



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ- ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΧΩΡΟΤΑΞΙΑΣ, ΠΟΛΕΟΔΟΜΙΑΣ ΚΑΙ
ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑΚΗΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
“ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΕΡΓΩΝ, ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΟΣ
ΚΑΙ ΧΩΡΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ”

Μεταπτυχιακή Εργασία

**ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΩΝ
ΔΟΝΗΣΕΩΝ ΑΠΟ ΤΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΑΣΤΙΚΟΥ ΜΕΣΟΥ ΣΤΑΘΕΡΗΣ
ΤΡΟΧΙΑΣ ΣΤΟ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟ ΤΥΠΙΚΟΥ ΕΛΛΗΝΙΚΟΥ ΚΤΙΡΙΟΥ ΑΠΟ
ΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ**



ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ Ν. ΒΑΛΑΜΒΑΝΟΣ
ΒΟΛΟΣ 2021

© 2021 Παναγιώτης Ν. Βαλαμβάνος

Η έγκριση της μεταπτυχιακής εργασίας από το Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών «Διαχείριση Έργων, Συγκοινωνιακός και Χωρικός Σχεδιασμός» δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του/της συγγραφέα (Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ. 2).

Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:

Πρώτος Εξεταστής (Επιβλέπων)

Δρ. Βογιατζής Κωνσταντίνος

Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Δεύτερος Εξεταστής

Δρ. Μουζάκης Χαράλαμπος

Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Τρίτος Εξεταστής

Δρ. Κοπελιάς Παντελεήμων

Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Ευχαριστίες

Η παρούσα Μεταπτυχιακή εργασία εκπονήθηκε τη χρονική περίοδο μεταξύ Σεπτεμβρίου του έτους 2020 και Ιανουαρίου του έτους 2021 στα πλαίσια του Διατμηματικού Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Με την ολοκλήρωση της εργασίας μου αισθάνομαι υπόχρεος να ευχαριστήσω θερμά όλους εκείνους που συνέβαλαν στην εκπόνησή της και ιδιαιτέρως θα ήθελα να ευχαριστήσω:

Τον επιβλέποντα καθηγητή μου Δρ. Βογιατζή Κωνσταντίνο για την ανελλιπή καθοδήγηση που μου προσέφερε καθ' όλο το χρονικό διάστημα εκπόνησης της εργασίας και για το συνεχές ενδιαφέρον του σχετικά με το θέμα που επιλέχθηκε. Συμπληρωματικά, θα ήθελα να τον ευχαριστήσω για την παροχή της υλικοτεχνικής υποδομής που μου προσέφερε, χάρη στην οποία η μεταπτυχιακή μου εργασία κατέστη δυνατή. Τέλος, θα ήθελα να τον ευχαριστήσω για την εξαιρετική συνεννόηση και συνεργασία που είχαμε κατά τη διάρκεια του ακαδημαϊκού εξαμήνου καθώς και για τον χρόνο που διέθεσε για την υλοποίηση της εργασίας μου.

Τον Δρ. Μουζάκη Χαράλαμπο για την πολύτιμη βοήθεια του στην εκπόνηση της εργασίας μου καθώς επίσης και για τις τεχνικές συμβουλές που μου παρείχε καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της μεταπτυχιακής μου εργασίας. Χωρίς την βοήθεια του δεν θα ήταν εφικτή η δημιουργία του προσομοιώματος.

Την Δρ. Ζαφειροπούλου Βασιλική και τον κ. Γεράκη Μιχαήλ για την πολύτιμη βοήθεια τους για την μορφοποίηση του Προσομοιώματος, οι γνώσεις τους αποτέλεσαν καθοριστικό παράγοντα για την ορθή μόρφωσή του.

Ολοκληρώνοντας, θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στην οικογένεια μου καθώς και στους φίλους μου για την έμπρακτη εμπύχωσή τους, την συμπαράσταση και την κατανόηση που έδειξαν σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου έως τώρα, με ιδιαίτερη έμφαση στην χρονική περίοδο εκπόνησης της μεταπτυχιακής μου εργασίας εξαιτίας των δύσκολων συνθηκών που υπήρχαν.

Περίληψη

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία πραγματεύεται την ανάπτυξη αριθμητικού προσομοιώματος για τη διερεύνηση των αρνητικών συνεπειών/ επιπτώσεων των δονήσεων και του θορύβου που προκαλούνται από τη διέλευση υπόγειων μέσων σταθερής τροχιάς (metro) καθώς και για τον προσδιορισμό της συνάρτησης μεταφοράς (transfer function) όπως υπολογίστηκε σε οίκο ευγηρίας στην περιοχή της Νίκαιας. Πραγματοποιήθηκε διεξοδική έρευνα καθώς και λεπτομερής σχολιασμός των ευρημάτων που σχετίζονται με το ακουστικό περιβάλλον. Αρχικά, πραγματοποιήθηκε ρεαλιστική αποτύπωση της υφιστάμενης κατάστασης της περιοχής μελέτης, υπόγεια αλλά και υπέργεια, σε τρεις διαστάσεις (3D). Το προσομοίωμα σχεδιάστηκε με βάση τα αρχιτεκτονικά σχέδια και τους ξυλότυπους του κτιρίου καθώς και με σχέδια οριζοντιογραφιών, μηκοτομών και γεωλογικών τομών του έργου επέκτασης της γραμμής 3 του μετρό.

Για την επίλυση του, το προσομοίωμα διαχωρίστηκε σε επιμέρους τρισδιάστατα στοιχεία (πεπερασμένα) τρίτης τάξης. Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε ονομάζεται αριθμητική ανάλυση σταθερής κατάστασης (steady state modal analysis) και διεξάχθηκε αφού πρώτα έγινε διερεύνηση των ιδιομορφών του προσομοιώματος. Μέσα από τη διαδικασία αυτή, υπολογίστηκαν οι απαιτούμενες παράμετροι για την σωστή βαθμονόμηση του (ταχύτητα δόνησης), με βάση πραγματικές μετρήσεις που έχουν διεξαχθεί στο πεδίο. Έπειτα η μεθοδολογία επαναλήφθηκε για τον προσδιορισμό της ταχύτητας δόνησης στα επιθυμητά σημεία. Οι παράμετροι που διεξάγονται από το προσομοίωμα είναι η ταχύτητα δόνησης στο τοίχωμα της σήραγγας, στην ελεύθερη επιφάνεια του εδάφους έξω από το κτίριο καθώς και στους υπερκείμενους ορόφους του υπό εξέταση κτιρίου (υπόγειο, ισόγειο, 1^{ος} όροφος, 2^{ος} όροφος, 3^{ος} όροφος και δώμα).

Τέλος, πραγματοποιείται ταύτιση των αποτελεσμάτων του προσομοιώματος με αυτά της πραγματικής μέτρησης. Οι συγκρίσεις των αποτελεσμάτων υπόδειξαν την αξιόπιστη ταύτιση των αριθμητικών αποτελεσμάτων με τα πραγματικά δεδομένα στην πλειονότητα των συχνοτήτων της 1/3 οκταβικής ανάλυσης. Οι μικρές εξαιρέσεις μη ταύτισης αιτιολογούνται και σχολιάζονται ενδελεχώς στα τελικά συμπεράσματα.

Λέξεις Κλειδιά: *Εδαφομεταφερόμενος Θόρυβος, Δόνηση, Ταχύτητα Δόνησης, Αριθμητική Επίλυση Προσομοιώματος, Μέσα Σταθερής Τροχιάς, Συνάρτηση Μεταφοράς*

Abstract

This dissertation deals with the development of a numerical simulation to investigate the negative effects of vibrations and noise caused by the passage of underground means of fixed orbit (metro), as well as to determine the transfer function in a nursing home in the area of Nikea. A thorough research was carried out, as well as a detailed commentary on the findings related to the acoustic environment. First of all, it is the realistic depiction of the current situation, underground and above ground, in three dimensions (3D). The simulation was designed based on the architectural drawings of the building as well as drawings of horizontal, longitudinal and geological sections of the metro tunnel.

In order to conduct results, the simulation was divided into individual three-dimensional elements (finite elements). The method used is called steady state modal analysis and was performed after first investigating the eigenvalues of the simulation. Through this process, the required parameters for its correct calibration were calculated based on the velocity of vibrations from actual measurements carried out in the field. Then, the methodology was repeated to determine the values at the desired nodes. The parameters determined by the simulation are the vibration velocity on the tunnel wall, on the free surface of the ground outside the building as well as on each floor of the building (basement, ground floor, 1st floor, 2nd floor, 3rd floor and roof).

Finally, the results of the simulation are compared to those of the actual measurement. The comparisons of the results indicated the reliable match of the numerical results with the real data at the majority of the frequencies of the 1/3 octave band analysis. The small exceptions of non-match are justified and thoroughly commented on the final conclusions.

Key Words: Ground-borne Noise, Vibration, Vibration Velocity, Numerical Solution of Simulation, Fixed Orbit Transportation, Transfer Function

Πίνακας Περιεχομένων3

Εισαγωγή	1
1. Βασική Ορολογία	2
1.1 Κύματα	2
1.2 Ήχος και Θόρυβος	4
1.3 Δονήσεις	5
2. Ιστορική Αναδρομή.....	6
2.1 Οίκος Ευγηρίας Μέλαθρον/Νικητίδη	6
2.2 Αττικό Μετρό - Γραμμή 3	6
3. Διάνοξη Σηράγγων και Κατασκευή Τροχιών	8
4. Εδαφομεταφερόμενος Θόρυβος	10
4.1 Βασικές παράμετροι εδαφομεταφερόμενου θορύβου	10
4.2 Τρόποι αντιμετώπισης εδαφομεταφερόμενου θορύβου.....	12
4.3 Μέγιστα επιτρεπόμενα όρια εδαφομεταφερόμενου θορύβου & ταχύτητας δόνησης κατά τη λειτουργία	13
5. Η Παρούσα Μεταπτυχιακή Εργασία.....	14
5.1 Η δυσκολία της εκπόνησης μετρήσεων	14
5.2 Το αντικείμενο μελέτης.....	15
5.3 Προηγούμενες έρευνες	15
6. Μόρφωση Προσομοιωμάτων	16
6.1 Προσομοίωση με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων	16
6.2 Βασικά σχέδια	18
6.2.1 Σχεδιασμός κτιρίου	18
6.2.2 Σχεδιασμός σήραγγας.....	19
6.2.3 Σχεδιασμός εδάφους και τελική σύνθεση	20
6.3 Στοιχεία και παράμετροι του Abaqus	21
6.4 Δίκτυο πεπερασμένων στοιχείων	22
6.5 Προσομοίωση σιδηροτροχιάς.....	23
6.6 Μη αναρτημένη μάζα	23
6.7 Συνοριακές συνθήκες	24
6.8 Επιβολή σταθερής φόρτισης.....	25
6.9 Βήματα ανάλυσης	25
6.10 Βαθμονόμηση.....	26
6.11 Σημεία διεξαγωγής και τύπος αποτελεσμάτων	27
6.12 Αριθμητική επίλυση Προσομοιώματος και ανάλυση αποτελεσμάτων	28

7. Αποτελέσματα.....	29
7.1 Παράθεση αποτελεσμάτων από το πρώτο βήμα της ανάλυσης.....	29
7.2 Παράθεση αποτελεσμάτων από το δεύτερο βήμα της ανάλυσης.....	37
7.3 Μόρφωση των Συναρτήσεων Μεταφοράς για το κτίριο από Ο.Σ.....	44
7.4 Σύγκριση αποτελεσμάτων με τα θεσμοθετημένα όρια.....	52
8. Συμπεράσματα	54
Βιβλιογραφία	56
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ	57
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: Σχέδια κτιρίου.....	58
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: Απεικόνιση προσομοιώματος στο σχεδιαστικό πρόγραμμα Revit ...	71

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1.1. Ταχύτητα διάδοσης του ήχου για διάφορα μέσα μετάδοσης (m/s).....	4
Πίνακας 4.1. Μέγιστα επιτρεπόμενα επίπεδα εδαφομεταφερόμενου θορύβου.....	13
Πίνακας 4.2. Μέγιστες επιτρεπόμενες στάθμες εδαφομεταφερόμενου θορύβου.....	13
Πίνακας 6.1. Μονάδες μέτρησης Abaqus.....	21
Πίνακας 6.2. Κατηγοριοποίηση εδαφών με βάση το μέτρο ελαστικότητάς τους.....	21
Πίνακας 6.3. Τύποι στοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν κατά την προσομοίωση.....	21
Πίνακας 6.4. Υλικά που χρησιμοποιήθηκαν.....	22
Πίνακας 6.5. Φάσματα διαχωρισμού προσομοιωμάτων.....	28
Πίνακας 6.6. Ομαδοποίηση συχνοτήτων 1/3 οκταβικής ανάλυσης.....	28
Πίνακας 7.1. Αριθμητικά αποτελέσματα σύγκρισης προσομοιώματος και πραγματικών μετρήσεων που διεξάχθηκαν στην ελεύθερη επιφάνεια.....	38
Πίνακας 7.2. Αριθμητικά αποτελέσματα σύγκρισης προσομοιώματος και πραγματικών μετρήσεων που διεξάχθηκαν στο υπόγειο του κτιρίου	39
Πίνακας 7.3. Αριθμητικά αποτελέσματα σύγκρισης προσομοιώματος και πραγματικών μετρήσεων που διεξάχθηκαν στον 1 ^ο όροφο του κτιρίου	40
Πίνακας 7.4. Αριθμητικά αποτελέσματα σύγκρισης προσομοιώματος και πραγματικών μετρήσεων που διεξάχθηκαν στον 2 ^ο όροφο του κτιρίου	41
Πίνακας 7.5. Αριθμητικά αποτελέσματα που εκπίπτουν από το προσομοίωμα του Abaqus.....	42
Πίνακας 7.6. Αριθμητικά αποτελέσματα από τις επί τόπου μετρήσεις που διεξάχθηκαν στην περιοχική μελέτη.....	43
Πίνακας 7.7. Αποτελέσματα Συνάρτησης μεταφοράς Τοίχωμα σήραγγας-Ελεύθερη επιφάνεια..	44
Πίνακας 7.8. Αποτελέσματα Συνάρτησης μεταφοράς Τοίχωμα σήραγγας-Υπόγειο κτιρίου.....	45
Πίνακας 7.9. Αποτελέσματα Συνάρτησης μεταφοράς Ελεύθερη επιφάνεια-Υπόγειο κτιρίου.....	46
Πίνακας 7.10. Αποτελέσματα Συνάρτησης μεταφοράς Υπόγειο κτιρίου-Ισόγειο κτιρίου.....	47
Πίνακας 7.11. Αποτελέσματα Συνάρτησης μεταφοράς Υπόγειο κτιρίου-1 ^{ος} όροφος κτιρίου.....	48
Πίνακας 7.12. Αποτελέσματα Συνάρτησης μεταφοράς Υπόγειο κτιρίου-2 ^{ος} όροφος κτιρίου.....	49
Πίνακας 7.13. Αποτελέσματα Συνάρτησης μεταφοράς Υπόγειο κτιρίου-3 ^{ος} όροφος κτιρίου.....	50
Πίνακας 7.14. Αποτελέσματα Συνάρτησης μεταφοράς Υπόγειο κτιρίου-Δώμα.....	51
Πίνακας 7.15. Τελικά αποτελέσματα εδαφομεταφερόμενου θορύβου από το πρόγραμμα Abaqus & από τις επί τόπου μετρήσεις	52
Πίνακας 7.16. Τελικά αποτελέσματα ταχύτητας δόνησης από το πρόγραμμα Abaqus & από τις επί τόπου μετρήσεις	53

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 4.1. Μετάδοση δονήσεων στον ευαίσθητο δέκτη.....	10
Σχήμα 6.1. Διαδικασία υπολογισμού αποτελεσμάτων.....	17
Σχήμα 7.1. Συχνότητα ιδιομορφής 10Hz.....	29
Σχήμα 7.2. Συχνότητα ιδιομορφής 12,5Hz.....	30
Σχήμα 7.3. Συχνότητα ιδιομορφής 16Hz.....	30
Σχήμα 7.4. Συχνότητα ιδιομορφής 20Hz.....	31
Σχήμα 7.5. Συχνότητα ιδιομορφής 25Hz.....	31
Σχήμα 7.6. Συχνότητα ιδιομορφής 31,5Hz.....	32
Σχήμα 7.7. Συχνότητα ιδιομορφής 40Hz.....	32
Σχήμα 7.8. Συχνότητα ιδιομορφής 40Hz λεπτομέρεια κτιρίου.....	33
Σχήμα 7.9. Συχνότητα ιδιομορφής 50Hz.....	33
Σχήμα 7.10. Συχνότητα ιδιομορφής 63Hz.....	34
Σχήμα 7.11. Συχνότητα ιδιομορφής 80Hz.....	34
Σχήμα 7.12. Συχνότητα ιδιομορφής 100Hz.....	35
Σχήμα 7.13. Συχνότητα ιδιομορφής 100Hz λεπτομέρεια κτιρίου	35
Σχήμα 7.14. Συχνότητα ιδιομορφής 125Hz	36
Σχήμα 7.15. Συχνότητα ιδιομορφής 160Hz	36
Σχήμα 7.16. Συχνότητα ιδιομορφής 200Hz	37
Σχήμα 7.17. Σύγκριση πραγματικών μετρήσεων που διεξάχθηκαν στην περιοχική μελέτη με τα αποτελέσματα που εκπίπτουν από το προσομοίωμα του Abaqus στην ελεύθερη επιφάνεια.....	38
Σχήμα 7.18. Σύγκριση πραγματικών μετρήσεων που διεξάχθηκαν στην περιοχική μελέτη με τα αποτελέσματα που εκπίπτουν από το προσομοίωμα του Abaqus στο υπόγειο του κτιρίου.....	39
Σχήμα 7.19. Σύγκριση πραγματικών μετρήσεων που διεξάχθηκαν στην περιοχική μελέτη με τα αποτελέσματα που εκπίπτουν από το προσομοίωμα του Abaqus στον 1 ^ο όροφο του κτιρίου...	40
Σχήμα 7.20. Σύγκριση πραγματικών μετρήσεων που διεξάχθηκαν στην περιοχική μελέτη με τα αποτελέσματα που εκπίπτουν από το προσομοίωμα του Abaqus στον 2 ^ο όροφο του κτιρίου....	41
Σχήμα 7.21. Συλλογικά αποτελέσματα που εκπίπτουν από το προσομοίωμα του Abaqus.....	42
Σχήμα 7.22. Συλλογικά αποτελέσματα από τις επί τόπου μετρήσεις που διεξάχθηκαν στην περιοχική μελέτη.....	43
Σχήμα 7.23. Συνάρτηση μεταφοράς Τοίχωμα σήραγγας-Ελεύθερη επιφάνεια.....	44
Σχήμα 7.24. Συνάρτηση μεταφοράς Τοίχωμα σήραγγας-Υπόγειο κτιρίου.....	45
Σχήμα 7.25. Συνάρτηση μεταφοράς Ελεύθερη επιφάνεια-Υπόγειο κτιρίου	46
Σχήμα 7.26. Συνάρτηση μεταφοράς Υπόγειο κτιρίου-Ισόγειο κτιρίου.....	47
Σχήμα 7.27. Υπόγειο κτιρίου-1 ^{ος} όροφος κτιρίου.....	48
Σχήμα 7.28. Συνάρτηση μεταφοράς Υπόγειο κτιρίου-2 ^{ος} όροφος κτιρίου	49
Σχήμα 7.29. Συνάρτηση μεταφοράς Υπόγειο κτιρίου-3 ^{ος} όροφος κτιρίου	50
Σχήμα 7.30. Συνάρτηση μεταφοράς Υπόγειο κτιρίου-Δώμα	51
Σχήμα 7.31. Σύγκριση αποτελεσμάτων από το πρόγραμμα Abaqus & των επί τόπου μετρήσεων με τα θεσμοθετημένα όρια εδαφομεταφερόμενου θορύβου.....	52
Σχήμα 7.32. Σύγκριση αποτελεσμάτων από το πρόγραμμα Abaqus & των επί τόπου μετρήσεων με τα θεσμοθετημένα όρια ταχύτητας δόνησης.....	53

Εισαγωγή

Οι πόλεις γίνονται όλο και πιο θελκτικές στην σήμερον εποχή λόγω της πληθώρας επιλογών που προσφέρουν τόσο στην εργασία όσο και στην ψυχαγωγία στον μέσο πολίτη, με αποτέλεσμα μεγάλες μάζες πληθυσμού να επιδιώκουν την μόνιμη εγκατάστασή τους σε ένα μεγάλο αστικό κέντρο. Αποτέλεσμα της ενέργειας αυτής αποτελεί η έντονη αστικοποίηση, ένα από τα βασικά φαινόμενα που διέπουν την λειτουργία της σύγχρονης κοινωνίας. Το βασικότερο χαρακτηριστικό που διακρίνει την εξέλιξη της στην Ελλάδα είναι η τάση πόλωσης στα δύο μεγαλύτερα αστικά κέντρα της, την Αθήνα και τη Θεσσαλονίκη. Λόγω της έντονης συσσώρευσης πληθυσμού, η συνεχής μετακίνηση των κατοίκων για εργασία, καθώς και για αναψυχή, αποτελεί μια καθημερινή πρόκληση. Μία πρώτη λύση στο πρόβλημα αυτό έρχεται να δώσει το ΙΧ. Ωστόσο, η μαζική χρήση του αυτοκινήτου επιφόρτισε επιπλέον τα αστικά οδικά δίκτυα, με αποτέλεσμα τη συνεχή συμφόρηση τους. Η μαζική χρήση του ΙΧ, λοιπόν, και οι επιπτώσεις της στο περιβάλλον και την ποιότητα ζωής των κατοίκων, έχουν προσανατολίσει τις πρακτικές συγκοινωνιακού σχεδιασμού στην προώθηση και ανάπτυξη εναλλακτικών μορφών και μέσων μετακίνησης, με στόχο το σχεδιασμό ενός μοντέλου, μιας πιο βιώσιμης πόλης, και έτσι τα τελευταία χρόνια, έχει δοθεί μεγάλη έμφαση στον σχεδιασμό και τη λειτουργία αποδοτικών, αξιόπιστων και πιο φιλικών προς το περιβάλλον μέσων μαζικής μεταφοράς για την κάλυψη των καθημερινών αναγκών των χρηστών τους. Συνεχώς οι κυβερνήσεις ενθαρρύνουν όλο και περισσότερο την ευρεία χρήση βιώσιμων μεταφορών εντός και στα περίχωρα των πόλεων με χρήση των μέσων σταθερής τροχιάς (Μ.Σ.Τ.), τα οποία θεωρούνται πιο αποτελεσματικά και φιλικά προς το περιβάλλον συγκριτικά με τα μηχανοκίνητα οχήματα, καθώς δεν προκαλούν συμφόρηση και δεν συμμετέχουν τόσο έντονα στο φαινόμενο της ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Με το πέρας των ετών, έχει διαπιστωθεί ότι στην περιοχή της πρωτεύουσας, περίπου το 40% των μετακινούμενων χρησιμοποιεί μέσα σταθερής τροχιάς (μετρό, ηλεκτρικός, προαστιακός, τραμ). Τα τελευταία χρόνια, συνεχώς γίνονται νέα έργα Μ.Σ.Τ. για την εξυπηρέτηση όλο και περισσότερων χρηστών, όπως επιπρόσθετες γραμμές μετρό (γραμμή 4), αλλά και επεκτάσεις των υφιστάμενων γραμμών μετρό (επέκταση γραμμής 3). Ωστόσο, η κατασκευή καθώς επίσης και η λειτουργία των μέσων σταθερής τροχιάς ενέχει ορισμένα μειονεκτήματα, με κυριότερο τον παραγόμενο εδαφομεταφερόμενο θόρυβο. Για το λόγο αυτό, στη συγκεκριμένη μεταπτυχιακή εργασία, έγινε μία προσπάθεια αποτίμησης των ενδεχόμενων συνεπειών της λειτουργίας του υπόγειου σιδηροδρόμου (μετρό) σε ευαίσθητους δέκτες που βρίσκονται στην εγγύτητα του έργου (επέκταση γραμμής 3 του μετρό) μεταξύ των σταθμών «Αγ. Μαρίνα» και «Νίκαια». Στο υπό εξέταση τμήμα αξιολογήθηκε ενδελεχώς ο εδαφομεταφερόμενος θόρυβος και οι δονήσεις στην πρόσοψη και στο εσωτερικό ενός ευαίσθητου δέκτη (οίκος ευγηρίας Νικητίδη) με απώτερο στόχο την προστασία και τη βελτίωση της ποιότητας διαβίωσης των πρεσβύτερων (ηλικιωμένα άτομα).

