνοψίζοντας, εφαρμόσαμε την έννοια των μηχανικών μεταυλικών στον τομέα της προστασίας μηχανών ηλεκτρικής παραγωγής ενέργειας και αποδείξαμε τη σκοπιμότητά τους για την εξασθένιση των κυμάτων υψηλής συχνότητας σε όγκο, πλάκα και επιφάνεια. Τα προτεινόμενα συστήματα, σε αντίθεση με τις παραδοσιακές στρατηγικές απομόνωσης δομικών θεμελίων, οι οποίες προκαλούν μετατόπιση της θεμελιώδους συχνότητας δόνησης των κατασκευών, μειώνουν την ενέργεια των μηχανικών κυμάτων μέσω μηχανισμών εξασθένησης κενών (Bandgap) και εμποδίζουν την άφιξή της στον προστατευόμενο χώρο. Αν και η ιδέα αυτή έχει ήδη προταθεί σε περιορισμένο αριθμό πρόσφατων εργασιών, η παρούσα εργασία αποτελεί μία ρεαλιστική και ολοκληρωμένη μελέτη επί του θέματος, δεδομένου ότι η μελέτη πραγματοποιείται με τρισδιάστατες προσομοιώσεις, λαμβάνει υπόψη τη δομή του μοντέλου και βασίζεται σε δομές τοπικού συντονισμού. Έχουν διερευνηθεί διάφορες σχεδιαστικές διαμορφώσεις, οι οποίες βασίζονται τόσο σε εγκάρσιες κοιλότητες όσο και σε κυλινδρικά εγκλείσματα, και όλες εμφανίζουν δυνατότητες θωράκισης στη περιοχή συχνοτήτων ενδιαφέροντος μεταξύ 30 με 60 Hz. Όλες οι γεωμετρίες που αναλύθηκαν μπορούν να κατασκευαστούν σχετικά εύκολα και φθηνά με την τρέχουσα τεχνολογική κατάσταση.

Η παρούσα έρευνα δείχνει πως μπορούν να χρησιμοποιηθούν κατακόρυφες συστοιχίες εγκλεισμάτων μέχρι το απαραίτητο βάθος για να βελτιωθεί η αποτελεσματικότητα της εξασθένησης αυτών των δομών. Στην περίπτωση και των εξεταζόμενων κυλινδρικών γεωμετριών, μπορούν να βρεθούν οι βέλτιστες τιμές δυσκαμψίας και πάχους για τη μεγιστοποίηση του μεγέθους των κενών (Bandgap).

Τα συμπεράσματα μας θα χωριστούν σε δύο κατηγορίες, σε αυτά που προέκυψαν βάση των αναλυτικών εξισώσεων και βάση των πεπερασμένων στοιχείων.

### 7.1. Συμπεράσματα αναλυτικών εξισώσεων

Σύμφωνα με τις αναλυτικές εξισώσεις παρατηρήθηκαν τα εξής:

- Όσο αυξάνεται ο αριθμός των στρώσεων (κυψελών) του μοντέλου μας δεν έχουμε καλύτερη απόδοση της κατασκευής μας, παρά μόνο στις περιπτώσεις των 4 και 3 στρώσεων,
- Όσο αυξάνεται ο αριθμός των οπών θα πρέπει η διάμετρος τους να μειώνεται και να μειώνεται το πάχος της πλάκας σκυροδέματος,
- Το μοντέλο είναι ιδιαίτερα ευαίσθητο στην αυξομείωση της εξωτερικής μάζας του σκυροδέματος,
- Για την εξωτερική δυσκαμψία  $K_e$  του ενδιάμεσου σιλομέρ συμπεράναμε πως όσο αυξάνεται δεν ευνοεί το μοντέλο, ενώ η μείωση της δεν επιφέρει κάποια σημαντική αλλαγή, και το ιδανικό πάχος είναι στα 0,01m,
- Για την εσωτερική δυσκαμψία  $K_i$  παρατηρείτε πως αν μειώσουμε το πάχος του αφρολέξ-ελαστομερούς χρειάζεται να μειώσουμε το μέτρο ελαστικότητας, ενώ για αύξηση του πάχους χρειάζεται αύξηση και του μέτρου ελαστικότητας,
- Τέλος με την αύξηση της διαμέτρου του χάλυβα χρειάζεται και μεγαλύτερο πάχος αφρολέξ-ελαστομερούς, αν όμως αυξηθεί το μέτρο ελαστικότητας τότε χρειαζόμαστε μικρό πάχος.