1. Βασική Ορολογία

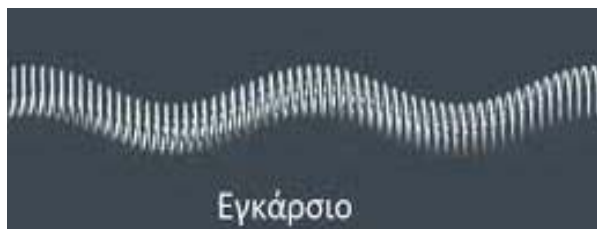
1.1 Κύματα

Ως κύμα ορίζεται η διαταραχή από την ισορροπία, η οποία ταξιδεύει μέσα στον χώρο. Κυματική κίνηση εμφανίζεται παντού στη φύση συμπεριλαμβάνοντας τους κυματισμούς του νερού, τις σεισμικές δονήσεις, τα ηχητικά κύματα, τα κύματα σε μια χορδή ή ένα ελατήριο. Οι βασικότεροι τύποι κυμάτων είναι τρεις.

- Τα **μηχανικά κύματα**, τα οποία χρειάζονται ένα υλικό μέσο για να διαδοθούν όπως π.χ. αέρας, νερό, στερεά κτλ.
- Τα **ηλεκτρομαγνητικά κύματα**, που δε χρειάζονται ύλη, για να διαδοθούν (ταξιδεύουν και στο κενό)
- Τα **κύματα πιθανότητας** της Κβαντικής Φυσικής, όπου τα υποατομικά σωματίδια εμφανίζουν και κυματικές ιδιότητες.

Η παρούσα μεταπτυχιακή πραγματεύεται τα μηχανικά κύματα τα οποία και αυτά με τη σειρά τους διακρίνονται σε δύο υποκατηγορίες ανάλογα με τη σχέση της κίνησης των σωματιδίων του μέσου με τη διεύθυνση διάδοσης του κύματος:

- τα **εγκάρσια κύματα**, ονομάζονται τα κύματα των οποίων η μετατόπιση των υλικών σωματιδίων, που μεταφέρουν το κύμα, είναι κάθετη προς τη διεύθυνση διάδοσης του ίδιου του κύματος. Στα εγκάρσια κύματα εμφανίζονται μέγιστα και ελάχιστα που ονομάζονται «όρη» και «κοιλίες» αντίστοιχα.



Εικόνα 1.1 - Εγκάρσιο κύμα (Πηγή authorstream.com)

- τα **διαμήκη κύματα**, ονομάζονται τα κύματα των οποίων η μετατόπιση των υλικών σωματιδίων που μεταφέρουν το κύμα γίνεται κατά μήκος (παράλληλα) της διεύθυνσης διάδοσης του κύματος. Με την κίνηση που πραγματοποιούν τα σωματίδια του μέσου στα διαμήκη κύματα παρατηρούνται πυκνώματα και αραιώματα.



Εικόνα 1.2 - Διάμηκες κύμα (Πηγή authorstream.com)

Συνοψίζοντας, ένα μηχανικό κύμα είναι ένα είδος διαταραχής σε ένα υλικό, η οποία ταξιδεύει προς κάποια διεύθυνση στο χώρο μεταφέροντας μηχανική ενέργεια. Τα σωματίδια του υλικού ταλαντώνονται τοπικά είτε κάθετα στη διεύθυνση διάδοσης της κυματικής διαταραχής (εγκάρσιο κύμα) ή παράλληλα σε αυτήν (διάμηκες κύμα).

Το κύμα αποτελεί ένα περιοδικό φαινόμενο και διέπεται από ορισμένα βασικά χαρακτηριστικά:

- **Περίοδος (T)**

Η περίοδος, ορίζεται ως ο χρόνος μεταξύ δύο όμοιων σημείων δύο διαδοχικών κύκλων της κυματομορφής. Η περίοδος, δηλαδή, είναι το χρονικό διάστημα κατά το οποίο το κύμα διανύει απόσταση ίση με ένα μήκος κύματος, και στο σύστημα SI μετριέται σε sec.

- **Συχνότητα (ν)**

Η συχνότητα, του κύματος ορίζεται ως ο ρυθμός με τον οποίο η κυματική διαταραχή επαναλαμβάνεται στη μονάδα του χρόνου, και στο σύστημα SI μετριέται σε Hz (κύκλοι ανά δευτερόλεπτο).

- **Μήκος κύματος (λ)**

Το μήκος κύματος, είναι η απόσταση ανάμεσα σε δύο σημεία του κύματος που, όταν διαταράσσονται, συμπεριφέρονται με τον ίδιο ακριβώς τρόπο, και στο σύστημα SI μετριέται σε m.

- **Ταχύτητα (υ)**

Η ταχύτητα της διαταραχής ονομάζεται ταχύτητα του κύματος. Το μέγεθος αυτό μετριέται ανάλογα με τις μονάδες μέτρησης των μεγεθών μήκος του κύματος και περίοδος, συνήθως σε μέτρα ανά δευτερόλεπτο (m/s).

Τα χαρακτηριστικά των κυμάτων συνδέονται μεταξύ τους με τις ακόλουθες σχέσεις:

$$v = \frac{1}{T} \quad (1.1)$$

$$\omega = 2\pi\nu = \frac{2\pi}{T} \quad (1.2)$$

$$v = \frac{\lambda}{T} = \lambda \times f \quad (1.3)$$

Κάθε συνδυασμός του εκάστοτε είδους κύματος και μέσου διάδοσής του έχουν μια χαρακτηριστική ταχύτητα η οποία είναι μοναδική για κάθε ζεύγος.

1.2 Ήχος και Θόρυβος

Ο ήχος αποτελεί ένα φαινόμενο μεταφοράς ενέργειας και η διάδοσή του σε κάποιο μέσο πραγματοποιείται χωρίς τη μεταφορά μάζας. Πρακτικά, η μετάδοσή του γίνεται με την ταλάντωση μορίων του αέρα υπό τη μορφή κυμάτων (ακουστικά κύματα) που μεταφέρουν ενέργεια από την πηγή προς τον δέκτη. Σαν ήχος επομένως μπορεί να ορισθεί κάθε είδους πίεση που μπορεί να ανιχνεύσει το ανθρώπινο αυτί. Ανάλογα με το μέσο μετάδοσης, ο ήχος διαδίδεται σε διαφορετικές ταχύτητες. Στον αέρα, ο ήχος διαδίδεται με μια μέση ταχύτητα 340m/s. Όσο πιο πυκνή υφή έχει το μέσο μετάδοσης μέσω του οποίου διαδίδεται η δόνηση, τόσο πιο μεγάλη είναι η ταχύτητα:

Πίνακας 1.1 - Ταχύτητα διάδοσης του ήχου για διάφορα μέσα μετάδοσης (m/s)

Αέρας	340	Νερό	1500	Αλουμίνιο	6400	Υδρατμοί	402
Σίδηρο	5900	Χαλκός	4700	Χαλαζίας	5700	Τσιμέντο	3350

Ο ήχος αναλόγως με το μέσο με το οποίο διαδίδεται κατηγοριοποιείται σε:

- Αερομεταφερόμενος, του οποίου το μέσο διάδοσής του είναι ο αέρας
- Εδαφομεταφερόμενος, του οποίου το μέσο διάδοσής του είναι το έδαφος
- Δομόφερτος, του οποίου το μέσο διάδοσής του είναι τα δομικά χαρακτηριστικά των κατασκευών.

Υπό φυσική έννοια, δεν υπάρχει ουσιαστικός διαχωρισμός ανάμεσα στον ήχο και στον θόρυβο. Υπό ψυχολογική έννοια, ο ήχος είναι μια αισθητήρια λήψη που δημιουργείται ως ένα νοητικό γεγονός το οποίο προκαλείται από φυσιολογικές διαδικασίες στο ακουστικό μέρος του εγκεφάλου. Συνεπώς υπάρχει σημαντική διάκριση μεταξύ του ήχου και του θορύβου. Ό,τι ακούγεται δεν είναι εξ'ορισμού θόρυβος αλλά υπάρχουν ήχοι που προκαλούν όχληση. Ο θόρυβος είναι έννοια σχετική ή και καθαρά υποκειμενική, καθώς το ίδιο γεγονός (πχ ένας συγκεκριμένος ήχος) άλλοτε θεωρείται θόρυβος και άλλοτε είναι επιθυμητός. Πολλές φορές απλά και μόνον η αύξηση της έντασης μετατρέπει μια ευχάριστη μελωδία σε θόρυβο. Μονάδα μέτρησης του θορύβου είναι το Decibel. Το Decibel είναι μια αδιάστατη μονάδα μέτρησης η οποία ακολουθεί λογαριθμική κλίμακα και στην οποία εκφράζεται η διαφορά στάθμης μίας φυσικής ποσότητας όπως το πλάτος πίεσης ενός ήχου με έναν άλλο (reference). Σαν σημείο αναφοράς χρησιμοποιούνται τιμές που το αντίστοιχο επίπεδο θορύβου ισοδυναμεί με 0 dB, δηλαδή την έναρξη που μπορεί κάτι να ακουστεί (20μPa). Το dB δεν αποτελεί μονάδα απόλυτης μέτρησης. Λόγω του υπάρχοντος θέματος της μεταπτυχιακής αυτής τα μεγέθη που συγκρίνονται και εκφράζονται σε Decibel είναι ταχύτητες δόνησης.

Ο βασικός τύπος είναι:

$$V_{db} = 20 \times \log\left(\frac{L_1}{L_{ref}}\right) \quad (1.4)$$

όπου:

L_1 : ταχύτητα δόνησης

L_{ref} : ταχύτητα δόνησης που αντιστοιχεί σε 0 dB

$L_{ref} = 10^{-9}$ m/sec

1.3 Δονήσεις

Με τον όρο «δονήσεις» χαρακτηρίζονται οι γρήγορες μηχανικές ταλαντώσεις μικρού πλάτους περί ενός σημείου ισορροπίας. Τα μηχανικά αυτά κύματα διαδίδονται διαμέσου ενός στερεού μέσου και η πλειονότητα των δονήσεων αποτελεί το ανεπιθύμητο προϊόν άλλων ενεργειών. Ο ήχος και η δόνηση σχετίζονται πολύ στενά μεταξύ τους, μιας και οι δονήσεις είναι υπαίτιες για τη δημιουργία ανεπιθύμητων ήχων (θόρυβος). Ως εκ τούτου, οι προσπάθειες μείωσης του θορύβου σχετίζονται συχνά με ζητήματα περιορισμού ή και εξάλειψής τους. Οι δονήσεις κατηγοριοποιούνται ως εξής:

- Ελεύθερες
- Εξαναγκασμένες
- Φθίνουσες

Τα κύρια χαρακτηριστικά τους είναι: η μετατόπιση(m), συχνότητα(Hz), ταχύτητα(m/s), επιτάχυνση (m/s^2).

Για να γίνει η βέλτιστη δυνατή αξιολόγηση καθώς και ερμηνεία των δονήσεων θα πρέπει να γίνει επιλογή του κατάλληλου μετρολογικού εξοπλισμού. Είναι εφικτή η καταγραφή διαφορετικών χαρακτηριστικών των δονήσεων ανάλογα με τον εξοπλισμό που χρησιμοποιείται σε κάθε περίπτωση. Τα καταγραφικά αυτά μηχανήματα διακρίνονται σε:

- Επιταχυνσιογράφους, που καταγράφουν την επιτάχυνση (σε mm/sec^2)
- Γεόφωνα, που καταγράφουν την ταχύτητα (mm/sec)

2. Ιστορική Αναδρομή

2.1 Οίκος Ευγηρίας Μέλαθρον/Νικητίδη

Η μονάδα φροντίδας ηλικιωμένων 'Ευγηρίας Μέλαθρον'/Νικητίδη βρίσκεται στην συμβολή των οδών «Μούγλων & Θειρών» στην Νίκαια και έχει τεθεί σε λειτουργία από το 1998 με άδεια από τη Νομαρχία Πειραιά και είναι μέλος της Πανελληνίας Ένωσης Μονάδων Φροντίδας Ηλικιωμένων (ΠΕΜΦΗ).



Εικόνα 2.1 - Τοποθεσία οίκου ευγηρίας Νικητίδη
(Πηγή GoogleMaps)

2.2 Αττικό Μετρό - Γραμμή 3

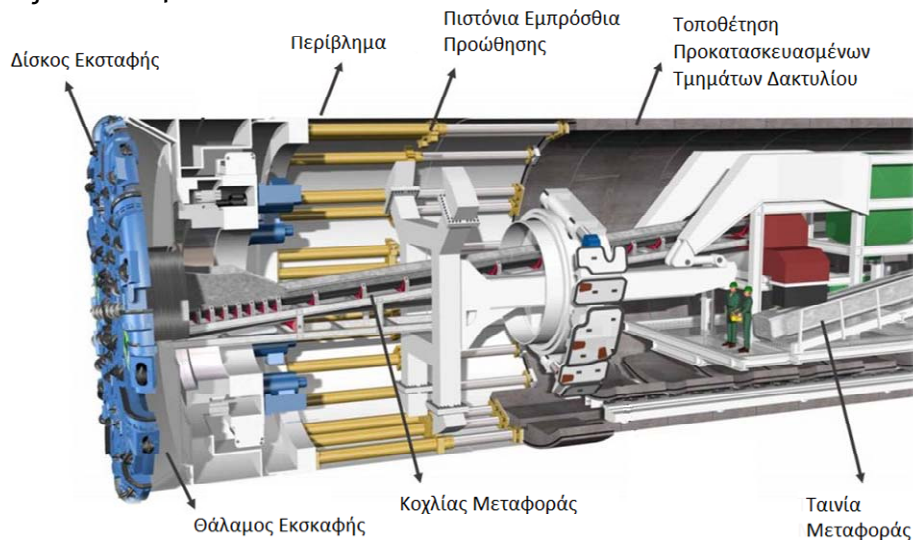
Το βασικό έργο του Μετρό της Αθήνας ξεκίνησε να υλοποιείται τον Νοέμβριο του 1992 και παραδόθηκε τμηματικά. Αρχικό πλάνο αποτελούσε η παράδοσή του το Δεκέμβρη του 1999, αλλά λόγω ενός τεχνικού ζητήματος στο σύστημα ηλεκτροδότησης εξανάγκασε την Αττικό Μετρό να μεταθέσει τα εγκαίνια ένα μήνα μετά.

Στις 28 Ιανουαρίου του 2000 παραδόθηκε το πρώτο τμήμα της γραμμής 3, από το Σύνταγμα έως την Εθνική Άμυνα. Η επέκταση προς Μοναστηράκι παραδόθηκε τρία χρόνια αργότερα, τον Απρίλιο του 2003 και αποτέλεσε τον δυτικό τερματικό σταθμό της Γραμμής για τέσσερα χρόνια. Τον Ιούλιο του 2004 παραδόθηκε η επέκταση από τον σταθμό Εθνική Άμυνα μέχρι το αεροδρόμιο, με αποτέλεσμα τη λειτουργία τριών νέων σταθμών: Χαλάνδρι, Δουκίσσης Πλακεντίας και Αεροδρόμιο. Τον Ιούλιο του 2006, οι σταθμοί Παλλήνη, Παιανία-Κάντζα και τον Σεπτέμβριο του ίδιου έτους ο σταθμός Κορωπί, ενσωματώθηκαν στο δίκτυο του μετρό.

Όταν έγινε η διάνοιξη της σήραγγας προς την στάση της Δουκίσσης Πλακεντίας είχε προβλεφθεί και η κατασκευή των ενδιάμεσων σταθμών Νομισματοκοπείο και Χολαργός οι οποίες είχαν έτοιμο κέλυφος. Λόγω κάποιων διαφωνιών όμως δεν υπήρχε ανάλογη πρόβλεψη για τον σταθμό της Αγίας Παρασκευής. Για να κατασκευαστεί, χρειάστηκε να διακοπεί η σύνδεση με το Αεροδρόμιο το διάστημα Φεβρουάριο-Σεπτέμβριο 2009, διάστημα κατά το οποίο οι συρμοί της γραμμής 3 τερματίζουν στο σταθμό Εθνική Άμυνα. Ο σταθμός Νομισματοκοπείο εγκαινιάστηκε

3. Διάνοιξη Σηράγγων και Κατασκευή Τροχιών

Ο συνηθέστερος και πιο αποτελεσματικός τρόπος διάνοιξης υπόγειων σηράγγων αποτελεί η χρήση του TBM (Tunnel Boring Machine) το οποίο αναφέρεται πολύ συχνά στην καθομιλουμένη ως «τυφλοπόντικας». Το TBM αποτελεί ένα άκρος εξειδικευμένο μηχάνημα που ευθύνεται για την εκσκαφή των γαιών, την απομάκρυνσή τους από έργο καθώς και για την τοποθέτηση των δακτυλίων από μπετό που πλαισιώνουν την σήραγγα. Τα κυριότερα μέρη που το απαρτίζουν απεικονίζονται στη συνέχεια:



Εικόνα 3.1 - Tunnel Boring Machine (Πηγή railsystem.net)

Με βάση τις γεωλογικές τομές που έχουν διεξαχθεί κατά τη διαδικασία μελέτης του έργου, το TBM εφοδιάζεται με τους κατάλληλους δίσκους εκσκαφής που αναλογούν στην εκάστοτε κατηγορία εδάφους. Επίσης έχει τη δυνατότητα διάνοιξης σήραγγας σε κυκλικές διατομές από 1,0 μέτρο έως και 17,6 μέτρα. Ταυτόχρονα έχουν τη δυνατότητα να ανασκάπτουν και μη κυκλικές σήραγγες, όπως για παράδειγμα σχήμα U ή πέταλο. Επιπρόσθετα, η διαδικασία της χάραξης της νέας γραμμής γίνεται με μεγάλη ακρίβεια εφόσον πρέπει να αποφεύγεται η υπόγεια διέλευση του έργου από εξαιρετικά ευαίσθητους δέκτες (π.χ. Μουσεία, κτίσματα μεγάλης πολιτισμικής κληρονομιάς καθώς και χώρους λατρείας) που ενδεχομένως να παρουσίαζαν υλικές ζημιές από τη λειτουργία του έργου. Το περίσσιο υλικό της εκσκαφής μεταφέρεται με τη βοήθεια ενός κοχλίου μεταφοράς σε έναν αυτόνομο θάλαμο περισυλλογής των προϊόντων εκσκαφής και απομακρύνεται με την ταινία μεταφοράς. Κατά τη διαδικασία διάνοιξης, το μηχάνημα πλαισιώνει την ήδη διανοιγμένη σήραγγα με προκατασκευασμένα τμήματα δακτυλίων κατασκευασμένα από οπλισμένο σκυρόδεμα.



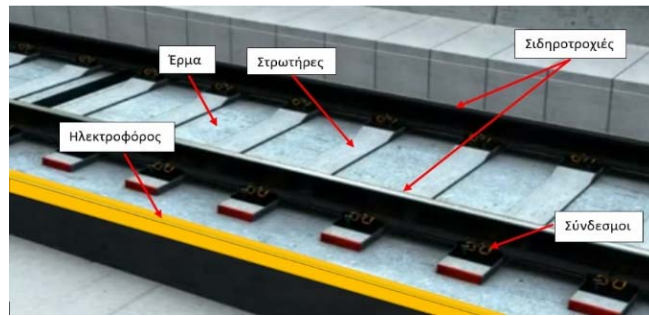
Εικόνα 3.2 - Διάνοιξη με TBM

(Πηγή tunnel-online.info)

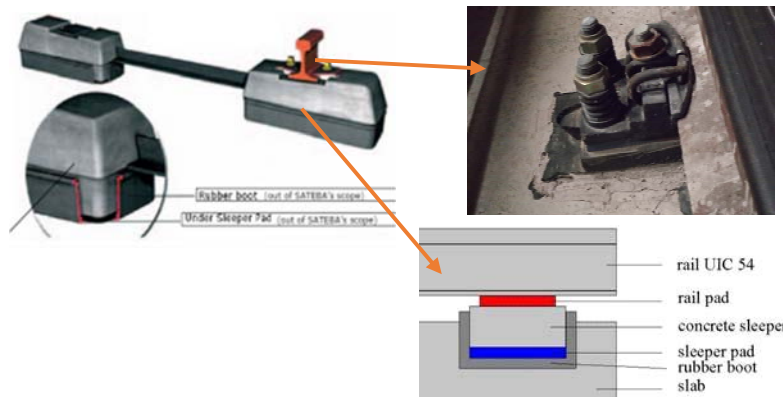
Μετά το πέρας της διεργασίας αυτής, κατασκευάζεται η σιδηροδρομική γραμμή. Η σιδηροδρομική γραμμή περιλαμβάνει δύο επί μέρους υποσυστήματα:

1. Την επιδομή, η οποία αποτελείται από την έδραση που έχει το έρμα σαν ανώτερη στρώση και τα χαρακτηριστικά υλικά γραμμής (σιδηροτροχιές, στρωτήρες, σύνδεσμοι, ελαστικά υποθέματα και ηλεκτροφόροι).
2. Την υποδομή, η οποία αποτελεί το σώμα πάνω στο οποίο κατασκευάζεται η επιδομή της γραμμής και περιλαμβάνει την στρώση διαμόρφωσης και την βάση ή υπόβαση.

Οι στρωτήρες έχουν σταθερή απόσταση μεταξύ τους ίση με 0,7m και είναι εγκιβωτισμένοι σε πλαστικούς θύλακες, που στην βάση τους διαθέτουν ελαστικά υποθέματα για επιπλέον απορρόφηση των κραδασμών. Η σιδηροτροχιά εδράζεται πάνω στον στρωτήρα με τη βοήθεια των ελασμάτων και των ελαστικών υποθεμάτων και ακολουθούν την ακόλουθη αλληλοδιαδοχή:



Εικόνα 3.3 - Μοντέλο 3D Επιδομής γραμμής μετρό

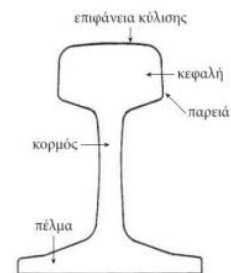


Εικόνα 3.4 - Λεπτομέρεια εγκιβωτισμένης σιδηροτροχιάς (Πηγή Περιβαλλοντική τεχνική & Θεσμικό πλαίσιο εφαρμογής)

Τα βασικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά των σιδηροτροχιών αποτελούν: η επιφάνεια κύλισης, η κεφαλή, οι παρειές, ο κορμός, το πέλμα καθώς και το εύρος των γραμμών, που είναι 1,435mm.



Εικόνα 3.5 - Απόσταση σιδηροτροχιών (Πηγή Συστήματα σταθερής τροχιάς)



Εικόνα 3.6 - λεπτομέρεια σιδηροτροχιάς

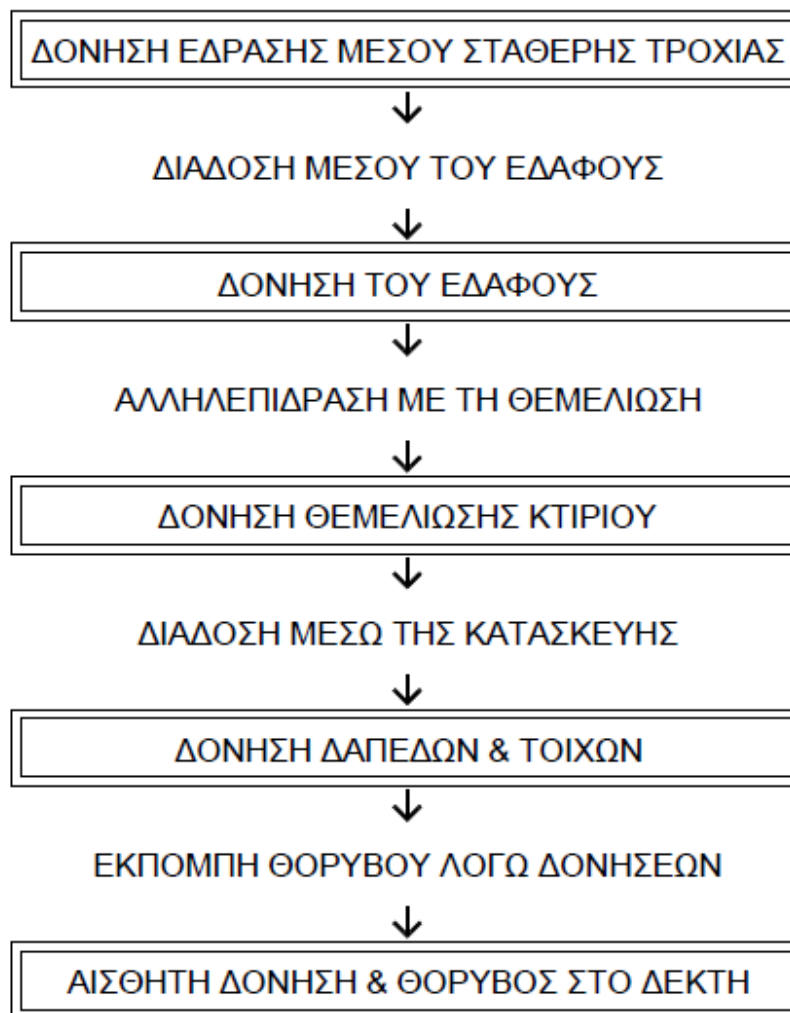
4. Εδαφομεταφερόμενος Θόρυβος

4.1 Βασικές παράμετροι εδαφομεταφερόμενου θορύβου

Κατά τη διέλευσή του, ο συρμός προκαλεί δονήσεις που διαδίδονται μέσω της σιδηροτροχιάς στη σήραγγα. Με τη σειρά της η σήραγγα μεταδίδει τις δονήσεις στο έδαφος και κατ' επέκταση στα κτίρια που εδράζονται στη γύρω περιοχή. Οι δονήσεις μεταφέρονται και ενδεχομένως ενισχύονται από την κατασκευή οπλισμένου σκυροδέματος με συνέπεια να πάλλονται οι τοίχοι και τα δάπεδα λόγω της εκπομπής εδαφομεταφερόμενου & δομόφερτου θορύβου. Ο θόρυβος αυτός, πολλές φορές είναι έντονα αντιληπτός και προκαλεί όχληση.

Για την ευκολότερη κατανόηση της άνωθεν διαδικασίας ακολουθεί σχηματική απεικόνιση στη συνέχεια:

Σχήμα 4.1 - Μετάδοση δονήσεων στον ευαίσθητο δέκτη



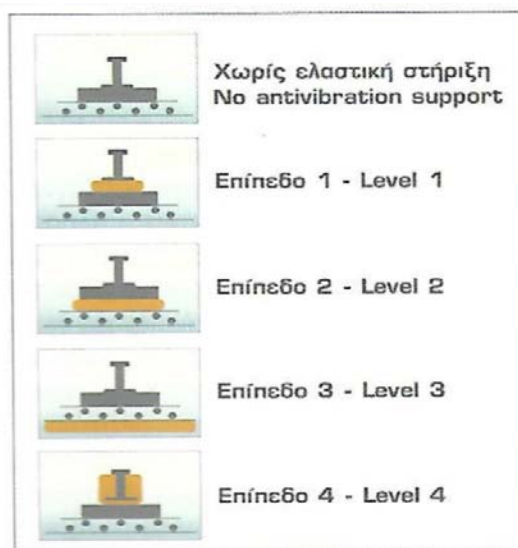
Οι κύριες παράμετροι που ασκούν επιρροή στις δονήσεις της σήραγγας και κατά συνέπεια στις εδαφομεταφερόμενες και δομόφερτες στάθμες θορύβου στα παρακείμενα κτίρια - δέκτες είναι:

- Ταχύτητα του τρένου: Για ταχύτητες εύρους 24-113 km/h, ο τριπλασιασμός της ταχύτητας έχει ως αποτέλεσμα 4 έως 6 dB αύξηση των σταθμών δονήσεων της σήραγγας, όπως και του εδάφους. Η μέγιστη ταχύτητα του συρμού του μετρό είναι τα 80 km/h.
- Αξονικό φορτίο: Αντιστοίχως, ο διπλασιασμός του αξονικού φορτίου έχει ως αποτέλεσμα 2 έως 4 dB αύξηση των σταθμών δονήσεων του τοιχώματος της σήραγγας, ανεξάρτητα από τον τύπο της σιδηροτροχιάς και την ταχύτητα του τρένου.
- Ανάρτηση αμαξώματος συρμού: Ο τύπος ανάρτησης του αμαξώματος στα τρένα της τελευταίας γενιάς είναι ανεξάρτητος από τις στάθμες δόνησης της σήραγγας. Ωστόσο, ορισμένες φορές έχει παρατηρηθεί ότι η κύρια ανάρτηση, που βρίσκεται μεταξύ του του αμαξώματος και του άξονα, δύναται να επηρεάσει τον δομόφερτο θόρυβο.
- Ειδικό τροχοί με ελαστικότητα (resilient wheels): Οι στάθμες δόνησης σε σήραγγα και σε ακτίνα συχνοτήτων από 40-250 Hz έχουν μειωθεί από 4 έως 10 dB μετά από την χρήση ειδικών τροχών με ελαστικότητα.
- Μη αναρτημένη Μάζα (Unsprung mass): Ως μη αναρτημένη μάζα, νοείται το τμήμα της γραμμής που βρίσκεται χωρίς καμία μόνωση ή αντικραδασμικό υλικό με τις ράγες. Δύναται να περιλαμβάνει τροχούς, άξονες κλπ. Επίσης, έχει παρατηρηθεί ότι ο υποδιπλασιασμός της μη αναρτημένης μάζας, μπορεί να μειώσει τις στάθμες δόνησης κατά 6 dB.
- Κατάσταση τροχών και σιδηροτροχιάς: Η κακή συντήρηση της σιδηροτροχιάς και των τροχών δύναται να προξενήσει στάθμες δονήσεων πολύ μεγαλύτερες σε σχέση με αυτές που, υπό κανονικές συνθήκες, θα προκαλούσε το σύστημα. Επιπλέον, η κακή κατάσταση τροχών, όπως ανωμαλίες, ασταθείς σύνδεσμοι ή/και σκουριασμένες τροχιές, μπορούν να αυξήσουν τις στάθμες δονήσεων από 10 έως και 20 dB. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι, οι τραχιές επιφάνειες της σιδηροτροχιάς ή του τροχού σε σιδηροτροχιές χωρίς συνδέσμους, μπορούν και πάλι - αν δεν υφίστανται σοβαρές ανωμαλίες των τροχών - να προκαλέσουν αύξηση της τάξης των 3-10 dB.
- Ειδικές αντιδονητικές συνδέσεις - εδράσεις: Φυσικά ηγετικό ρόλο παίζουν όχι μόνο οι ειδικές αντιδονητικές εδράσεις, οι οποίες εξασφαλίζουν τα «lateral friction free συστήματα», όπως για παράδειγμα πλωτές πλάκες (Floating Slabs), ειδικές ελαστικές συνδέσεις (Resilient rail fasteners) και ενθουλακωμένες τροχιές, αλλά όπως και το είδος του υλικού από το οποίο είναι κατασκευασμένη η σήραγγα, το πάχος των τοιχωμάτων της κλπ.

4.2 Τρόποι αντιμετώπισης εδαφομεταφερόμενου θορύβου

Σε πολλές περιπτώσεις τα αριθμητικά αποτελέσματα των επί τόπου μετρήσεων υπερβαίνουν τα σχετικά όρια που έχουν ορισθεί από τον κανονισμό, ειδικά όταν οι μετρήσεις αυτές γίνονται σε περιβάλλον που δεν παρέχει τις κατάλληλες προϋποθέσεις. Για παράδειγμα πολλές φορές στο σήμα καταγραφής της διέλευσης του συρμού παρατηρείται έντονος “θόρυβος” από διελεύσεις πεζών από το σημείο της μέτρησης ή και οχημάτων από τις πλησιέστερες οδούς. Για αυτό το λόγο οι μετρήσεις πρέπει να γίνονται κάτω από πολύ συγκεκριμένες συνθήκες. Βέβαια ενδέχεται τα αποτελέσματα των μετρήσεων, ακόμα και αν έχουν διεξαχθεί υπό σωστές συνθήκες, να υπερβαίνουν τα σχετικά όρια που έχουν ορισθεί από τον κανονισμό. Σύμφωνα με την διεθνή πρακτική, οι βασικοί εναλλακτικοί τρόποι αντιδονητικής στήριξης αστικών σιδηροδρομικών συστημάτων εξαρτώνται αποκλειστικά από την ανάγκη προστασίας παρακείμενων κτιρίων, κάτοικων ή άλλων ειδικών χρήσεων για τα οποία είναι αναγκαία η κατάλληλη αντιθορυβική και αντιδονητική προστασία και παρουσιάζονται στο σχετικό σκαρίφημα στη συνέχεια εκφρασμένα σε 4 βασικά επίπεδα:

- Επίπεδο 1 : απ’ ευθείας στήριξη της σιδηροτροχιάς σε ελαστικά υποθέματα ή λωρίδες ελαστομερούς υλικού
- Επίπεδο 2 : εφαρμογή ελαστικών υποθεμάτων ή πλακών κάτωθεν των «baseplates»
- Επίπεδο 3 : εφαρμογή πλωτής πλάκας
- Επίπεδο 4 : ελαστική ενθυλάκωση της σιδηροτροχιάς με ή χωρίς επιπλέον ελαστική στήριξη της



Εικόνα 4.1 - Μέτρα αντιθορυβικής προστασίας
(Πηγή Περιβαλλοντική τεχνική & Θεσμικό πλαίσιο εφαρμογής)

Οι ανωτέρω ενέργειες αποτελούν τις πλέον βασικές εναλλακτικές περιπτώσεις αντικραδασμικών εδράσεων για την ελαχιστοποίηση της όχλησης, είτε αυτή είναι δόνηση ή θόρυβος. Η επιλογή της καταλληλότερης εξ αυτών εξαρτάται αποκλειστικά και μόνον από την αναγκαιότητα εξασφάλισης μεγαλύτερης ή μικρότερης προστασίας για την κάλυψη των σχετικών κριτηρίων που θα χρειαστεί να εφαρμόζονται σε κάθε περίπτωση.

4.3 Μέγιστα επιτρεπόμενα όρια εδαφομεταφερόμενου θορύβου & ταχύτητας δονήσεων κατά τη λειτουργία

Τα επιτρεπόμενα όρια για εδαφομεταφερόμενο θόρυβο από την λειτουργία της Επέκτασης της Γραμμής 3 στον Πειραιά σύμφωνα και με τους σχετικούς ΑΕΠΟ του έργου της επέκτασης δίνονται στη συνέχεια:

- για την προστασία κατοικιών στα **40 dB(A)**,
- για τα ευαίσθητα κτήρια (Πανεπιστήμια, σχολεία Βιβλιοθήκες, νοσοκομεία, εκκλησίες, θέατρα, αρχαιολογικούς χώρους κλπ.) στα **35 dB(A)**, και
- για αίθουσες συναυλιών και στούντιο TV στα **25 dB(A)**.

Παράλληλα, το αντίστοιχο όριο για τις εκπεμπόμενες δονήσεις (μέγιστη ταχύτητα δόνησης στη διεύθυνση z) στο φάσμα συχνοτήτων 10-200Hz, κατά τη λειτουργία σιδηροδρομικών έργων έχει ορισθεί ως ακολούθως:

- **0,5 mm/sec** για κατοικίες και λοιπά ευαίσθητα κτήρια,
- **0,2 mm/sec** για αρχαιολογικούς χώρους, και
- σε περίπτωση εφαρμογής πλωτών πλακών (ΠΠ - FS/Floating Slabs) σε αρχαιολογικά μουσεία η αποτελεσματικότητα τους θα επιβάλλεται να εξασφαλίζει επιπλέον και την τιμή των **25 μm/sec** ή **0,025 mm/sec** της ταχύτητας δόνησης στο εσωτερικό της πλησιέστερης υπό προστασία χρήσης.

Πίνακας 4.1 - Μέγιστα επιτρεπόμενα επίπεδα εδαφομεταφερόμενου θορύβου

Κατηγορία Περιοχής	Μονοκατοικίες	Πολυκατοικίες	Ξενοδοχεία
Περιοχές κατοικίας με χαμηλή πυκνότητα	30 dB(A)	35 dB(A)	40 dB(A)
Περιοχές κατοικίας με μέση πυκνότητα	35 dB(A)	40 dB(A)	45 dB(A)
Περιοχές κατοικίας με υψηλή πυκνότητα	35 dB(A)	40 dB(A)	45 dB(A)
Εμπορικές περιοχές	40 dB(A)	45 dB(A)	50 dB(A)
Βιομηχανικές περιοχές/αυτοκινητόδρομοι	40 dB(A)	45 dB(A)	50 dB(A)

Πίνακας 4.2 - Μέγιστες επιτρεπόμενες στάθμες εδαφομεταφερόμενου θορύβου

Τύπος κτιρίου ή χώρου	Μέγιστες Επιτρεπόμενες Στάθμες Εδαφομεταφερόμενου θορύβου σε dB(A)
Αίθουσες Συναυλιών	16
Studio ραδιοφώνου και τηλεόρασης	25
Μουσεία, Αίθουσες ακρόασης και μουσικής	30*
Εκκλησίες και θέατρα	35
Νοσοκομειακοί θάλαμοι, Επεμβάσεων και ασθενών	35-40
Δικαστήρια και Κοινοβούλιο	35
Σχολεία και Βιβλιοθήκες	40
Κτίρια Πανεπιστημίων	35-40
Γραφεία	35-45
Εμπορικά κτίρια	45-55

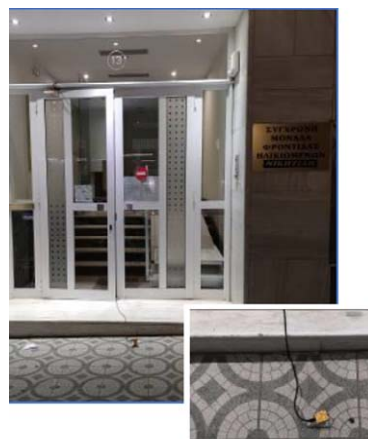
* Σημ.: Τα παραπάνω οριζόμενα επίπεδα αφορούν το μέγιστο επιτρεπόμενο επίπεδο θορύβου, καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας και νύχτας, ενός μεμονωμένου ή επαναλαμβανόμενου συμβάντος και ομαλής ή κατ' εξαίρεση λειτουργίας.

5. Η Παρούσα Μεταπτυχιακή Εργασία

5.1 Η δυσκολία της εκπόνησης μετρήσεων

Μια από τις σπουδαιότερες και σημαντικότερες αρμοδιότητες ενός μηχανικού, είναι η διασφάλιση της καλύτερης δυνατής ποιότητας ζωής για τους συμπολίτες του. Όσον αφορά τις δονήσεις και κατ' επέκταση τον εδαφομεταφερόμενο θόρυβο που παράγεται από τη διέλευση υπόγειων μέσων σταθερής τροχιάς, ο μόνος δυνατός τρόπος ελέγχου της διασφάλισής της είναι οι συστηματικές καταγραφές των μεγεθών αυτών. Ωστόσο, τα μέτρα που πρέπει να ληφθούν για την ορθή και ακέραιη εκπόνησή τους είναι πολυάριθμα. Η καταγραφή των δονήσεων αποτελεί μια πολύ ευαίσθητη καταγραφή, μιας και μπορεί να επηρεαστεί από πολλούς εξωτερικούς παράγοντες. Οι κυριότεροι από αυτούς είναι:

- Η ευαισθησία των καταγραφικών οργάνων: σε περίπτωση που οι δονήσεις έχουν πολύ μικρό πλάτος απαιτούνται όργανα με εξαιρετικά μεγάλη ευαισθησία (π.χ. 100V/g) για να μπορέσουν να αποτυπωθούν.
- Περιβαλλοντικός θόρυβος: όσο πιο ευαίσθητα είναι τα όργανα τόσο πιο ευνοϊκές συνθήκες καλείται να παρέχει ο μελετητής γιατί είναι πολύ επιρρεπή στην καταγραφή δονήσεων από άλλες πηγές. Για αυτό το λόγο οι μετρήσεις αυτές, ως επί το πλείστον, γίνονται τις πολύ πρωινές ώρες (π.χ. 2-6) με συρμούς που είναι αφιερωμένοι (dedicated) στον σκοπό αυτό. Με αυτόν τον τρόπο αποφεύγονται σφάλματα που μπορεί να είχαν προέλθει από την κίνηση οχημάτων στις πλησιέστερες οδούς ή/ και διελεύσεις πεζών.
- Μετεωρολογικές συνθήκες: δεν είναι λίγες οι φορές που έχει διαπιστωθεί πως τα αποτελέσματα των μετρήσεων έχουν επηρεαστεί από δυνατές βροχοπτώσεις και χαλάζι. Η παρουσία του μελετητή και βοηθών: Οι μετρήσεις αυτές πρέπει να γίνονται με εκπαιδευμένο συνεργείο μιας και πρέπει να βρεθεί το ιδανικό σημείο μέτρησης (συμπαγής επιφάνεια ακριβώς πάνω από την γραμμή διέλευσης των συρμών) ή μπορεί να χρειαστεί να αποκλεισθεί η διέλευση οχημάτων σε συγκεκριμένες οδούς κατά την διέλευση του συρμού, αν η μέτρηση γίνεται στην ελεύθερη επιφάνεια. Στην περίπτωση που η μέτρηση κριθεί πως πρέπει να γίνει μέσα στη σήραγγα πρέπει να ακολουθηθεί ένα πολύ αυστηρό πρωτόκολλο για την ασφάλεια του συνεργείου αλλά και για την αξιοπιστία της μέτρησης.



Εικόνα 5.1 - Υπέργεια μέτρηση ταχύτητας δόνησης



Εικόνα 5.2 - Υπόγεια μέτρηση ταχύτητας δόνησης

Κατά συνέπεια τέτοιες μετρήσεις, που να καλύπτουν όλες αυτές τις προϋποθέσεις, είναι αρκετά λίγες και η σπάνια συχνότητα εμφάνισής τους έγκειται στο γεγονός ότι πρόκειται για μετρήσεις με αρκετές απαιτήσεις και προκλήσεις.

5.2 Το αντικείμενο μελέτης

Ο εδαφομεταφερόμενος θόρυβος, ο οποίος μεταφέρεται στην ελεύθερη επιφάνεια από την διέλευση των υπόγειων μέσων σταθερής τροχιάς, επηρεάζεται από αρκετούς παράγοντες. Οι κυριότεροι από αυτούς αναφέρονται στη συνέχεια:

1. Τη χάραξη της σήραγγας (οριζοντιογραφία)
2. Το βάθος της σήραγγας (μηκοτομή)
3. Η απόσταση του ευαίσθητου δέκτη από την πηγή όπου δημιουργείται ο θόρυβος
4. Εδαφικές συνθήκες (κατηγορία εδάφους)
5. Το ποσοστό ιδιομορφικής απόσβεσης του εδάφους
6. Ο αριθμός ορόφων του προς μελέτη κτιρίου καθώς και το βάθος θεμελίωσής του
7. Η μάζα του κτιρίου
8. Τα υλικά κατασκευής της σήραγγας αλλά και του κτιρίου.

Στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία θα γίνει μια προσπάθεια να αξιολογηθούν οι συνέπειες της διέλευσης των υπόγειων συρμών του μετρό σε ένα κτίριο από οπλισμένο σκυρόδεμα που βρίσκεται στην εγγύτητα του έργου. Στην προκειμένη περίπτωση, θα μελετηθεί ένα οίκος ευγηρίας στη Νίκαια όπου βρίσκεται ακριβώς πάνω από ένα σημείο διέλευσης της νέας επέκτασης της γραμμής 3 του μετρό. Φυσικά έχουν συλλεχτεί όλα τα απαραίτητα δεδομένα, όπως αναφέρονται ανωτέρω, για την ορθή, έγκυρη και αντιπροσωπευτική δημιουργία του προσομοιώματος. Τα δεδομένα τα οποία έχουν εξαχθεί και θα σχολιαστούν στην συνέχεια περιλαμβάνουν θέσεις οι οποίες βρίσκονται στην ελεύθερη επιφάνειά του εδάφους, στο εσωτερικό του κτιρίου καθώς και μέσα στην σήραγγα.

5.3 Προηγούμενες έρευνες

Τα τελευταία χρόνια η επιστημονική κοινότητα έχει στρέψει το ενδιαφέρον της σε αρκετά μεγάλο βαθμό στο περιβάλλον και στις περιβαλλοντικές επιπτώσεις των έργων. Ο θόρυβος, είτε αερόφερτος είτε εδαφομεταφερόμενος, έχει γίνει αντικείμενο αρκετών μελετών και η αντιμετώπισή του αποτελεί φλέγον ζήτημα για τους μηχανικούς. Ειδικά για τον αερόφερτο θόρυβο που είναι και πιο εύκολη η διαδικασία μέτρησής του έχουν αναπτυχθεί εξαιρετικά καινοτόμα προγράμματα για την πρόβλεψή του. Αντιθέτως η πρόβλεψη του εδαφομεταφερόμενου θορύβου προϋποθέτει τη δημιουργία περίπλοκων - γεωμετρικά - μοντέλων για την ακριβή προσομοίωση κάθε περίπτωσης που μελετάται.

6. Μόρφωση Προσομοιωμάτων

6.1 Προσομοίωση με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων

Για την επίλυση του προσομοιώματος χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων, η οποία αποτελεί μια αριθμητική μεθοδολογία υπολογισμού προσεγγιστικών λύσεων μιας σειράς διαφορικών εξισώσεων. Η βασική αρχή που διέπει τη μεθοδολογία αυτή είναι ο διαμερισμός μιας αρχικά σύνθετης και περίπλοκης γεωμετρίας σε ένα υποσύνολο απλούστερων στοιχείων, τα οποία ονομάζονται πεπερασμένα. Η μεθοδολογία αυτή είναι ευρέως διαδεδομένη μιας και αποτελεί ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο για την επίλυση στατικών και δυναμικών προσομοιωμάτων ανεξαρτήτως της γραμμικότητας τους. Τα προσομοιώματα μπορούν να έχουν τελείως τυχαία γεωμετρία, ραβδωτοί, επιφανειακοί και χωρικοί φορείς ή ακόμα και συνδυασμό τους καθώς και για οποιαδήποτε φόρτισή τους και για οποιεσδήποτε συνοριακές συνθήκες.

Στην παρούσα εργασία, περιλαμβάνονται όλες οι παραδοχές που έχουν γίνει, η πλήρης περιγραφή του προσομοιώματος καθώς και τα αποτελέσματα που έχουν προκύψει από την ανάλυση. Το προσομοίωμα που χρησιμοποιήθηκε έχει μορφωθεί σε 3 διαστάσεις (3D) με τη βοήθεια αρκετών προγραμμάτων. Η τελική ανάλυσή του έγινε στο ABAQUS της SIMULIA, ένα πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων με αναρίθμητες δυνατότητες για την ανάλυση προσομοιωμάτων παντός τύπου.