### 7.2. Συμπεράσματα πεπερασμένων στοιχείων

Σύμφωνα με τα πεπερασμένα στοιχεία προέκυψαν τα εξής:

- Ο λόγος των σχετικών μετακινήσεων των αναλυτικών εξισώσεων είναι κάτω από 0,6 ενώ στις επιλύσεις των πεπερασμένων στοιχείων είναι κοντά στην τιμή 0,8 και 0,9,



- Τα μοντέλα μεταξύ τους δεν έχουν ιδιαίτερες διαφορές στα απολέσματα τους,
- Τέλος οι διατάξεις των τελικών μοντέλων έχουν σχετικά καλύτερη απόσβεση από ότι μία απλή πλάκα έδρασης ανάλογα με τα χαρακτηριστικά διέγερσης.

### 7.3. Γενικά Συμπεράσματα και περαιτέρω διερεύνηση

Ο στόχος αυτής της διπλωματικής εργασίας έγκειται στην αξιολόγηση των δυνατοτήτων των περιοδικά διατεταγμένων μονάδων, με σκοπό τον μετριασμό της μετάδοσης κυμάτων από την μηχανική κίνηση των ηλεκτρικών μηχανών παραγωγής ενέργειας. Για το σκοπό αυτό, επιδιώκεται η ανάπτυξη περιοδικών δομών πεπερασμένου πλέγματος με χαρακτηριστικά χάσματα ζώνης συχνοτήτων που βρίσκονται στην περιοχή των υψηλών συχνοτήτων. Καθώς η σεισμική εισροή απαιτεί σχεδιασμό ζωνών χάσματος στην περιοχή [30,60] Hz, η παρούσα μελέτη διερευνά τις απαιτούμενες σχέσεις μεταξύ των δομικών παραμέτρων των πλεγμάτων μοναδιαίας κυψελίδας μάζας σε μάζα.

Η ανάλυση αποκαλύπτει τα ακόλουθα οφέλη και περιορισμούς:

- Αποδεικνύεται ότι η κατάλληλη επιλογή των ιδιοτήτων των υλικών του μοντέλου πράγματι επιτυγχάνει τον μετριασμό των ταλαντώσεων του προστατευόμενου συστήματος, όταν η διέγερση εισόδου χαρακτηρίζεται από μία συχνότητα που βρίσκεται εντός των επιδιωκόμενων υψηλών συχνοτήτων ([30,60] Hz).
- Ο λόγος εξωτερικής προς εσωτερική δυσκαμψία  $k_e / k_i$  αποκαλύπτεται ως κρίσιμος σχεδιαστικός παράγοντας. Οι υψηλοί λόγοι δυσκαμψίας έχουν ως αποτέλεσμα την εξασθένηση της μετατόπισης αλλά όχι της επιτάχυνσης, ενώ οι χαμηλοί λόγοι δυσκαμψίας επιβάλλουν το αντίστροφο αποτέλεσμα. Χαμηλή εξωτερική δυσκαμψία έχει ως αποτέλεσμα την αποσύνδεση της κατώτερης εξωτερικής μάζας από τη δρώσα διέγερση, αποδίδοντας χαμηλές επιταχύνσεις, αλλά υψηλές σχετικές μετατοπίσεις. Το τελευταίο θέτει περιορισμούς όσον αφορά την κατασκευασσιμότητα του συστήματος. Αντιθέτως, υψηλότεροι λόγοι δυσκαμψίας αντιστοιχούν σε μια πιο άκαμπτη μετάδοση δυνάμεων που αποδίδει αυξημένα επίπεδα επιτάχυνσης, αλλά χαμηλές σχετικές μετατοπίσεις. Συνεπώς, ο λόγος αυτός αποτελεί το κλειδί για την εξασφάλιση επαρκούς εξασθένησης της επιτάχυνσης, διατηρώντας παράλληλα εφικτό το χαμηλό κόστος σχεδιασμού.
- Τέλος προτείνεται ο σχεδιασμός του μοντέλου βάσης ανάλογα με αυτό των απλών βάσεων έδρασης που χρειάζεται κάθε μηχανή, με τα απαραίτητα χαρακτηριστικά, σύμφωνα με τις παραπάνω αναλύσεις.