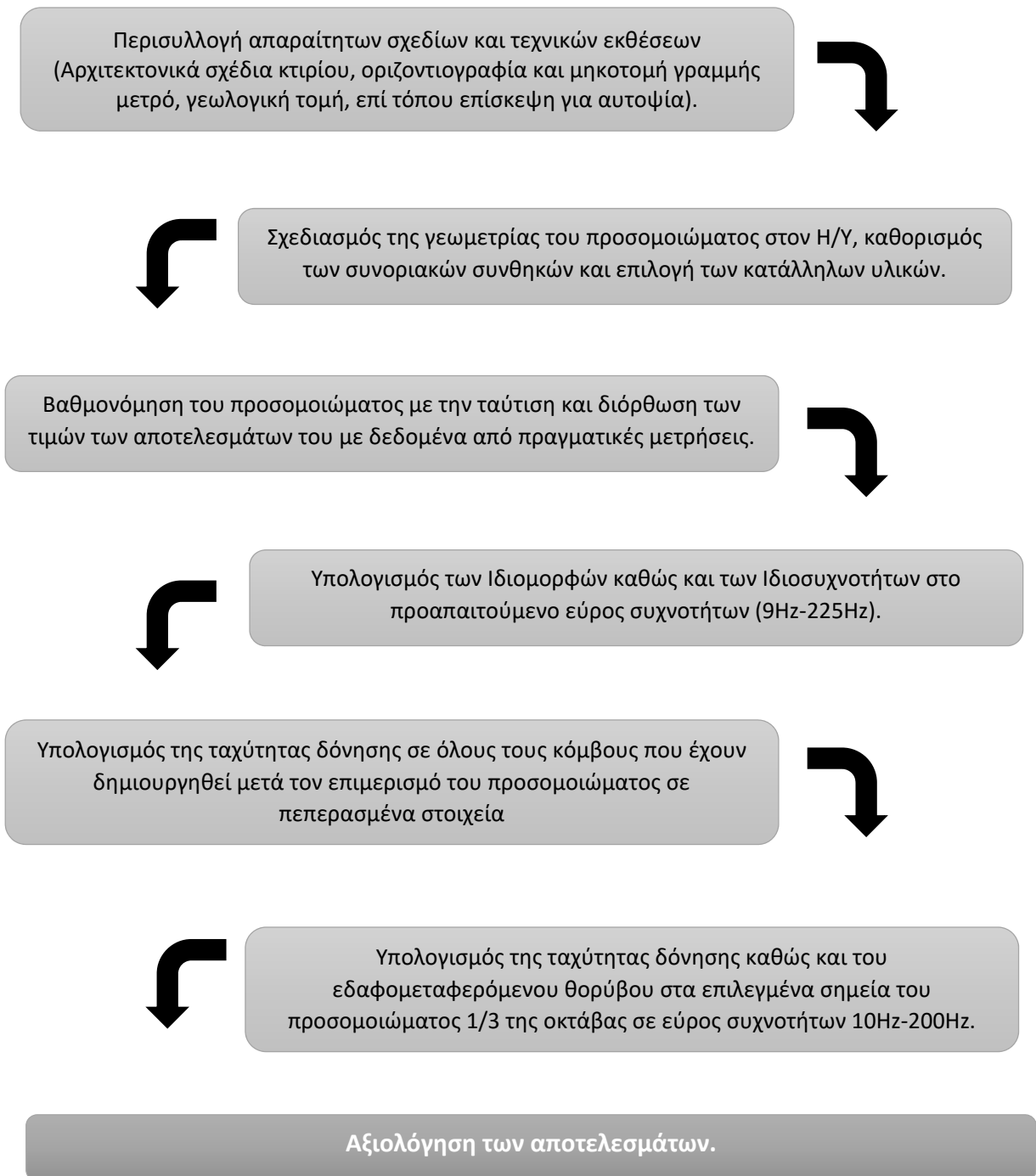
Ένας από τους κυριότερους παράγοντες που έπρεπε να ληφθούν υπόψιν είναι η πιθανή εμφάνιση σφαλμάτων. Η φύση των σφαλμάτων μπορεί να ποικίλει και η σημαντικότητά τους θα μπορούσε να επηρεάσει την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων της ανάλυσης. Τα σφάλματα αυτά θα μπορούσαν να κατηγοριοποιηθούν ως ακολούθως:

- Σφάλμα γεωμετρίας προσομοιώματος, τα οποία προκύπτουν από το βαθμό πιστότητάς του προσομοιώματος ως προς τον πραγματικό προς μελέτη φορέα
- Σφάλματα διακριτοποίησης του φορέα σε πεπερασμένα στοιχεία, τα οποία προκύπτουν από την πυκνότητα του δικτύου των πεπερασμένων στοιχείων καθώς και από τον τρόπο που έχει γίνει η διακριτοποίηση. Πιο συγκεκριμένα, όσο πιο αραιό είναι το δίκτυο τόσο αυξάνεται η πιθανότητα εμφάνισης σφάλματος στα αποτελέσματα.
- Σφάλματα αριθμητικού χαρακτήρα, τα οποία οφείλονται κυρίως στον ανθρώπινο παράγοντα.
- Σφάλματα πιστότητας αναπαράστασης υλικών, τα οποία οφείλονται στην έλλειψη στοιχείων για κάποιο συγκεκριμένο τμήμα του φορέα πέραν της γεωμετρίας του, όπως π.χ. ο τύπος του υλικού του ή ακόμα και η κόπωση του υλικού.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα βήματα τα οποία ακολουθήθηκαν για την γενική διαδικασία υπολογισμού των απαραίτητων μεγεθών καθώς και των αποτελεσμάτων που εξάχθηκαν από την ανάλυση:

Διαδικασία υπολογισμού ταχύτητας δόνησης και εδαφομεταφερόμενης στάθμης θορύβου:

Σχήμα 6.1 - Διαδικασία υπολογισμού αποτελεσμάτων

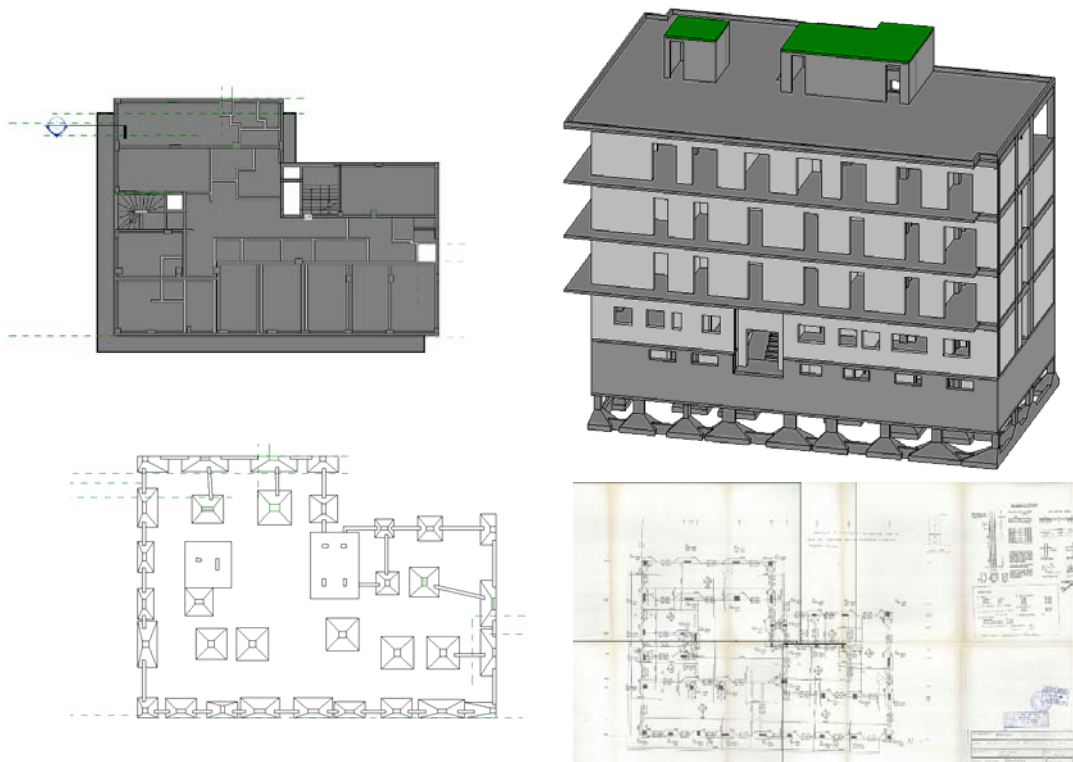


6.2 Βασικά σχέδια

6.2.1 Σχεδιασμός κτιρίου

Ύστερα από συνεννόηση με τον οίκο ευγηρίας Νικητίδη τα πρωτότυπα (hardcopy) σχέδια του κτιρίου ψηφιοποιήθηκαν και σχεδιάστηκαν σε κλίμακα στο σχεδιαστικό πρόγραμμα AutoCAD της Autodesk. Κατά την διαδικασία αυτή, για πολλά μεγέθη που δεν ήταν ορθώς αποτυπωμένα ή και καθόλου έγιναν εύλογες παραδοχές, οι οποίες θα αναγράφονται στο τέλος του υποκεφαλαίου. Έχοντας όλα τα σχέδια ως γνώμονα ξεκίνησε η διαδικασία τρισδιάστατης (3D) αποτύπωσης. Το πρόγραμμα που επιλέχθηκε για την διαδικασία αυτή είναι το Revit της Autodesk. Το προσομοίωμα μορφώθηκε με κάποιους κανόνες κατά νου για την αποφυγή οποιουδήποτε είδους σφάλματος:

- Εμμένοντας στην αρχική γεωμετρία που έχει υποδειχτεί από τα ψηφιοποιημένα σχέδια, γίνεται μια προσπάθεια να γίνει όσο το δυνατόν πιο απλοϊκή η γεωμετρία, δίνοντας έμφαση και λεπτομέρεια μόνο στα σημεία ενδιαφέροντος (τοιχοποιία, κουφώματα, σκελετός κτιρίου από οπλισμένο σκυρόδεμα κ.α.).
- Ένωση όλων των τμημάτων του κτιρίου (join) μεταξύ τους. Πιο αναλυτικά, όλα τα δοκάρια να είναι πακτωμένα με τα υποστυλώματα αλλά και με τις παρακείμενες τοιχοποιίες.
- Κάθε στοιχείο να έχει μόνο μία ιδιότητα υλικού, δηλαδή, έχει δοθεί ιδιαίτερη προσοχή να μην έχει γίνει υπερκάλυψη υλικών π.χ. ένα στοιχείο να έχει ως υλικό του το μπετόν αλλά και την τοιχοποιία.



Εικόνα 6.1 - Προσομοίωση κτιρίου και ενδεικτικά σχέδια

ΠΑΡΑΔΟΧΕΣ

- Όλες οι πλάκες σχεδιάστηκαν με πάχος $d=14\text{cm}$
- Σε περιπτώσεις εσωτερικών τοίχων χωρίς αποστάσεις, έγινε μέτρηση από το ψηφιοποιημένο σχέδιο το οποίο είναι υπό κλίμακα
- Οι εξωτερικοί τοίχοι από μπετόν αλλά και από τούβλα καθώς και τα τοιχεία (περιμετρικά από τον ανελκυστήρα και τη σκάλα) έχουν πάχος 30cm
- Η απλή τούβλινη τοικοποιία εντός του κτιρίου έχει πάχος 10cm
- Όλα τα ανοίγματα για τις μονές πόρτες καθώς και για τις μπαλκονόπορτες έχουν ύψος 220cm και πλάτος 80cm
- Όλα τα ανοίγματα για τις διπλές πόρτες καθώς και για τις μπαλκονόπορτες έχουν ύψος 240cm και πάχος 200cm
- Όλα τα παράθυρα είναι σε ύψος 100cm εκτός από το του ημιυπογείου που είναι σε ύψος 180cm
- Το κτίριο σχεδιάστηκε με όλες τις πλευρές του κάθετες η μια προς την άλλη, αν και στα σχέδια παρουσιάζεται πως υπάρχει μια ελαφριά κλίση στην βόρεια πλευρά του.

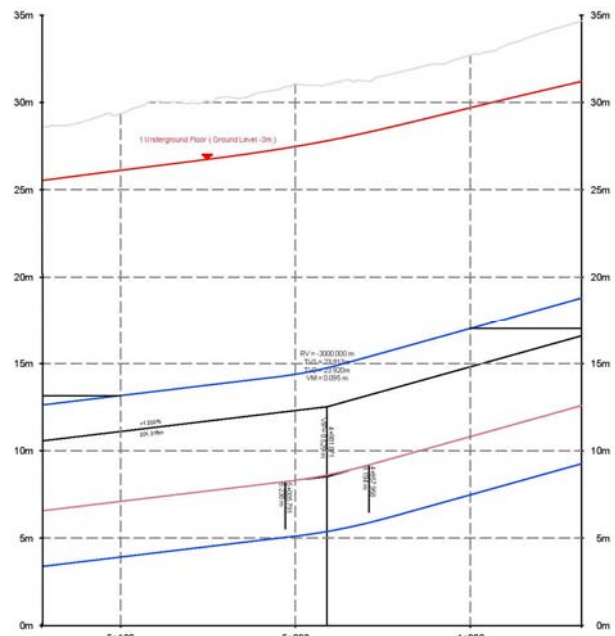
6.2.2 Σχεδιασμός σήραγγας

Για τον ακριβή σχεδιασμό της σήραγγας καθώς και όλων των επιμέρους χαρακτηριστικών της, χρησιμοποιήθηκε η οριζοντιογραφία και η μηκοτομή του έργου επέκτασης της γραμμής 3 Αγία Μαρίνα-Νίκαια. Από τα σχέδια αυτά διαπιστώθηκε πως η σήραγγα στο υπό εξέταση τμήμα:

- Βρίσκεται σε στροφή ακτίνας 350m (οριζοντιογραφία)
- Έχει κλίση 2% (μηκοτομή)

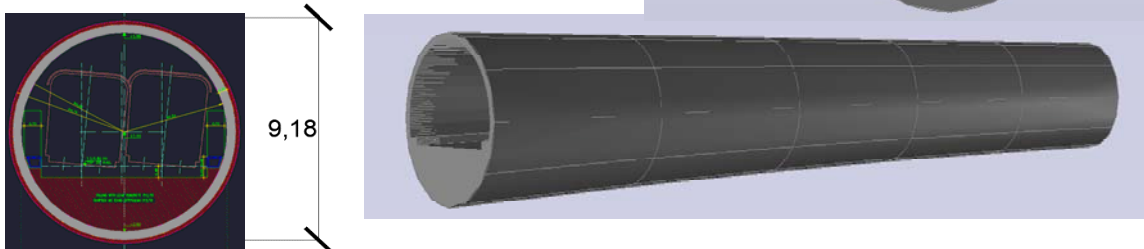


Εικόνα 6.2 - Οριζοντιογραφία περιοχής μελέτης



Εικόνα 6.3 - Μηκοτομή περιοχής μελέτης

Επιπροσθέτως, μετά από επί τόπου επίσκεψη στο προς μελέτη τμήμα για την εκπόνηση μετρήσεων ταχύτητας δόνησης, εξακριβώθηκε ποια τυπική διατομή έπρεπε να χρησιμοποιηθεί στο προσομοίωμα. Πρόκειται για μία τυπική διατομή διπλής τροχιάς με ακτίνα 4,59m, της οποίας η διάνοιξη έγινε με TBM. Αφού σχεδιάστηκε η διατομή αυτή στο AutoCAD εισάχθηκε στο Inventor της Autodesk για την τρισδιάστατη επεξεργασία της, βάσει των ανωτέρω.

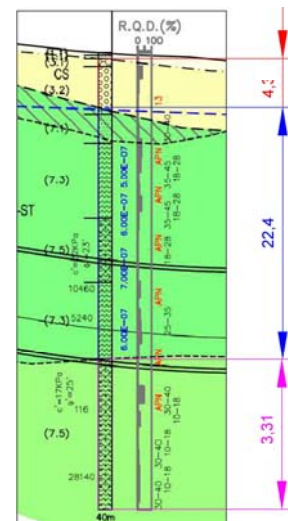


Εικόνα 6.4 - Προσομοίωση σήραγγας

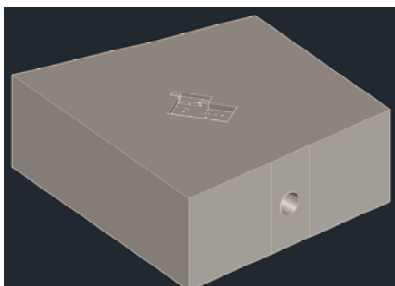
6.2.3 Σχεδιασμός εδάφους και τελική σύνθεση

Αφού ολοκληρώθηκαν τα βασικά τμήματα του προσομοιώματος (κτίριο και σήραγγα) και αφού έλαβαν την ακριβή θέση τους στο προσομοίωμα, ακολούθησε η προσομοίωση των εδαφικών συνθηκών. Το έδαφος σχεδιάστηκε ως το αρνητικό περιτύπωμα που εγκιβωτίζει την σήραγγα καθώς και ένα μέρος του κτιρίου (θεμέλια και υπόγειο). Έχοντας τη γεωλογική τομή του εδάφους στο ενδιαφερόμενο τμήμα καθορίστηκε η ακριβής διαστρωμάτωση που απαιτείται σε κάθε περίπτωση. Το τελικό προσομοίωμα του εδάφους έχει διαστάσεις 98,3(μήκος) X 87,1(πλάτος) X 36,1(ύψος) και περιλαμβάνει τρεις ζώνες από διαφορετική κατηγορία εδάφους:

- 1^η ζώνη: από 0 έως 4,3 και κατηγορία εδάφους 1
- 2^η ζώνη: από 4,3 έως 26,7 και κατηγορία εδάφους 3
- 3^η ζώνη: από 26,7 έως 36,1 και κατηγορία εδάφους 4



Εικόνα 6.5 - Γεωλογική τομή περιοχή μελέτης



Εικόνα 6.6 - Προσομοίωση εδάφους

Έχοντας ολοκληρώσει την διαδικασία της τρισδιάστατης σχεδίασης των τμημάτων του προσομοιώματος στα διάφορα προγράμματα της Autodesk, εισάχθηκαν με την μορφή .SAT και .STP στο Abaqus της SIMULIA για την τελική σύνθεση και τη διαδικασία της ανάλυσης.

6.3 Στοιχεία και παράμετροι του Abaqus

Στη συνέχεια παρατίθενται όλες οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν από το πρόγραμμα Abaqus για την ανάλυση και διεξαγωγή αποτελεσμάτων για το εν λόγω προσομοίωμα.

-

Πίνακας 6.1 - Μονάδες μέτρησης

Μεγέθη	Μονάδες Μέτρησης
Μήκος	m
Δύναμη	KN
Μάζα	Mgr
Πυκνότητα	Mgr/m ³
Δυσκαμψία	KN/m
Μέτρο Ελαστικότητας	KPa

-

Πίνακας 6.2 - Κατηγοριοποίηση εδαφών με βάση το μέτρο ελαστικότητάς τους

Κατηγορίες Εδάφους	Μέτρο Ελαστικότητας ανά κατηγορία
1	100.000
2	400.000
3	900.000
4	5.500.000
5	18.000.000

-

Πίνακας 6.3 - Τύποι στοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν κατά την προσομοίωση

Κωδικοποίηση στοιχείου	Ονομασία
C3D10	Τετράεδρο με δέκα κόμβους
B31	Τρισδιάστατο Γραμμικό

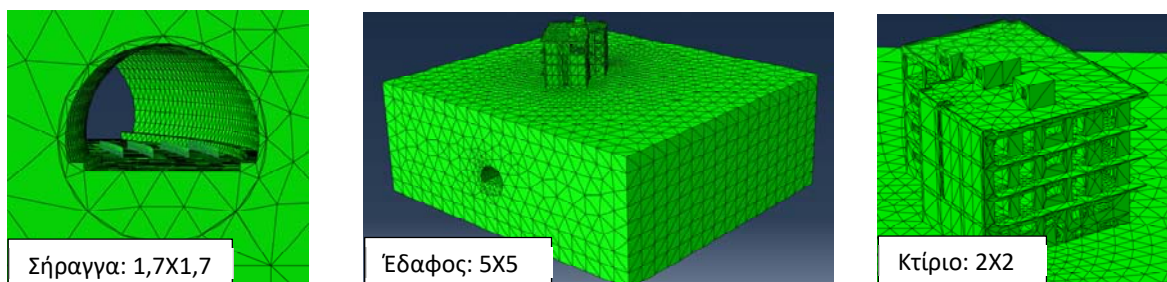
- Πίνακας 6.4 - Υλικά που χρησιμοποιήθηκαν

Υλικά	Μέτρο Ελαστικότητας ανά κατηγορία
Σκυρόδεμα κτιρίου	Πυκνότητα: 2,5 Mgr/m ³
	Μέτρο Ελαστικότητας: 21.000.000 KPa
	Λόγος Poisson: 0,25
Σκυρόδεμα σήραγγας	Πυκνότητα: 2,5 Mgr/m ³
	Μέτρο Ελαστικότητας: 31.000.000 KPa
	Λόγος Poisson: 0,25
Τούβλινη τοικοποιία	Πυκνότητα: 2,5 Mgr/m ³
	Μέτρο Ελαστικότητας: 1.000.000 KPa
	Λόγος Poisson: 0,25
Έδαφος	Πυκνότητα: 1,8 Mgr/m ³
	Μέτρο Ελαστικότητας: Ανάλογα με την κατηγορία Εδάφους
	Λόγος Poisson: 0,25

Έγινε η παραδοχή για όλα τα υλικά πως έχουν 7% ιδιομορφική απόσβεση.

6.4 Δίκτυο πεπερασμένων στοιχείων

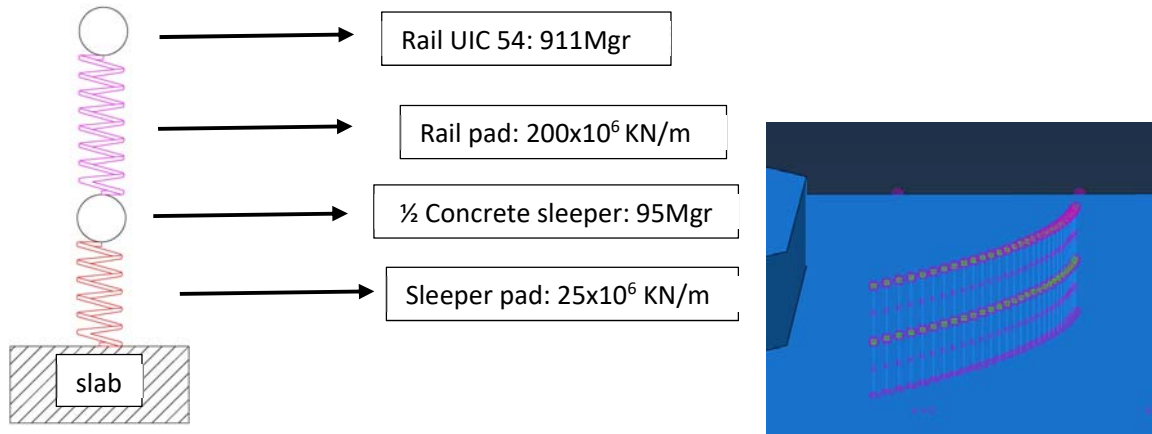
Έχοντας κάνει την τελική σύνθεση του προσομοιώματος, με όλα τα διακριτά τμήματά του και έχοντας όλες τις προαναφερθείσες παραμέτρους στο πρόγραμμα, η διαδικασία που έπεται είναι η διακριτοποίηση του προσομοιώματος με ένα δίκτυο πεπερασμένων στοιχείων. Με βάση τη λεπτομέρεια που χρειαζόταν κάθε τμήμα του προσομοιώματος για την ορθή και αντιπροσωπευτική ερμηνεία των αποτελεσμάτων, επιλέχθηκε άλλη πυκνότητα δικτύου πεπερασμένων στοιχείων. Όσο περισσότερη λεπτομέρεια χρειαζόταν τόσο πιο πυκνό έπρεπε να είναι το δίκτυο. Ο λόγος που επιλέχθηκε αραιότερο δίκτυο στα τμήματα ήσσονος σημασίας είναι διότι ο αριθμός των πεπερασμένων στοιχείων, και κατ' επέκταση το πόσο πυκνό είναι το δίκτυο, καθορίζει τον χρόνο που χρειάζεται το πρόγραμμα για να υπολογίσει τα αποτελέσματα και επηρεάζει την ακρίβεια αυτών των αποτελεσμάτων. Έτσι επιλέχθηκαν οι παρακάτω πυκνότητες στα τμήματα του προσομοιώματος:



Εικόνα 6.7 - Πυκνότητα δικτύου στα επιμέρους προσομοιώματα

6.5 Προσομοίωση σιδηροτροχιάς

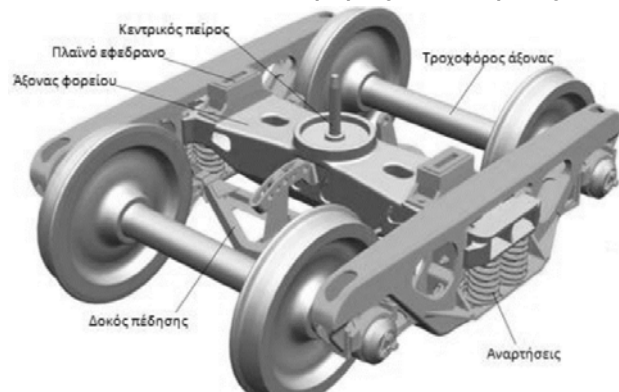
Για την ορθότερη και ακριβέστερη προσομοίωση της σιδηροτροχιάς χρησιμοποιήθηκε ένα σύστημα ελατηρίων και μαζών το οποίο περιγράφεται αναλυτικά στο κάτωθεν σχήμα μαζί με τις τιμές των μεγεθών που χρησιμοποιήθηκαν για την μόρφωση:



Εικόνα 6.8 - Προσομοίωση σιδηροτροχιάς

6.6 Μη αναρτημένη μάζα

Η μη αναρτημένη μάζα, σ' ένα όχημα ή τμήμα μέσου σταθερής τροχιάς, είναι η συνολική μάζα της ανάρτησης, οι τροχιές ή οι τροχοί (ανάλογα με την περίπτωση) και άλλα εξαρτήματα, τα οποία βρίσκονται χωρίς καμία μόνωση ή αντικραδασμικό υλικό με τις ράγες, αντί να υποστηρίζονται από αυτή. Στη μη αναρτημένη μάζα συγκαταλέγονται η μάζα εξαρτημάτων, όπως οι άξονες των τροχών, οι πλήμνες των τροχών, τα ρουλεμάν των τροχών, τα ελαστικά και ένα μέρος του βάρους των κινητήριων αξόνων, των αμορτισέρ, των ελατηρίων και των ζεύξεων ανάρτησης. Η μάζα τους θεωρείται επίσης μέρος της μάζας που δεν ξεπλένεται, αν τα φρένα του οχήματος είναι τοποθετημένα έξω (δηλαδή μέσα στον τροχό). Έχει βρεθεί ότι ο υποδιπλασιασμός αυτής της μάζας, δύναται να μειώσει τη στάθμη δόνησης κατά 6 dB. Η εν λόγω μάζα λαμβάνεται ίση με 1822 Mgr/άξονα και αφορά τέσσερις συγκεντρωμένες μάζες των 911 Mgr που εφαρμόζονται στους κόμβους της τροχιάς.

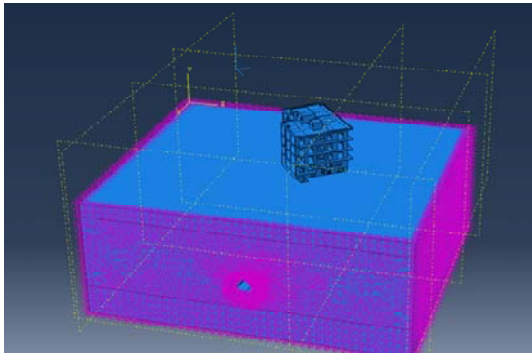


Εικόνα 6.9 - Λεπτομέρεια bogie

(Πηγή railway-technical.com)

6.7 Συνοριακές συνθήκες

Στη συνέχεια έπρεπε να ορισθεί ο τρόπος που θα γίνει εμφανή η συνέχεια του προσομοιώματος στο άπειρο. Πιο αναλυτικά, το προσομοίωμα στο στάδιο που βρίσκεται δεν φαίνεται να έχει καμία εξωτερική στήριξη (πάκτωση, άρθρωση ή κύλιση), επίσης πρέπει να προσομοιωθεί η τεχνητή συνέχεια του προσομοιώματος στο άπειρο για να αποφευχθούν τυχόν ανακλάσεις στις άκρες του. Για την επίλυση του προβλήματος αυτού εφαρμόστηκε η τεχνική εισαγωγής αποσβεστήρων και ελατηρίων. Με βάση τη μεθοδολογία αυτή όλα τα τμήματα του ημίχωρου όπου θα έπρεπε να έχουν κάποια συνέχεια πλαισιώνονται από ελατήρια και αποσβεστήρες τριών βαθμών ελευθερίας.



Εικόνα 6.10 - Σύστημα ελατηρίων και αποσβεστήρων

Όπως είναι εμφανές και στην φωτογραφία 6.10 με μωβ χρώμα απεικονίζεται το σύστημα των ελατηρίων και των αποσβεστήρων του προσομοιώματος. Το κάθε σύστημα έχει εφαρμοστεί σε κάθε ένα κόμβο που έχει δημιουργηθεί στις πλευρές αυτές μετά τη διακριτοποίηση σε πεπερασμένα στοιχεία.

Με τη διαδικασία αυτή, το σύστημα ελατηρίων-αποσβεστήρων προσομοιάζει με μεγάλη ακρίβεια την απόσβεση των δονήσεων που θα συνέβαινε στη μη

υπαρκτή συνέχεια του εδαφικού υλικού. Εμφανές είναι επίσης πως στα τμήματα με πιο πυκνό δίκτυο πεπερασμένων στοιχείων υπάρχουν περισσότερα συστήματα ελατηρίων-αποσβεστήρων.

Τα βασικά μεγέθη υπολογίστηκαν με τη βοήθεια των ακόλουθων τύπων:

- Μέτρο διάτμησης : $G = \frac{E}{(2 \times \nu + 1)}$
- Ταχύτητα διάδοσης κυμάτων S :
 $V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$
- Ταχύτητα διάδοσης κυμάτων P :
 $V_p = \sqrt{\frac{G \times 2 \times (1 - \nu)}{\rho \times (1 - 2 \times \nu)}}$

Εμβαδόν στοιχείου : $A = \text{Κάναβος}(5) \times \text{Πάχος δοκιμίου}(5)$

Συντελεστής Αποσβεστήρα κυμάτων S :

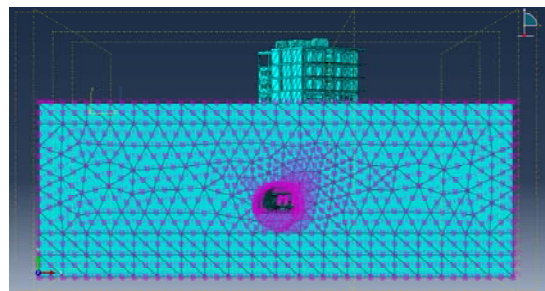
$$C_s = \rho \times V_s \times A$$

Συντελεστής Αποσβεστήρα κυμάτων

$$P : C_p = \rho \times V_p \times A$$

Σταθερά ελατηρίου για κύματα S : $K_s = G \times A$

Σταθερά ελατηρίου για κύματα P : $K_p = E \times A$



Εικόνα 6.11 - Σύστημα ελατηρίων προσομοίωσης συνέχειας εδάφους

Όπου:

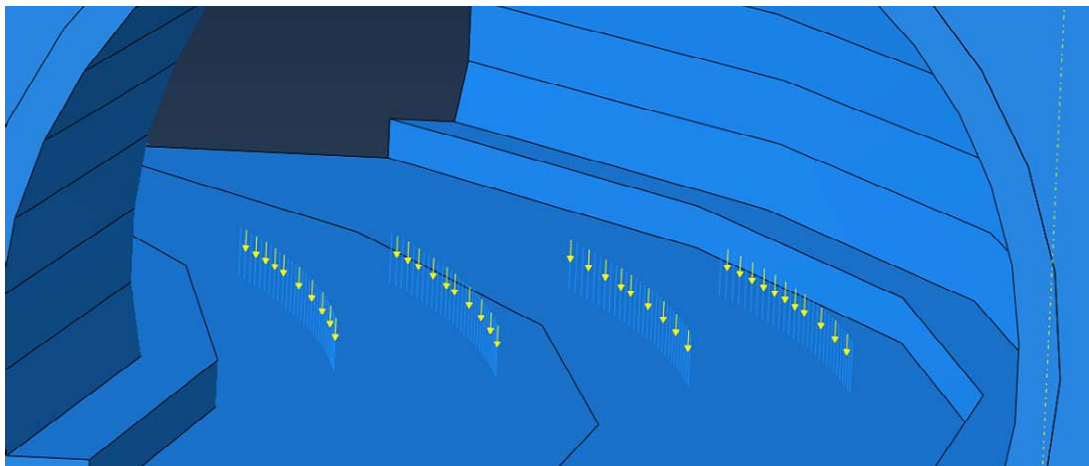
E : Μέτρο ελαστικότητας kPa

ν : Poisson's Ratio (0.25)

ρ : Πυκνότητα Mgr/m³

6.8 Επιβολή σταθερής φόρτισης

Έχοντας μορφώσει το προσομοίωμα, σειρά έχει η δημιουργία μιας σταθερής επιβολής φόρτισης. Η σιδηροτροχιά προσομοιώθηκε με αλληπάλληλες τετράδες από κατακόρυφα τμήματα. Κάθε τετράδα έχει απόσταση με την επόμενη ίση με 0,7μ, όση και η απόσταση των διαδοχικών στρωτήρων μεταξύ τους. Πάνω σε κάθε ευθύγραμμο τμήμα τοποθετήθηκε μια συγκεντρωμένη δύναμη των 25KN/Hz. Βέβαια η επιβολή αυτής της καθολικής δύναμης δεν είναι ορθή, για αυτό το λόγο το προσομοίωμα θα χρειαστεί να βαθμονομηθεί, η διαδικασία της βαθμονόμησης θα εξηγηθεί αναλυτικά σε επόμενο κεφάλαιο.



Εικόνα 6.12 - Σημεία επιβολής φόρτισης

6.9 Βήματα ανάλυσης

Για τη διεξαγωγή της ταχύτητας δόνησης στα προεπιλεγμένα σημεία έγιναν δύο εσωτερικές διαδικασίες (βήματα) στο πρόγραμμα.

1° ΒΗΜΑ

Σε αυτό το βήμα γίνεται η ανάλυση των συχνοτήτων από την οποία εκπίπτουν οι διάφορες ιδιοσυχνότητες «eigenfrequencies» και ιδιοδιανύσματα «eigenvectors» των ιδιομορφών από τις ελεύθερες ταλαντώσεις του φορέα. Τα στοιχεία αυτά, αποτελούν ένα από τα πιο σημαντικά τμήματα της ανάλυσης που ενισχύουν την βαθιά κατανόηση της συμπεριφοράς της υπόγειας αλλά και της υπέργειας κατασκευής. Το πρόγραμμα Abaqus δίνει την επιλογή αρκετών μεθοδολογιών για την εκτίμηση και τον υπολογισμό των ιδιομορφών αλλά στην εν λόγω εργασία επιλέχθηκε η αριθμητική μεθοδολογία Lanczos. Ο λόγος που ενδείκνυται η μεθοδολογία αυτή σε προβλήματα τέτοιου τύπου είναι η σχετικά υψηλή ακρίβειά της σε σχέση με τον μικρό χρόνο περάτωσης της. Κατά το βήμα αυτό ορίστηκε το εύρος των συχνοτήτων που θα πραγματοποιούνταν οι διάφοροι υπολογισμοί από τη Lanczos για την εύρεση των ιδιομορφών και των Ιδιοδιανυσμάτων σε επίπεδο 1/3 οκταβικής ανάλυσης (minFrequency=9Hz & maxFrequency=225Hz).

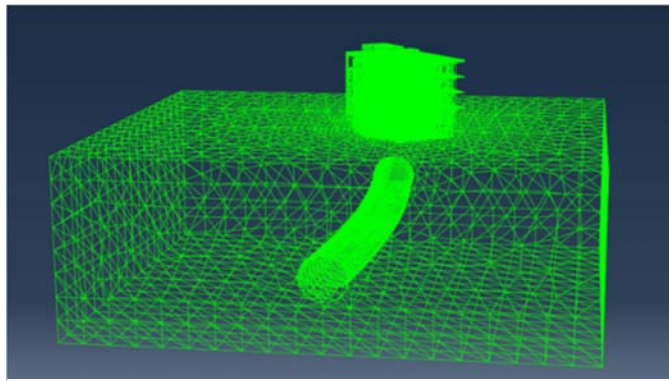
2° ΒΗΜΑ

Το δεύτερο, και τελευταίο, βήμα αποτελεί η αριθμητική ανάλυση σταθερής κατάστασης (Steady-state dynamic modal analysis). Η αριθμητική ανάλυση σε σταθερή κατάσταση παρέχει το εύρος σταθερής κατάστασης και τη φάση της απόκρισης ενός συστήματος λόγω της αρμονικής διέγερσης σε μια δεδομένη

συχνότητα. Με βάση την ανάλυση αυτή, επιλέγεται ένα εύρος συχνοτήτων (στην προκειμένη περίπτωση 9-225Hz με βήμα τα 0,5Hz), και εφαρμόζεται η προεπιλεγμένη φόρτιση που έχει ορισθεί σε κάθε συχνότητά που επιλέχθηκε καταγράφοντας την απόκρισή της. Βασική προϋπόθεση για τη χρήση της δυναμικής αυτής ανάλυσης είναι η γνώση και ο καθορισμός των ιδιομορφών, συνθήκη η οποία επικυρώθηκε από το πρώτο βήμα. Μετά το πέρας της διαδικασίας αυτής, προέκυψαν τα αποτελέσματα από την ταχύτητα των δονήσεων που παράγεται από το θεωρητικό μέσο σταθερής τροχιάς καθώς αυτό διέρχεται από τη σήραγγα, στον κατακόρυφο άξονα.

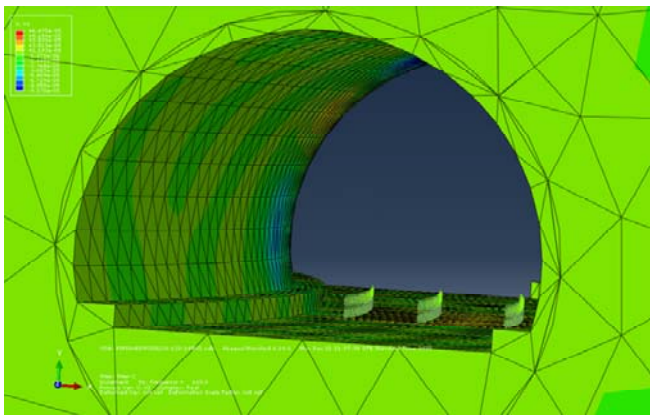
6.10 Βαθμονόμηση

Η καθολική δύναμη που εφαρμόστηκε στις ράγες της σήραγγας δεν είναι αντιπροσωπευτική στην παρούσα κατάσταση αλλά είναι μια πρώτη εκτίμηση. Σε συνδυασμό με τη δύναμη αυτή εφαρμόστηκε και ένα μοναδιαίο εύρος τιμών πλάτους ταλάντωσης (amplitude) που εφαρμόστηκε σε όλες τις επιθυμητές συχνότητες (9-225Hz). Έχοντας πληρώσει όλες



Εικόνα 6.13 - Σημεία (nodes) προσομοιώματος

τις απαραίτητες διαδικασίες το προσομοίωμα υποβάλλεται σε διαδικασία διεξαγωγής αποτελεσμάτων. Τα αποτελέσματα που παράγονται είναι προφανώς λανθασμένα, αλλά συγκρίνοντάς τα με τα αποτελέσματα από τις επί τόπου μετρήσεις, που έχουν διεξαχθεί ακριβώς στο ίδιο σημείο με αυτό που



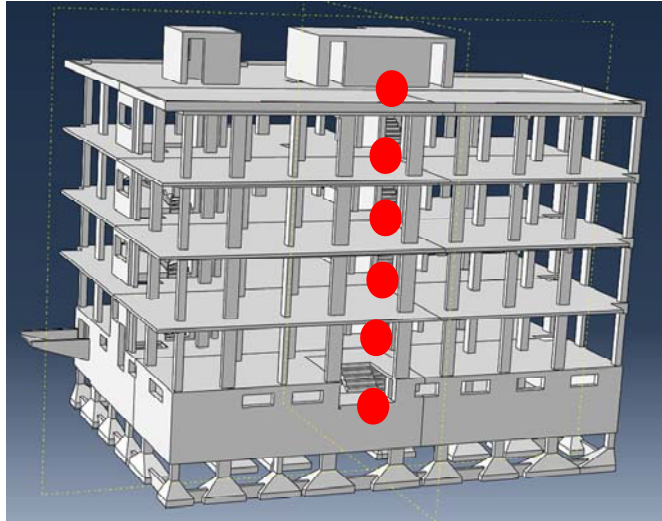
Εικόνα 6.14 - Λεπτομέρεια σήραγγας

προκαθορίστηκε στο πρόγραμμα να υπολογίσει, είναι εφικτό να δημιουργηθεί ένας παράγοντας διόρθωσης (calibration factor) του μοναδιαίου εύρους τιμών πλάτους ταλάντωσης. Μετά από τη διαδικασία αυτή το μη μοναδιαίο εύρος αυτό εφαρμόζεται εκ νέου στο προσομοίωμα, ως το νέο εύρος (amplitude), και διεξάγονται τα νέα, διορθωμένα, αποτελέσματα από τα επιθυμητά σημεία.

6.11 Σημεία διεξαγωγής και τύπος αποτελεσμάτων

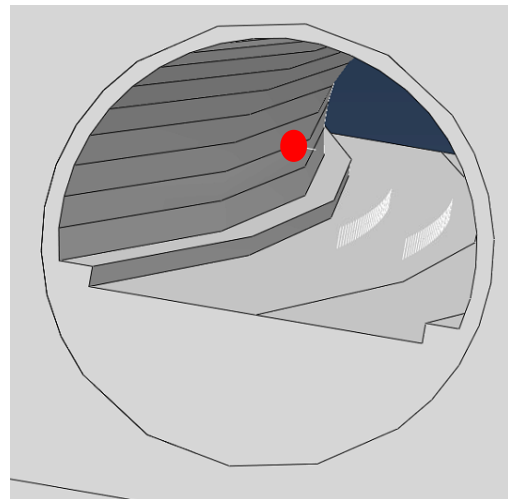
Έχοντας ολοκληρώσει και το βήμα της βαθμονόμησης, τελικό βήμα αποτελεί ο καθορισμός του τύπου καθώς και των σημείων διεξαγωγής των αποτελεσμάτων. Μιας και η εργασία έχει ως βασικό στόχο τον υπολογισμό του εδαφομεταφερόμενου θορύβου, προσδιορίστηκε η ταχύτητα δόνησης στην κατακόρυφη διεύθυνση. Βέβαια για να γίνει εφικτό αυτό έπρεπε να γίνει πρώτα διεξαγωγή αποτελεσμάτων μετατόπισης σε όλο το προσομοίωμα για την ανάλυση των ιδιόμορφών του, (το πρώτο βήμα την ανάλυσης).

Μέσα από το πολυπληθές σύνολο των πεπερασμένων στοιχείων που δημιουργήθηκε από τη διακριτοποίηση, ο αριθμός των στοιχείων με μείζονα σημασία είναι πολύ μικρός. Ενδεικτικά επιλέχθηκε ένα σημείο σε κάθε όροφο του κτιρίου (υπόγειο, ισόγειο, 1^{ος} όροφος, 2^{ος} όροφος, 3^{ος} όροφος και δώμα) καθώς και ένα σημείο ακριβώς έξω από το κτίριο (calibration point) και ένα σημείο στο εσωτερικό της σήραγγας (tunnel wall). Τα σημεία αυτά επιλέχθηκαν μιας και έχουν γίνει επί τόπου μετρήσεις σε κάποια από αυτά τα σημεία και μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως ταυτοποίηση άρτιας λειτουργίας του προσομοιώματος. Έτσι το πρόγραμμα διεξάγει αποτελέσματα αποκλειστικά από αυτούς τους κόμβους που παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον.



Εικόνες 6.15 - Σημεία διεξαγωγής αποτελεσμάτων

Η κυριότερη αιτία για την οποία επιλέχθηκε το σημείο στο τοίχωμα της σήραγγας (tunnel wall) ως ένα εκ των σημείων υψίστης σημασίας είναι ότι, στο ενδεχόμενο δυσμενούς σεναρίου, διαπιστώνεται ότι οι δονήσεις που παράγονται στο «tunnel wall» της σήραγγας διαχέονται πλήρως στο περιβάλλον έδαφος, χωρίς να επέρχεται κάποια μείωση εξαιτίας της διεπιφάνειας.



Εικόνα 6.16 - Σημείο μέτρησης στο τοίχωμα της σήραγγας σε ύψος 0,75μ από δάπεδο

6.12 Αριθμητική επίλυση Προσομοιώματος και ανάλυση αποτελεσμάτων

Τέλος, μετά την επιτυχή περάτωση όλων αυτών των βημάτων, το προσομοίωμα υποβλήθηκε στην τελική διεξαγωγή των αποτελεσμάτων. Λόγω του μεγάλου όγκου του προσομοιώματος (πάνω από 100.000 πεπερασμένα στοιχεία) δεν ήταν δυνατός ο υπολογισμός όλων των ιδιομορφών του συνολικού προσομοιώματος για το επιθυμητό εύρος συχνοτήτων. Ο περιορισμός αυτός επέρχεται από τη χρήση της αριθμητικής μεθόδου Lanczos η οποία μπορεί να υπολογίσει μέχρι και 12.000 ιδιομορφές. Ενδεικτικά για τον υπολογισμό όλου του προσομοιώματος χρειάστηκε ο υπολογισμός πάνω από 70.000 ιδιομορφών. Για το λόγο αυτό, το προσομοίωμα διασπάστηκε σε 9 επιμέρους προσομοιώματα βάσει των συχνοτήτων υπολογισμού. Πιο αναλυτικά, το προσομοίωμα υποβλήθηκε σε διεξαγωγή αποτελεσμάτων 9 φορές αλλά για διαφορετικά φάσματα συχνοτήτων, και στη συνέχεια τα αποτελέσματα συγκεντρώθηκαν και αξιολογήθηκαν συλλογικά. Τα φάσματα διαχωρισμού των συχνοτήτων αναφέρονται στη συνέχεια:

Πίνακας 6.5 - Φάσματα διαχωρισμού προσομοιωμάτων

9-50 HZ	120-145 HZ
50-65 HZ	145-170 HZ
65-80 HZ	170-200 HZ
80-90 HZ	200-225 HZ
90-120 HZ	

Εξάγοντας τα αποτελέσματα από το συλλογικό προσομοίωμα του Abaqus, αυτά εισάχθηκαν σε αρχείο excel και τροποποιήθηκαν καταλλήλως για την πιο εύκολη κατανόηση και σχολιασμό τους. Τα δεδομένα αυτά είναι εκφρασμένα σε ταχύτητα δόνησης (mm/s) και χρειάστηκε να μετατραπούν σε dB(A) με τη χρήση του ακόλουθου τύπου:

$$dBA = 20 \times \log\left(\frac{velocity}{10^{-9}}\right) \quad (6.1)$$

Επισημαίνεται ότι όλοι οι υπολογισμοί πραγματοποιήθηκαν για τα βήματα συχνοτήτων της 1/3 οκταβικής ανάλυσης.