Η ανάλυση που παρουσιάζεται μπορεί να αξιοποιηθεί για την παροχή σχηματικών πρακτικών οδηγιών για το σχεδιασμό βάσεων θωράκισης των μηχανών ηλεκτρικής παραγωγής ενέργειας σε πραγματικές περιπτώσεις, ως εξής:

- Εκτίμηση των κύριων συχνοτήτων στις οποίες συγκεντρώνεται ο κίνδυνος (π.χ. τις συχνότητες συντονισμού της κατασκευής),
- Προσδιορισμός των μηχανικών ιδιοτήτων του περιβάλλοντος εδάφους και επιλέξτε τις διαστάσεις των μοναδιαίων κυψελών με βάση το προκύπτον μέγιστο μήκος κύματος απειλής,
- Επιλογή του βέλτιστου τύπου, των παραμέτρων και του αριθμού των σειρών για την επίτευξη του επιθυμητού αποτελέσματος θωράκισης.

Η παρούσα εργασία προσφέρει μια ανάλυση του μοντέλου, με αξιόλογα αποτελέσματα μετριασμού των μετακινήσεων. Τα αποτελέσματα αποκαλύπτουν σημαντικές δυνατότητες αυτής της προσέγγισης και καθιστούν αναγκαία την περαιτέρω διερεύνηση σε σχέση με μια σειρά πειραματικών και εργαστηριακών εκτιμήσεων. Οι δομές αυτές μπορούν να βελτιστοποιηθούν περαιτέρω και να προσαρμοστούν στη συγκεκριμένη εφαρμογή ενδιαφέροντος, π.χ. σε κατανεμημένες και τοπικές τοποθεσίες. Τέλος προτείνεται η διαμόρφωση και η εξέταση νέων γεωμετρικών μοντέλων μεταυλικών, και η χρήση νέων υλικών στην παρούσα δομή, για περαιτέρω διερεύνηση.



## Βιβλιογραφία

Wagner, P. R., Dertimanis, V. K., Antoniadis, I. A., & Chatzi, E. N. (2016). On the feasibility of structural metamaterials for seismic-induced vibration mitigation. *International Journal of Earthquake and Impact Engineering*, 1(1-2), 20-56.

Martakis, P., Aguzzi, G., Dertimanis, V. K., Chatzi, E. N., & Colombi, A. (2021). Nonlinear periodic foundations for seismic protection: Practical design, realistic evaluation and stability considerations. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 150, 106934.

Casablanca, O., Ventura, G., Garesci, F., Azzerboni, B., Chiaia, B., Chiappini, M., & Finocchio, G. (2018). Seismic isolation of buildings using composite foundations based on metamaterials. *Journal of Applied Physics*, 123(17).

Miniaci, M., Krushynska, A., Bosia, F., & Pugno, N. M. (2016). Large scale mechanical metamaterials as seismic shields. *New Journal of Physics*, 18(8), 083041.

Shelby, R. A.; Smith, D. R.; Schultz, S. (2001). "Experimental Verification of a Negative Index of Refraction". *Science*. **292** (5514): 77–79.

Guenneau, S. B.; Movchan, A.; Pétursson, G.; Anantha Ramakrishna, S. (2007). "Acoustic metamaterials for sound focusing and confinement". *New Journal of Physics*. **9** (11): 399

Zouhdi, Saïd; Ari Sihvola; Alexey P. Vinogradov (December 2008). *Metamaterials and Plasmonics: Fundamentals, Modelling, Applications*. New York: Springer-Verlag. pp. 3–10, Chap. 3, 106

Metamaterial: <https://en.wikipedia.org/wiki/Metamaterial>

Elastomer: <https://en.wikipedia.org/wiki/Elastomer>

Electric generator: [https://en.wikipedia.org/wiki/Electric\\_generator](https://en.wikipedia.org/wiki/Electric_generator)

Turbo generator: [https://en.wikipedia.org/wiki/Turbo\\_generator](https://en.wikipedia.org/wiki/Turbo_generator)

Foam: <https://en.wikipedia.org/wiki/Foam>

PLAXIS3D, 2012. *Material Models*. Delft, The Netherlands: Plaxis b.v..

PLAXIS3D, 2012. *Scientific Manual*. Delft, The Netherlands: Plaxis b.v..

R. Craster and S. Guenneau, *Acoustic Metamaterials: Negative Refraction, Imaging, Lensing and Cloaking* (Springer, London, 2012).

Μώρις Καλδερών «Καινοτόμες διατάξεις απορρόφησης κραδασμών και μεταυλικών για έλεγχο χαμηλόσυχνων κυμάτων» ,Αθήνα, Φεβρουάριος 2023

Κωνσταντίνος Κασσάς-«Αριθμητική προσομοίωση της μη-γραμμικής στατικής και δυναμικής απόκρισης πασσάλου σε αξονική φόρτιση», Αθήνα, 2013

## Εφαρμογή Μεταϋλικών στη Θεμελίωση Μηχανών Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας για Δυναμική Φόρτιση

---

Αλέξανδρος Πανταζής «Μεταϋλικά συντονισμού Mie με ευρυζωνική ή/και πολυζωνική απόκριση», Αθήνα, Ιούλιος 2015

Cheng, Z., Shi, Z., Mo, Y.L. and Xiang, H. (2013a) 'Locally resonant periodic structures with low-frequency band gaps', *Journal of Applied Physics*, Vol. 114, No. 3, p.033532.