Τα βήματα είναι τα εξής:

Πίνακας 6.6 - Ομαδοποίηση συχνοτήτων 1/3 οκταβικής ανάλυσης

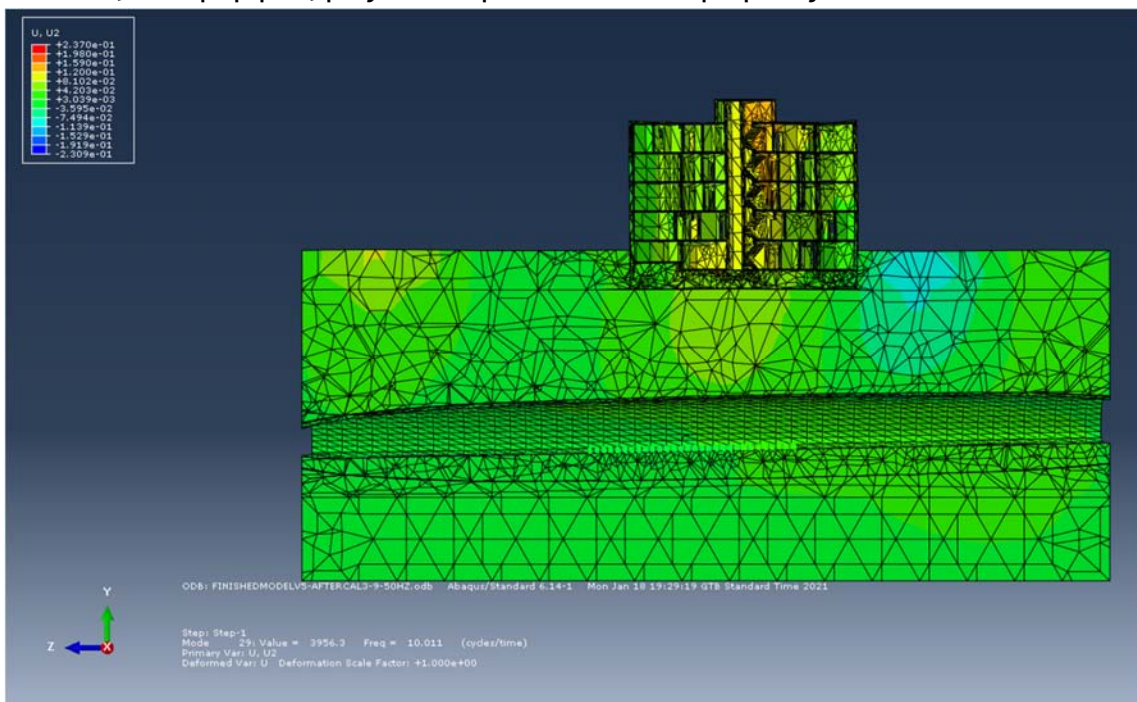
Από 9Hz έως 11Hz	Από 45Hz έως 56Hz
Από 11,5Hz έως 14Hz	Από 56,5Hz έως 71Hz
Από 14,5Hz έως 18Hz	Από 71,5Hz έως 89Hz
Από 18,5Hz έως 22,5Hz	Από 89,5Hz έως 112Hz
Από 23Hz έως 28Hz	Από 112,5Hz έως 141,5Hz
Από 28,5Hz έως 33,5Hz	Από 142Hz έως 178Hz
Από 34Hz έως 44,5Hz	Από 178,5Hz έως 225Hz

7. Αποτελέσματα

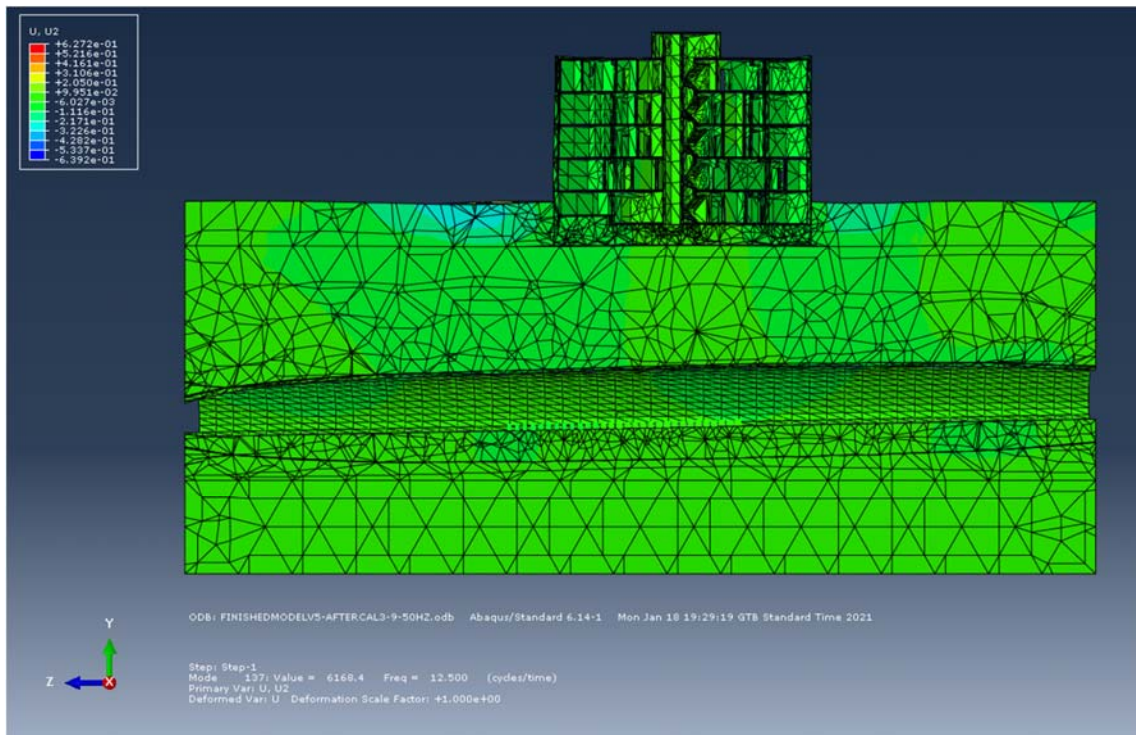
Στην ενότητα αυτή της εργασίας θα γίνει η παράθεση και ο λεπτομερής σχολιασμός των σημαντικότερων ευρημάτων που διεξάχθηκαν από το προσομοίωμα, τόσο στο πρώτο βήμα της ανάλυσης όσο και από το δεύτερο.

7.1 Παράθεση αποτελεσμάτων από το πρώτο βήμα της ανάλυσης

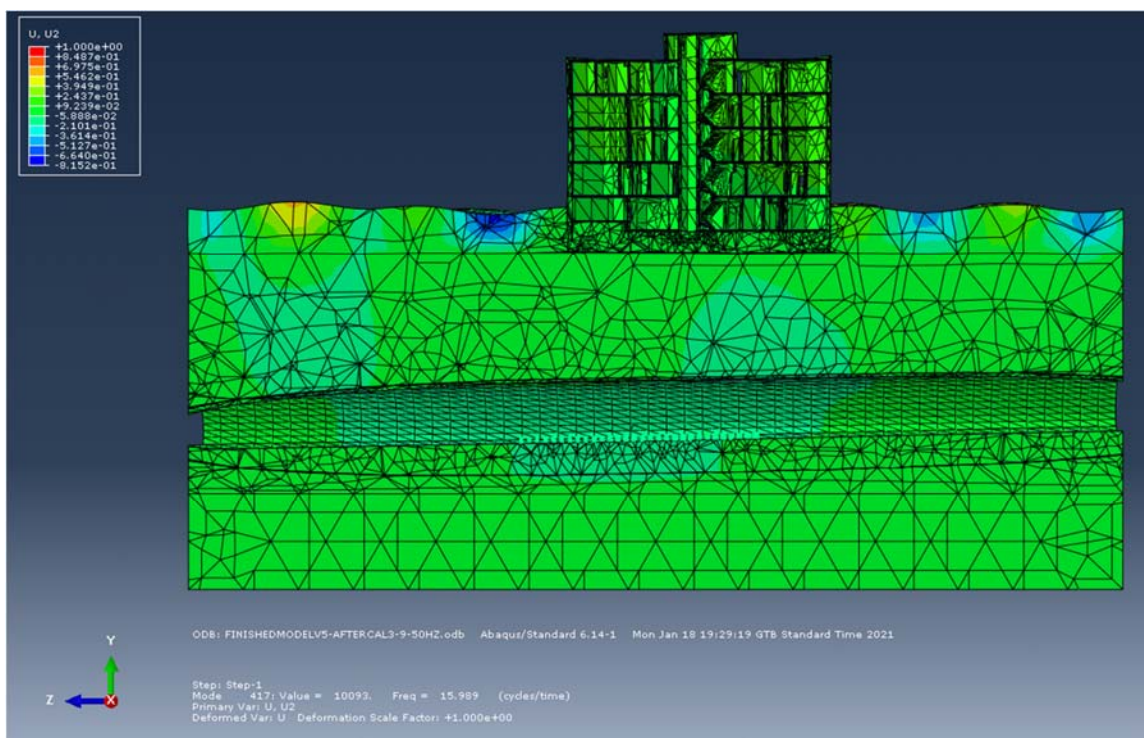
Το πρώτο βήμα της ανάλυσης περιλάμβανε την εύρεση των σημαντικών ιδιομορφών του προσομοιώματος μέσα από το μελετώμενο φάσμα συχνοτήτων (9-225Hz). Ως μεγάλης σπουδαιότητας ορίστηκαν οι ιδιομορφές των συχνοτήτων της 1/3 οκταβικής ανάλυσης (10Hz, 12.5Hz, 16Hz, 20Hz, 25Hz, 31.5Hz, 40Hz, 50Hz, 63Hz, 80Hz, 100Hz, 125Hz, 160Hz, 200Hz). Όλες οι ιδιομορφές που παρατίθενται έχουν την ιδιομορφική μάζα που δρα στον κατακόρυφο άξονα Υ.



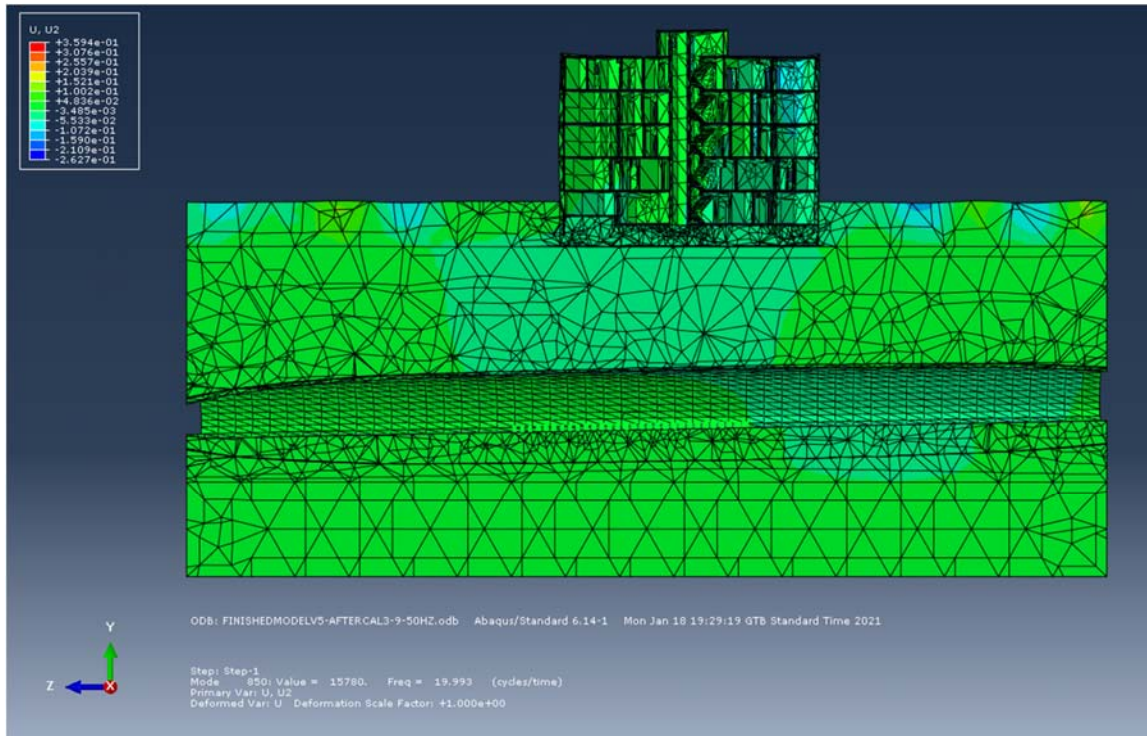
Σχήμα 7.1 - Συχνότητα ιδιομορφής 10Hz



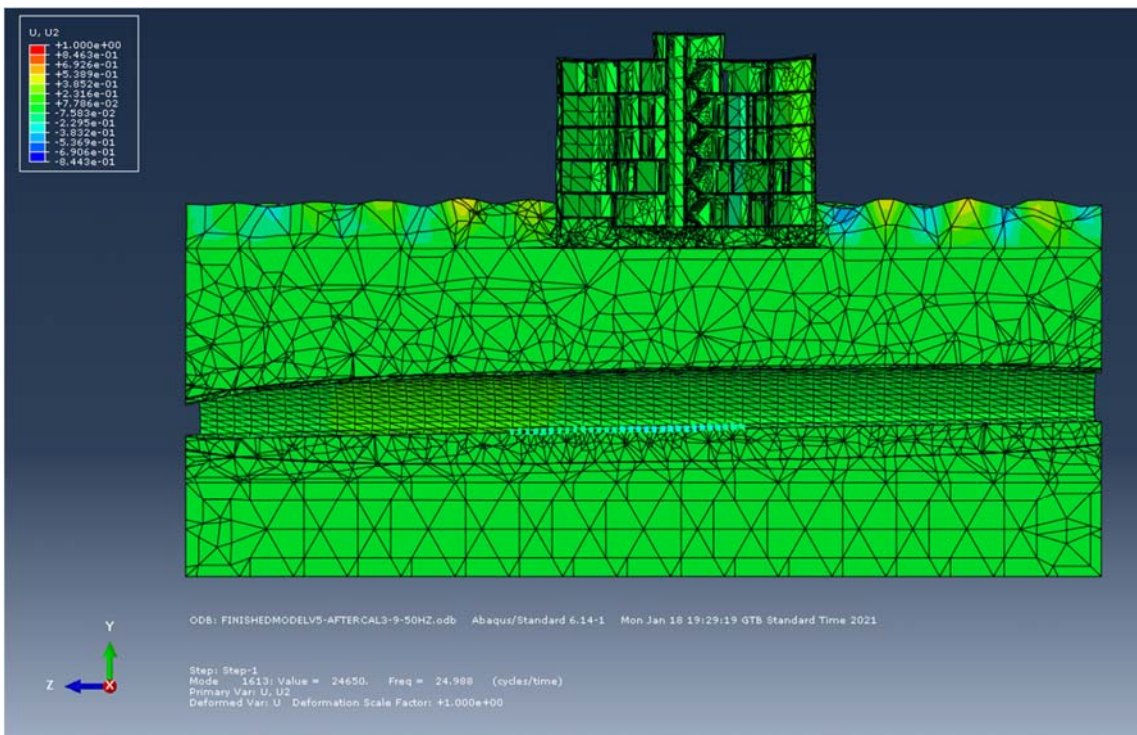
Σχήμα 7.2 - Συχνότητα ιδιομορφής 12,5Hz



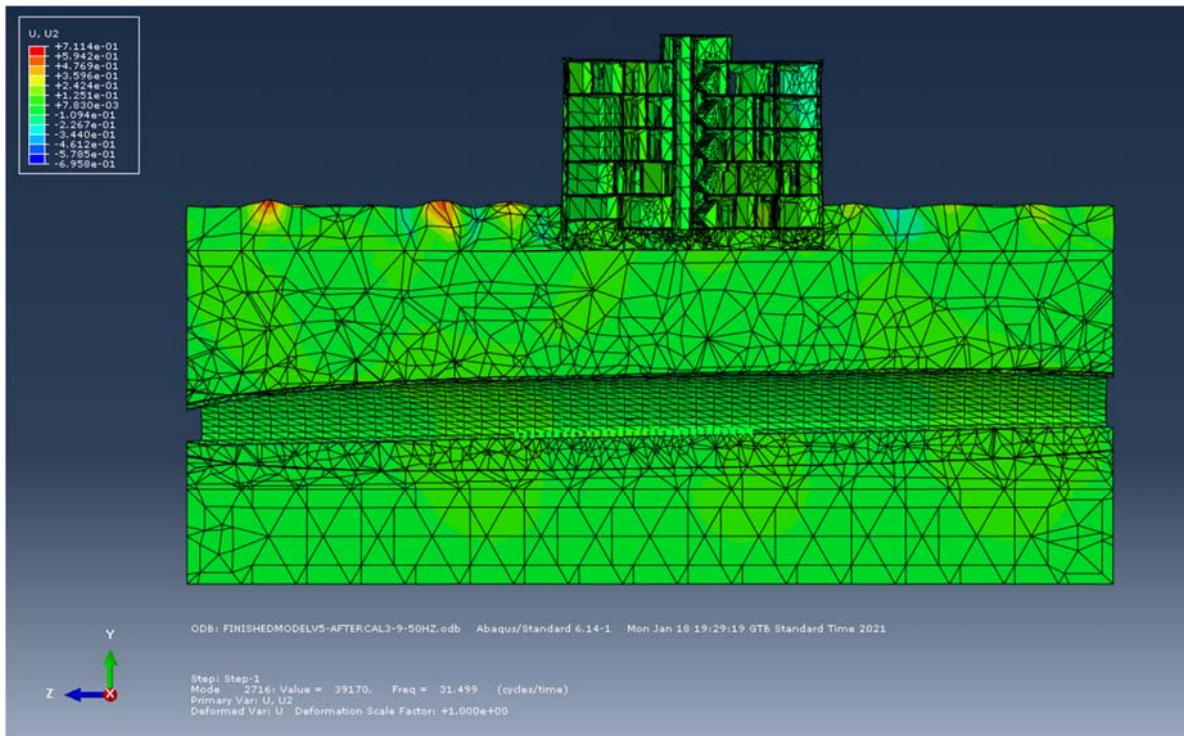
Σχήμα 7.3 - Συχνότητα ιδιομορφής 16Hz



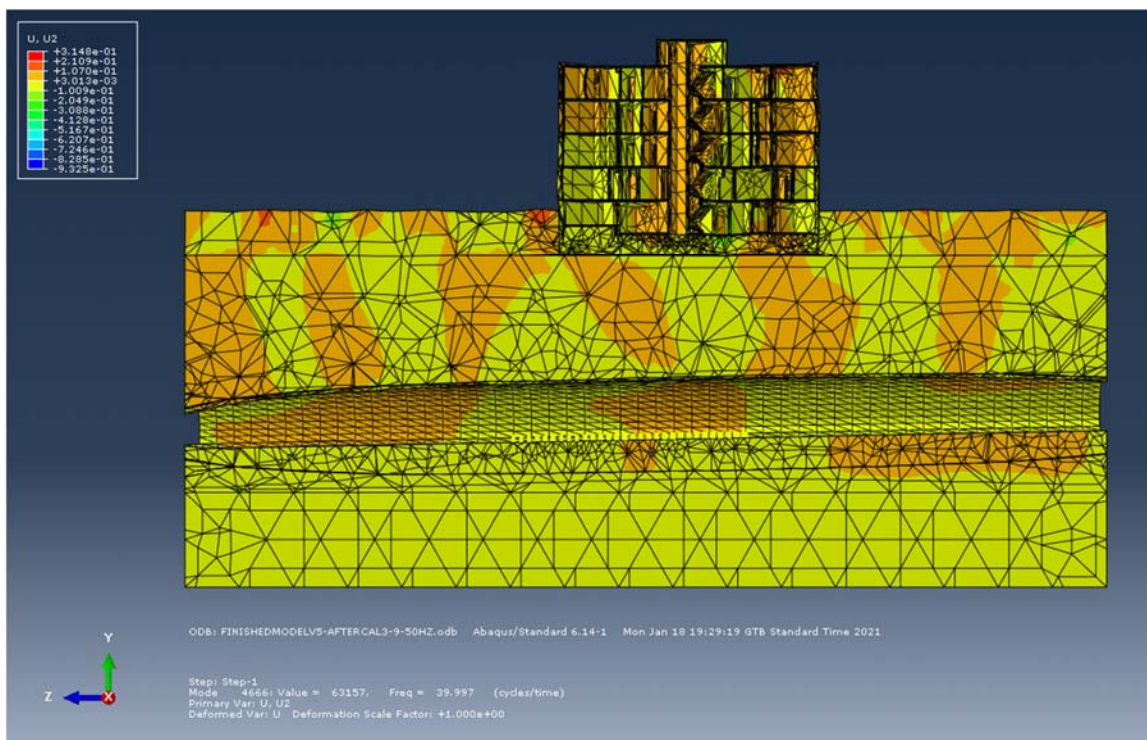
Σχήμα 7.4 - Συχνότητα ιδιομορφής 20Hz



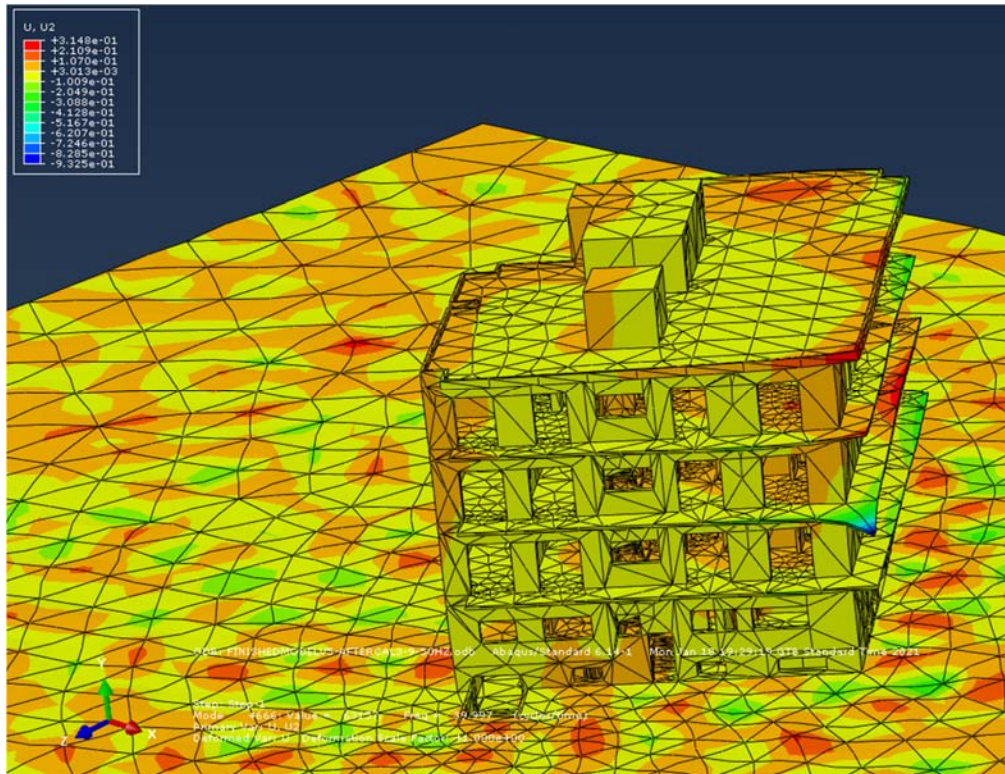
Σχήμα 7.5 - Συχνότητα ιδιομορφής 25Hz



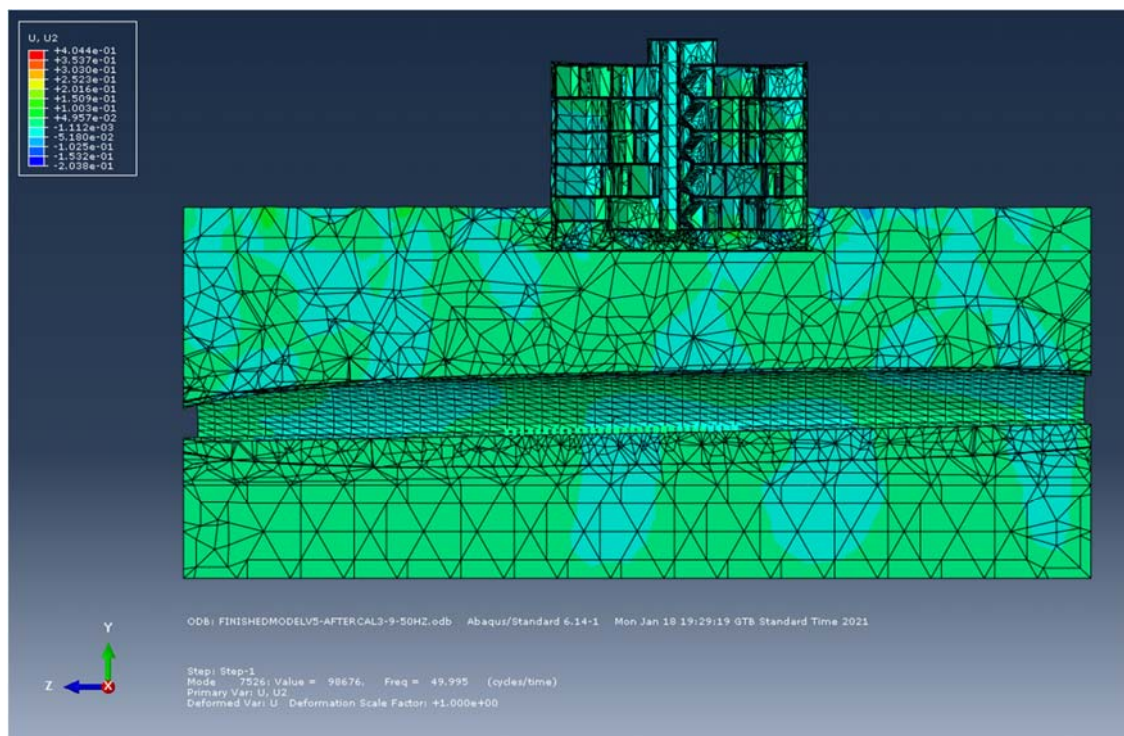
Σχήμα 7.6 - Συχνότητα ιδιομορφής 31,5Hz



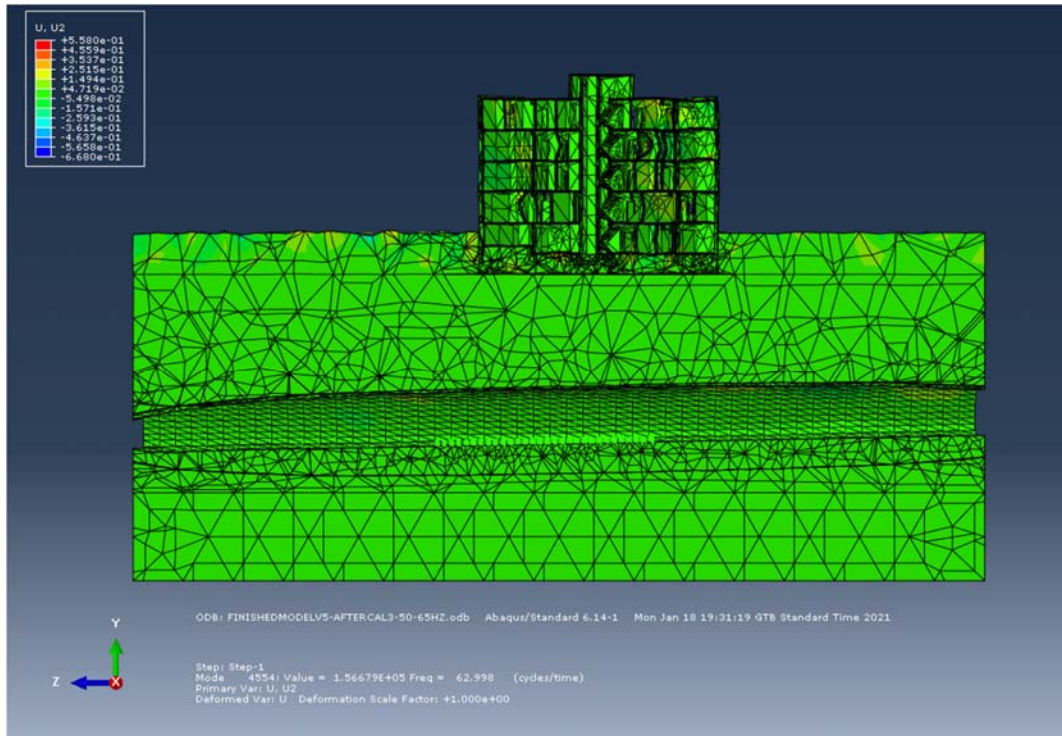
Σχήμα 7.7 - Συχνότητα ιδιομορφής 40Hz



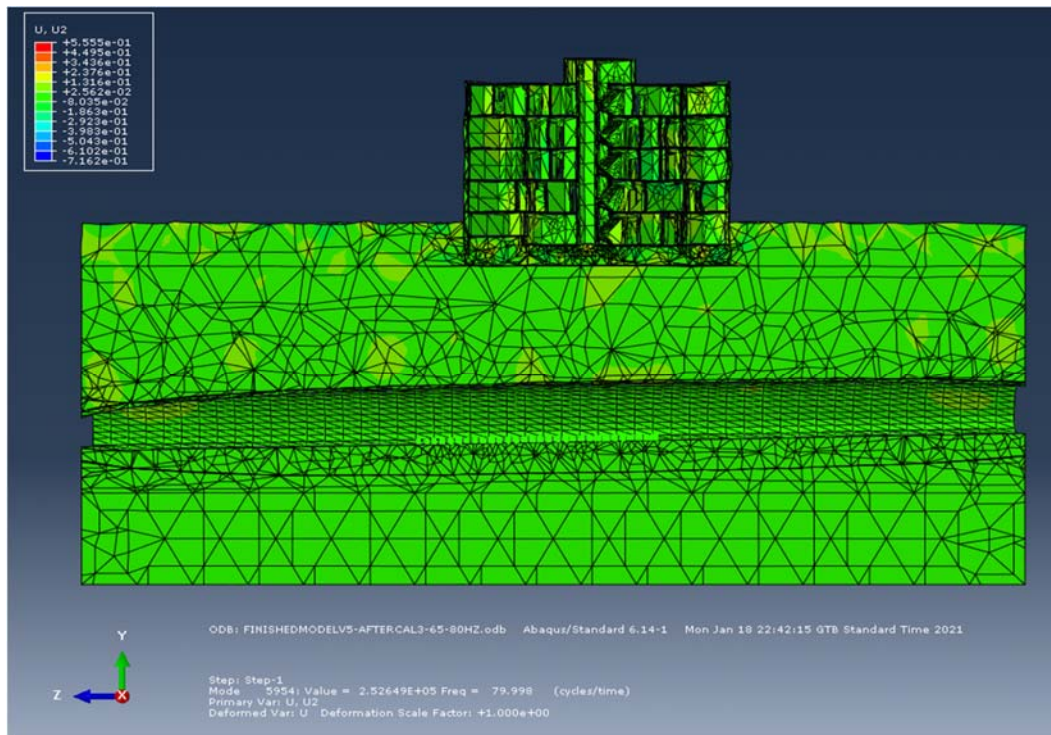
Σχήμα 7.8 - Συχνότητα ιδιομορφής 40Hz λεπτομέρεια κτιρίου



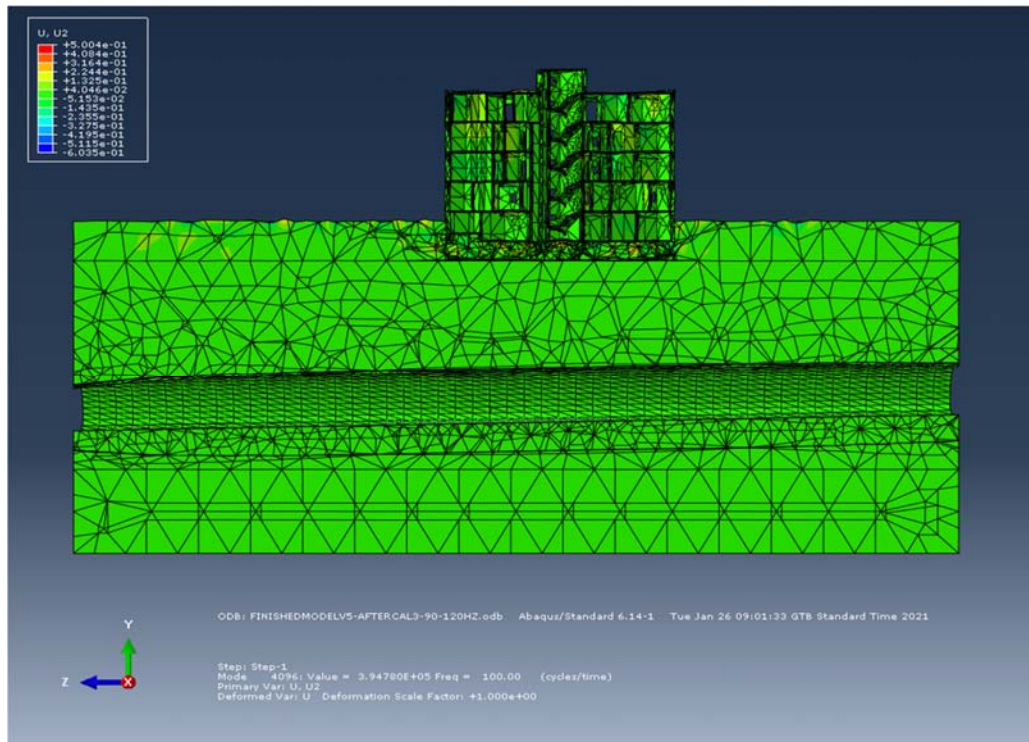
Σχήμα 7.9 - Συχνότητα ιδιομορφής 50Hz



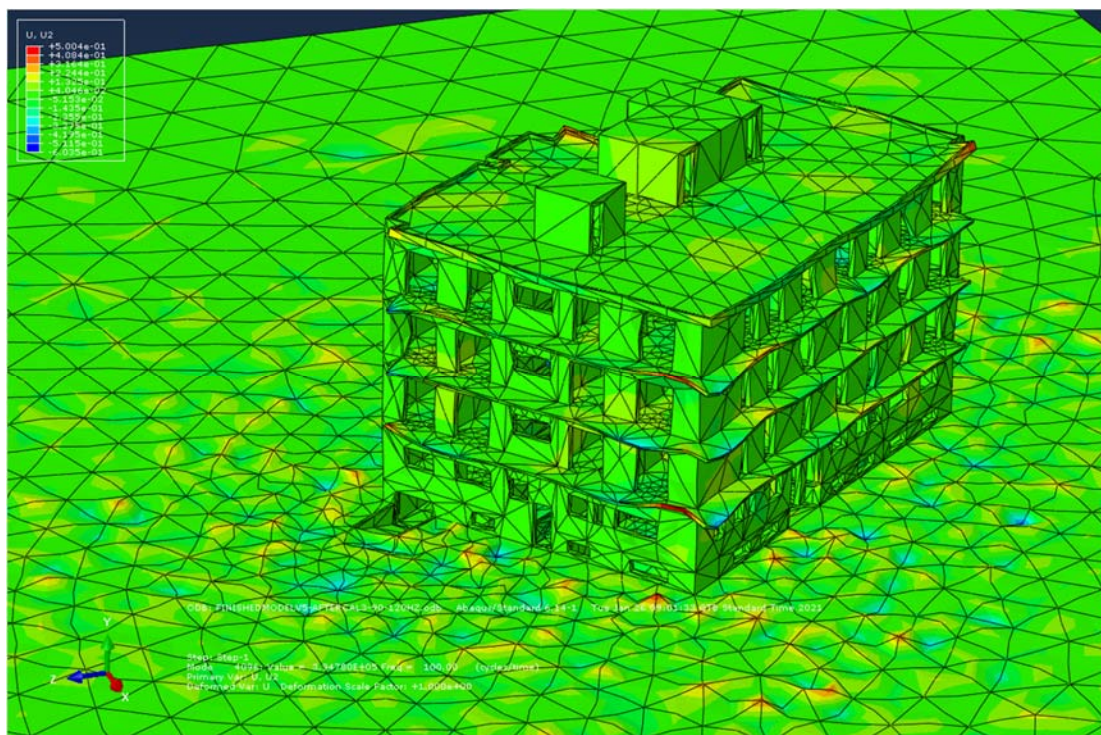
Σχήμα 7.10 - Συχνότητα ιδιομορφής 63Hz



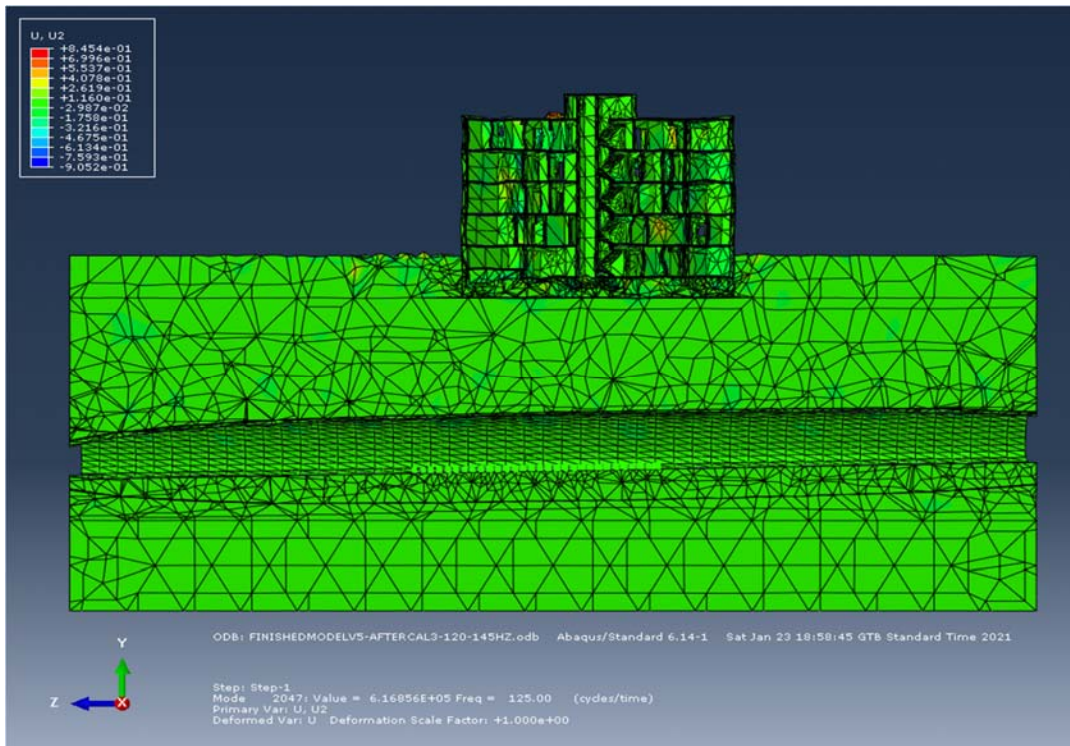
Σχήμα 7.11 - Συχνότητα ιδιομορφής 80Hz



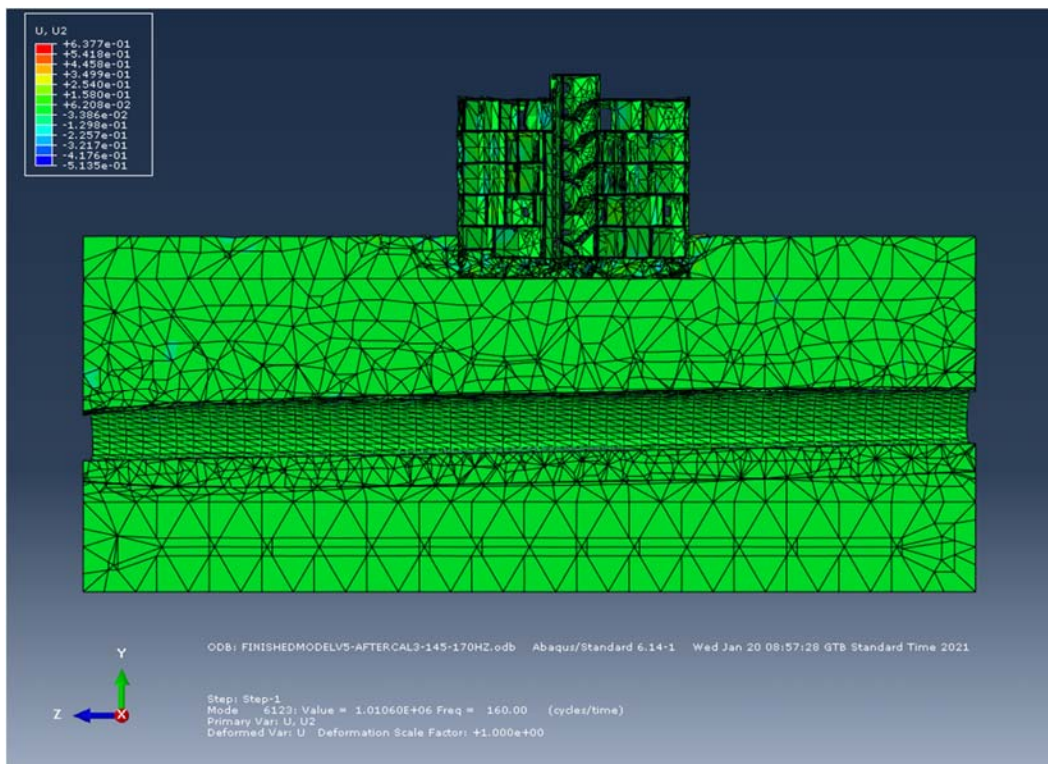
Σχήμα 7.12 - Συχνότητα ιδιομορφής 100Hz



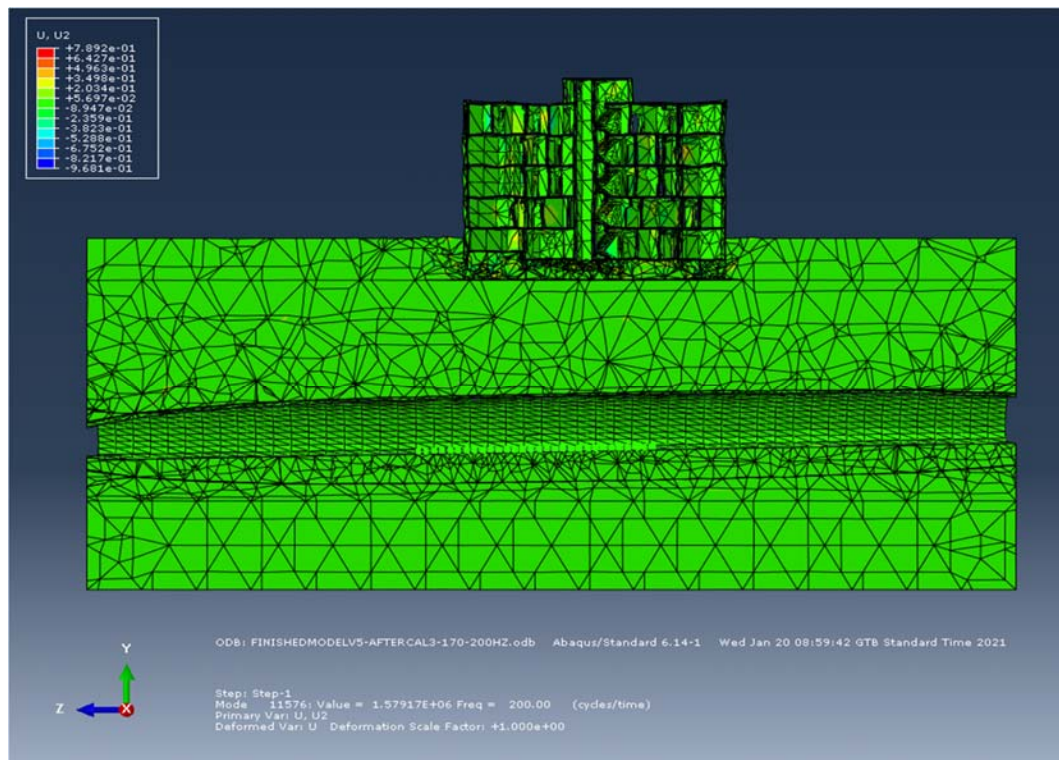
Σχήμα 7.13 - Συχνότητα ιδιομορφής 100Hz λεπτομέρεια κτιρίου



Σχήμα 7.14 - Συχνότητα ιδιομορφής 125Hz



Σχήμα 7.15 - Συχνότητα ιδιομορφής 160Hz



Σχήμα 7.16 - Συχνότητα ιδιομορφής 200Hz

7.2 Παράθεση αποτελεσμάτων από το δεύτερο βήμα της ανάλυσης

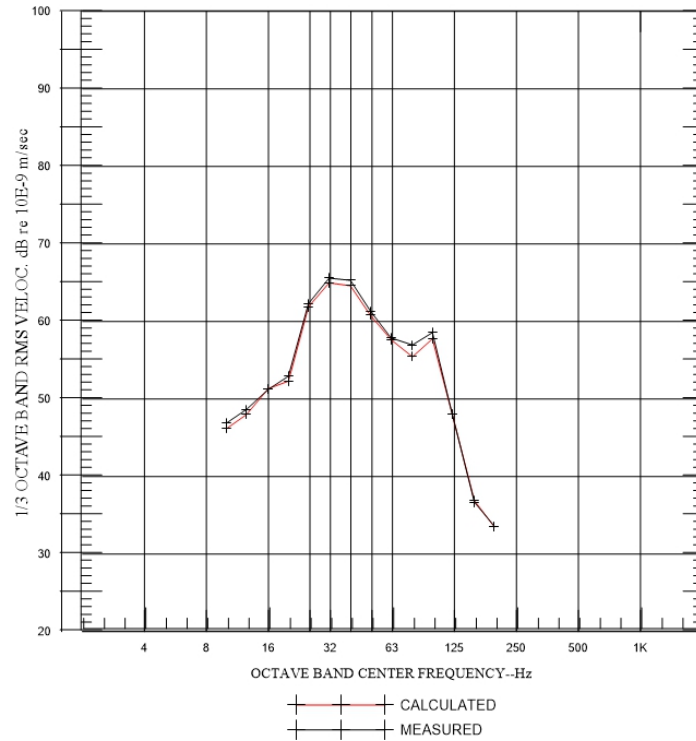
Μετά το πέρας του πρώτου βήματος και έχοντας πλέον υπολογίσει όλες τις απαραίτητες ιδιομορφές, ξεκίνησε η διαδικασία διεξαγωγής αποτελεσμάτων από το δεύτερο βήμα της ανάλυσης, την αριθμητική ανάλυση σταθερής κατάστασης. Τα αποτελέσματα διεστάθηκαν με τη μορφή ταχύτητας δόνησης (mm/s) και υποβλήθηκαν σε περαιτέρω επεξεργασία για την ορθή μετατροπή τους σε εδαφομεταφερόμενο θόρυβο.

Ο εδαφομεταφερόμενος αυτός θόρυβος εκφράζεται σε dB(A) ανά συχνότητα (εύρος συχνοτήτων) με βάση την 1/3 οκταβική ανάλυση. Τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν είτε με τις πραγματικές επί τόπου μετρήσεις που έχουν διεξαχθεί στην προς μελέτη περιοχή, είτε μεταξύ τους για την διεξαγωγή συμπερασμάτων.

Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στην πρόσοψη του οίκου ευγηρίας Νικητίδη/Μέλαθρον, στο υπόγειο, τον 1^ο και τον 2^ο όροφο. Επιπροσθέτως, έγινε μέτρηση στο τοίχωμα της σήραγγας που διέρχεται κάτω ακριβώς από το κτίριο. Οι μετρήσεις αυτές έγιναν με τη χρήση επιταχυνσιομέτρων μεταβλητής ευαισθησίας που κυμαίνεται από 1V/g έως 1.000V/g (για την καλύτερη ερμηνεία των αποτελεσμάτων).