Cheng, Z.B., Yan, Y.Q., Meng, F.Y., Mo, Y.L., Xiang, H.J., Shi, Z.F. and Stokoe, K.H. (2013b) '3D periodic foundation-based structural vibration isolation', in *Lecture Notes in Engineering and Computer Science*, LNECS, Vol. 3, pp.1797–1802, London, UK.

Christensen, J. and Javier García de Abajo, F. (2012) 'Anisotropic metamaterials for full control of acoustic waves', *Phys. Rev. Lett.*, March, Vol. 108, No. 12, p.124301.

Colquitt, D.J., Brun, M., Gei, M., Movchan, A.B., Movchan, N.V. and Jones, I.S. (2014) 'Transformation elastodynamics and cloaking for flexural waves', *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 72, pp.131–143.

Craster, R.V. and Guenneau, S. (2013) *Acoustic Metamaterials: Negative Refraction, Imaging, Lensing and Cloaking*, Springer-Verlag, Springer Series in Materials Science.

Datta, T.K. (2010) *Seismic Analysis of Structures*, John Wiley & Sons Ltd., Chichester, UK.  
Dertimanis, V.K., Antoniadis, I.A. and Chatzi, E.N. (2016) 'Feasibility analysis on the attenuation of strong ground motions using finite periodic lattices of mass-in-mass barriers', *Journal of Engineering Mechanics*, 10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0001120, 04016060.

Fang, N., Xi, D., Xu, J., Ambati, M., Srituravanich, W., Sun, C. and Zhang, X. (2006) 'Ultrasonic metamaterial with negative modulus', *Nature Materials*, Vol. 5, pp.452–456.

Huang, H.H., Sun, C.T. and Huang, G.L. (2009) 'On the negative effective mass density in acoustic metamaterials', *International Journal of Engineering Science*, April, Vol. 47, No. 4, pp.610–617.

Huang, J. and Shi, Z. (2013a) 'Application of periodic theory to rows of piles for horizontal vibration attenuation', *International Journal of Geomechanics*, April, Vol. 13, No. 2, pp.132–142.

Huang, J. and Shi, Z. (2013b) 'Attenuation zones of periodic pile barriers and its application in vibration reduction for plane waves', *Journal of Sound and Vibration*, September, Vol. 332, No. 19, pp.4423–4439.

Hussein, M.I., Leamy, M.J. and Ruzzene, M. (2014) 'Dynamics of phononic materials and structures: historical origins, recent progress, and future outlook', *Applied Mechanics Reviews*, May, Vol. 66, No. 4, p.040802.

Jensen, J.S. (2003) 'Phononic band gaps and vibrations in one- and two-dimensional mass-spring structures', *Journal of Sound and Vibration*, October, Vol. 266, No. 5, pp.1053–1078.

Kim, S-H. and Das, M.P. (2012) 'Seismic wavenumber of metamaterials', *Modern Physics Letters B*, July, Vol. 26, No. 17, p.1250105.

Kushwaha, M.S., Halevi, P., Dobrzynski, L. and Djafari-Rouhani, B. (1993) 'Acoustic band

structure of periodic elastic composites', *Physical Review Letters*, Vol. 71, No. 13, pp.2022–2025.

Liu, Z., Chan, C. and Sheng, P. (2005) 'Analytic model of phononic crystals with local resonances', *Physical Review B*, January, Vol. 71, No. 1, p.014103.

Liu, Z., Zhang, X., Mao, Y., Zhu, Y.Y., Yang, Z., Chan, C.T. and Sheng, P. (2000) 'Locally resonant sonic materials', *Science*, September, Vol. 289, No. 5485, pp.1734–1736.

Lu, M-H., Feng, L. and Chen, Y-F. (2009) 'Phononic crystals and acoustic metamaterials', *Materials Today*, December, Vol. 12, No. 12, pp.34–42.

Wagner, P.R., Dertimanis, V., Chatzi, E. and Antoniadis, I. (2016) 'Design of metamaterials for seismic isolation', in *Dynamics of Civil Structures, Proceedings of the 34th IMAC, A Conference and Exposition on Structural Dynamics 2016, IMAC-XXXIV, Orlando, USA*, January, Vol. 2, pp.25–28.