Στη συνέχεια γίνεται παράθεση των ευρημάτων από το δεύτερο βήμα της ανάλυσης:

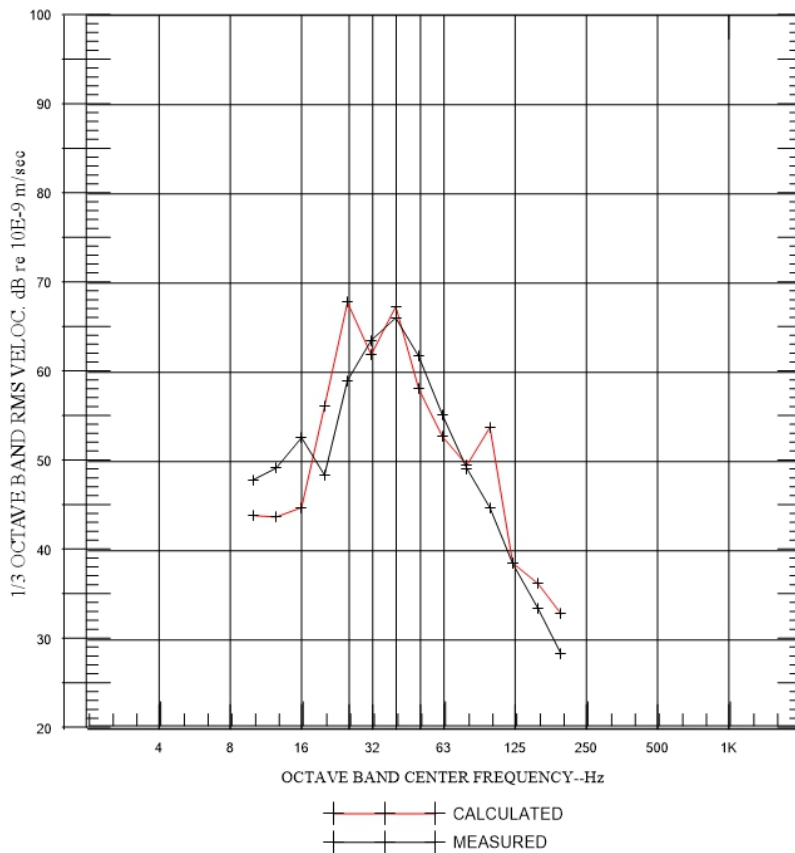
Στη συνέχεια γίνεται παράθεση των ευρημάτων από το δεύτερο βήμα της ανάλυσης:



Σχήμα 7.17 - Σύγκριση πραγματικών μετρήσεων που διεξάχθηκαν στην περιοχή μελέτης με τα αποτελέσματα που εκπίπτουν από το προσομοίωμα του Abaqus στην ελεύθερη επιφάνεια

Πίνακας 7.1 - Αριθμητικά αποτελέσματα σύγκρισης προσομοιώματος και πραγματικών μετρήσεων που διεξάχθηκαν στην ελεύθερη επιφάνεια

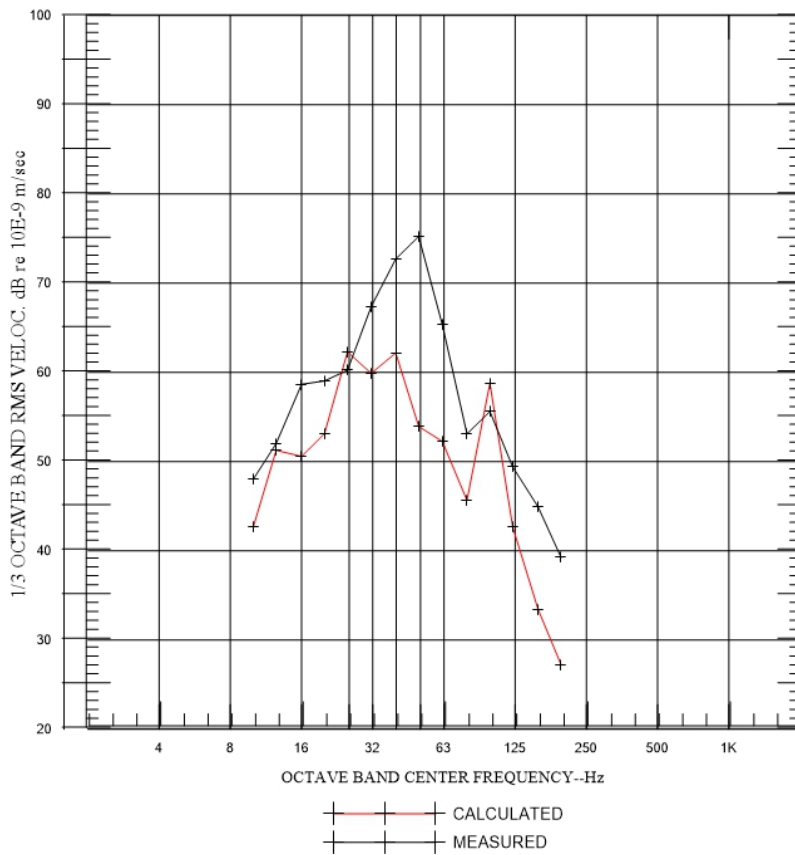
FAÇADE - SURFACE		
Hz	MEASURED	MODEL
	Lvbase	Lvbase
10	46,9	46,19
12,5	48,66	47,99
16	51,27	51,36
20	52,96	52,3
25	62,3	61,88
31,5	65,6	64,99
40	65,32	64,62
50	61,36	60,81
63	57,89	57,67
80	56,98	55,45
100	58,58	57,77
125	48,05	48,02
160	36,7	36,92
200	33,59	33,51



Σχήμα 7.18 - Σύγκριση πραγματικών μετρήσεων που διεξάχθηκαν στην περιοχή μελέτης με τα αποτελέσματα που εκπίπτουν από το προσομοίωμα του Abaqus στο υπόγειο του κτιρίου

Πίνακας 7.2 - Αριθμητικά αποτελέσματα σύγκρισης προσομοιώματος και πραγματικών μετρήσεων που διεξάχθηκαν στο υπόγειο του κτιρίου

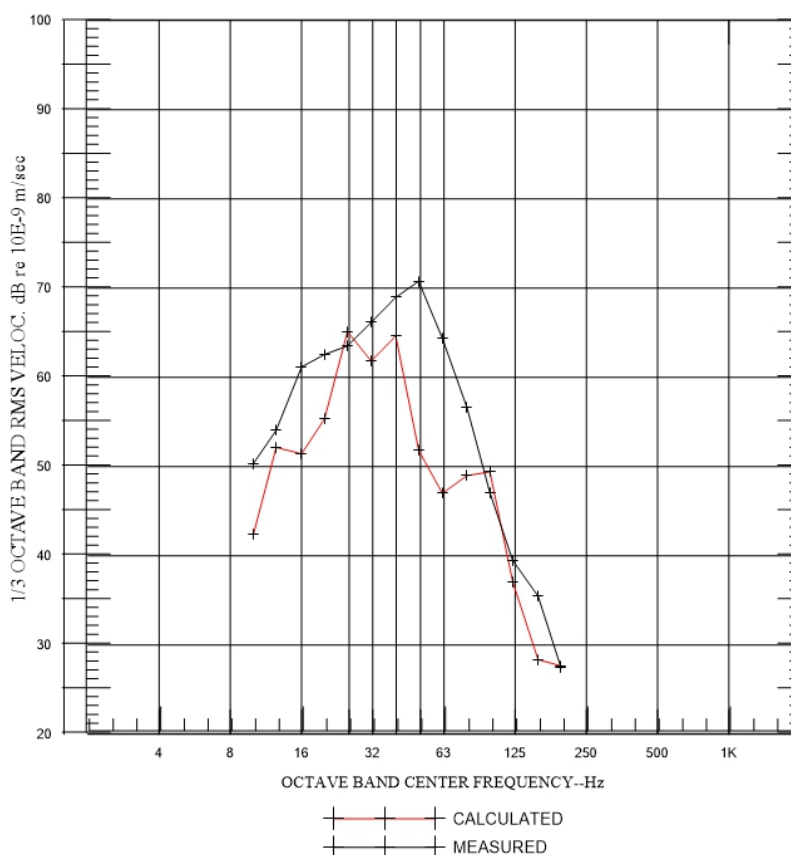
BASEMENT		
Hz	MEASURED	MODEL
	Lvbase	Lvbase
10	47,97	43,96
12,5	49,28	43,79
16	52,68	44,86
20	48,50	56,18
25	59,10	67,85
31,5	63,59	61,98
40	66,11	67,38
50	61,80	58,16
63	55,25	52,82
80	49,23	49,61
100	44,83	53,83
125	38,58	38,65
160	33,54	36,32
200	28,44	32,93



Σχήμα 7.19 - Σύγκριση πραγματικών μετρήσεων που διεξάχθηκαν στην περιοχή μελέτης με τα αποτελέσματα που εκπίπτουν από το προσομοίωμα του Abaqus στον 1^ο όροφο του κτιρίου

Πίνακας 7.3 - Αριθμητικά αποτελέσματα σύγκρισης προσομοιώματος και πραγματικών μετρήσεων που διεξάχθηκαν στον 1^ο όροφο του κτιρίου

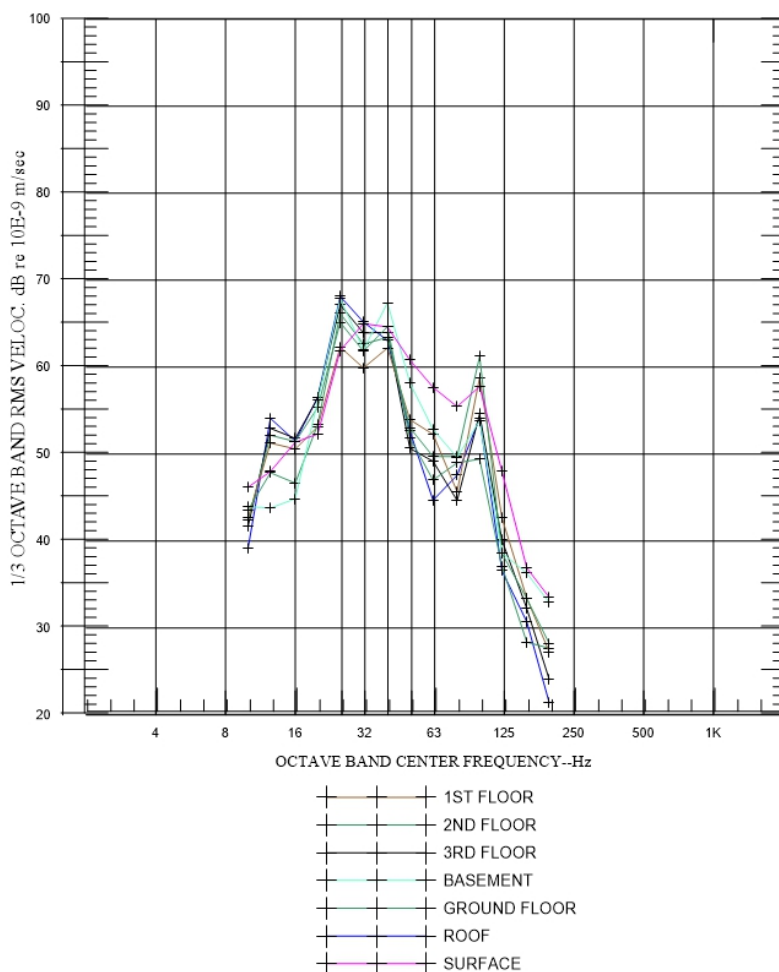
1st FLOOR		
Hz	MEASURED	MODEL
	Lvbase	Lvbase
10	48,04	42,69
12,5	52,03	51,27
16	58,67	50,60
20	59,05	53,14
25	60,25	62,31
31,5	67,39	59,90
40	72,72	62,18
50	75,24	53,96
63	65,33	52,27
80	53,12	45,67
100	55,62	58,77
125	49,41	42,68
160	44,93	33,44
200	39,26	27,23



Σχήμα 7.20 - Σύγκριση πραγματικών μετρήσεων που διεξάχθηκαν στην περιοχή μελέτης με τα αποτελέσματα που εκπίπτουν από το προσομοίωμα του Abaqus στον 2^ο όροφο του κτιρίου

Πίνακας 7.4 - Αριθμητικά αποτελέσματα σύγκρισης προσομοιώματος και πραγματικών μετρήσεων που διεξάχθηκαν στον 2^ο όροφο του κτιρίου

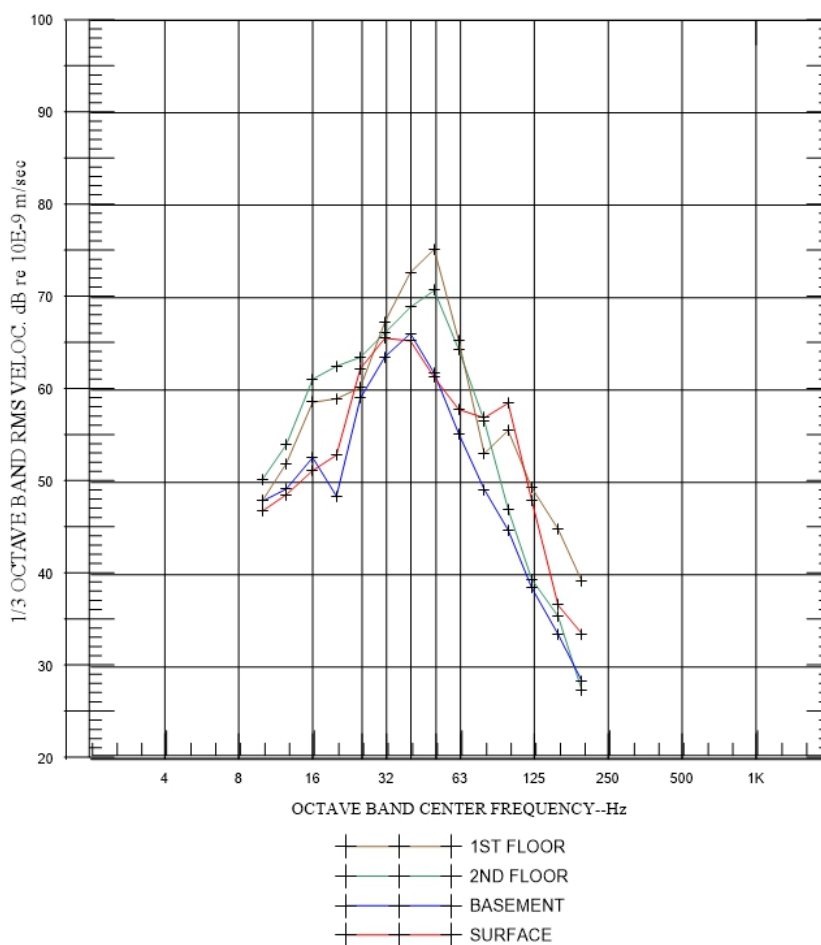
2nd FLOOR		
Hz	MEASURED	MODEL
	Lvbase	Lvbase
10	50,33	42,38
12,5	54,07	52,15
16	61,17	51,44
20	62,58	55,36
25	63,53	65,13
31,5	66,18	61,83
40	68,96	64,64
50	70,77	51,84
63	64,38	47,01
80	56,63	49,00
100	47,08	49,42
125	39,5	37,11
160	35,48	28,38
200	27,43	27,67



Σχήμα 7.21 - Συλλογικά αποτελέσματα που εκπίπτουν από το προσομοίωμα του Abaqus

Πίνακας 7.5 - Αριθμητικά αποτελέσματα που εκπίπτουν από το προσομοίωμα του Abaqus

Hz	Surface	Basement	Ground Floor	1st Floor	2nd Floor	3rd Floor	Roof
10	46,19	43,96	43,57	42,69	42,38	41,69	39,17
12,5	47,99	43,79	47,85	51,27	52,15	52,95	54,11
16	51,36	44,86	46,66	50,60	51,44	51,80	51,48
20	52,30	56,18	53,41	53,14	55,36	56,43	56,54
25	61,88	67,85	66,17	62,31	65,13	67,16	68,13
31,5	64,99	61,98	62,64	59,90	61,83	63,92	65,18
40	64,62	67,38	63,42	62,18	64,64	64,00	63,04
50	60,81	58,16	53,04	53,96	51,84	50,65	52,62
63	57,67	52,82	49,71	52,27	47,01	49,17	44,69
80	55,45	49,61	49,73	45,67	49,00	44,65	47,56
100	57,77	53,83	61,20	58,77	49,42	54,61	54,12
125	48,02	38,65	38,62	42,68	37,11	40,11	36,59
160	36,92	36,32	33,39	33,44	28,38	32,25	30,73
200	33,51	32,93	28,20	27,23	27,67	24,07	21,38



Σχήμα 7.22 - Συλλογικά αποτελέσματα από τις επί τόπου μετρήσεις που διεξάχθηκαν στην περιοχή μελέτης

Πίνακας 7.6 - Αριθμητικά αποτελέσματα από τις επί τόπου μετρήσεις που διεξάχθηκαν στην περιοχή μελέτης

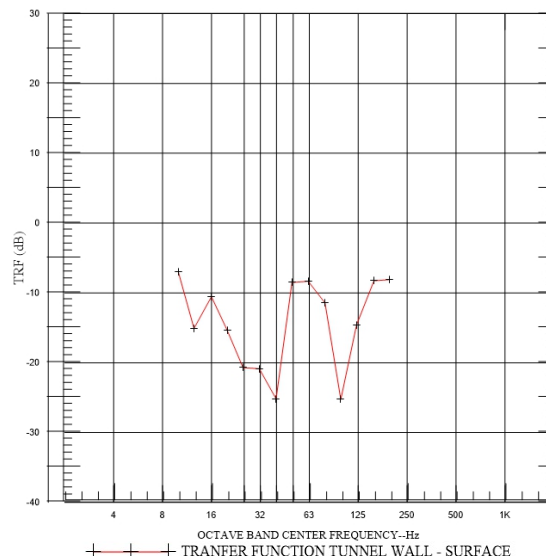
Hz	Surface	Basement	1st Floor	2nd Floor
10	46,90	47,97	48,04	50,33
12,5	48,66	49,28	52,03	54,07
16	51,27	52,68	58,67	61,17
20	52,96	48,50	59,05	62,58
25	62,30	59,10	60,25	63,53
31,5	65,60	63,59	67,39	66,18
40	65,32	66,11	72,72	68,96
50	61,36	61,80	75,24	70,77
63	57,89	55,25	65,33	64,38
80	56,98	49,23	53,12	56,63
100	58,58	44,83	55,62	47,08
125	48,05	38,58	49,41	39,50
160	36,70	33,54	44,93	35,48
200	33,59	28,44	39,26	27,43

7.3 Μόρφωση των Συναρτήσεων Μεταφοράς για το κτίριο από Ο.Σ.

Σε αυτό το σημείο, έχοντας όλα τα απαιτούμενα δεδομένα από το προσομοίωμα του κτιρίου είναι εφικτή η μόρφωση των ανάλογων Συναρτήσεων Μεταφοράς από την ελεύθερη επιφάνεια του εδάφους στο κτίριο αλλά και από το υπόγειο προς τους άνωθεν ορόφους.

Με τον όρο Συνάρτηση Μεταφοράς νοείται το πηλίκο που αντιπροσωπεύει τη σχέση μεταξύ του σήματος μετασχηματισμού Laplace της εξόδου ενός γραμμικού αμετάβλητου συστήματος προς το σήμα μετασχηματισμού Laplace της εισόδου του. Στην περίπτωση των δονήσεων ορίζεται ως η αλγεβρική διαφορά μεταξύ του σήματος εισόδου και εξόδου.

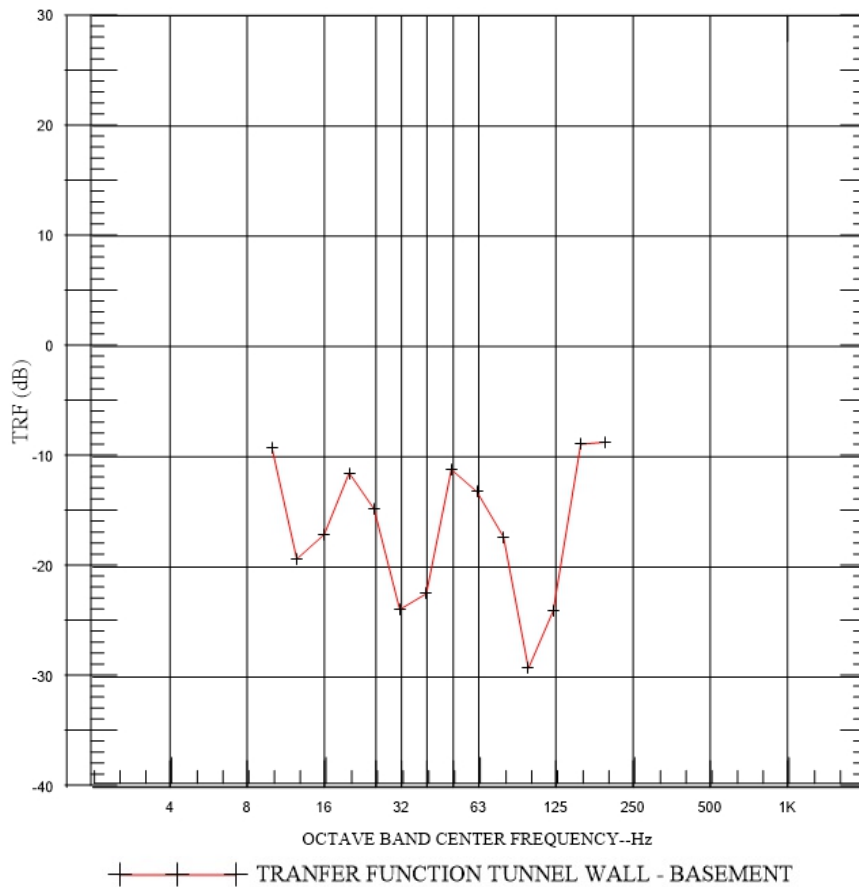
Στην συνέχεια παρατίθενται τα σχετικά διαγράμματα και πίνακες:



Σχήμα 7.23 - Συνάρτηση μεταφοράς Τοίχωμα σήραγγας-Ελεύθερη επιφάνεια

Πίνακας 7.7 - Αποτελέσματα Συνάρτησης μεταφοράς Τοίχωμα σήραγγας-Ελεύθερη επιφάνεια

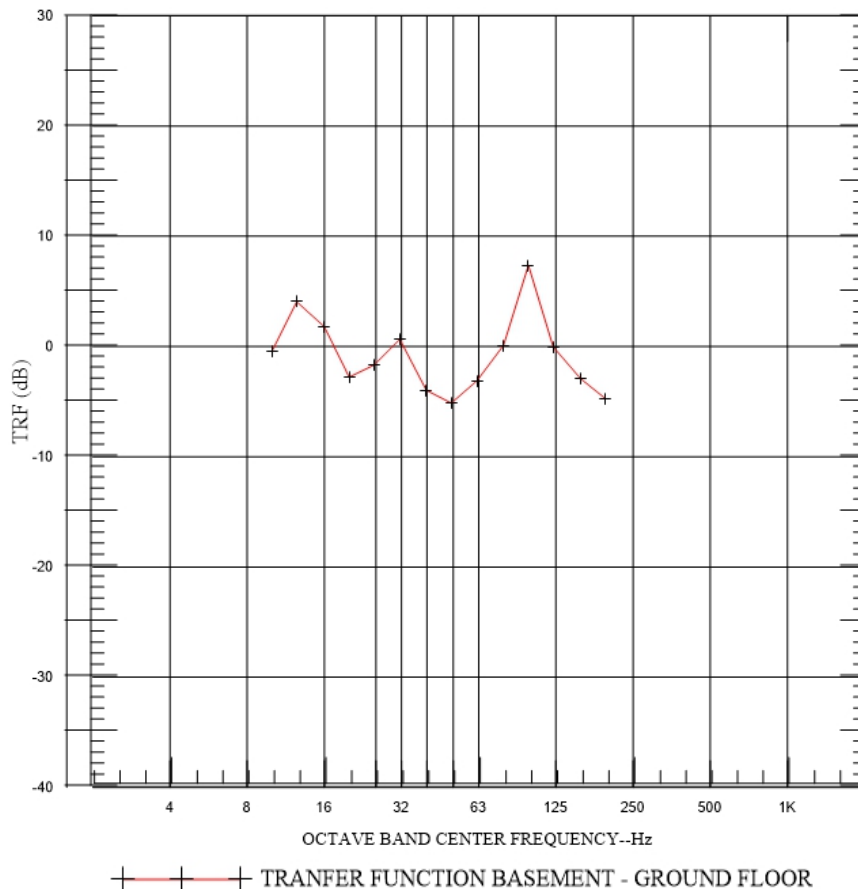
Hz	TUNNEL WALL	SURFACE	TF
10	53,2	46,2	-7,0
12,5	63,1	48,0	-15,1
16	61,9	51,4	-10,5
20	67,7	52,3	-15,4
25	82,6	61,9	-20,7
31,5	85,8	65,0	-20,9
40	89,8	64,6	-25,2
50	69,3	60,8	-8,5
63	66,0	57,7	-8,3
80	66,9	55,5	-11,4
100	83,0	57,8	-25,3
125	62,6	48,0	-14,6
160	45,2	36,9	-8,3
200	41,6	33,5	-8,1



Σχήμα 7.24 - Συνάρτηση μεταφοράς Τοίχωμα σήραγγας-Υπόγειο κτιρίου

Πίνακας 7.8 - Αποτελέσματα Συνάρτησης μεταφοράς Τοίχωμα σήραγγας-Υπόγειο κτιρίου

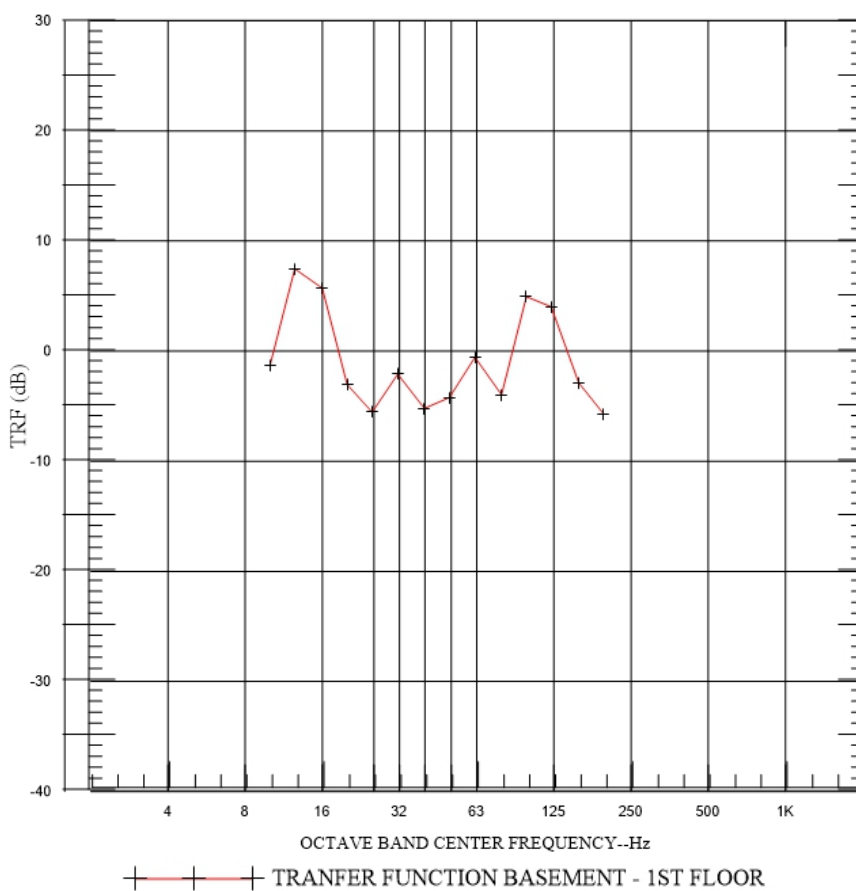
Hz	TUNNEL WALL	BASEMENT	TF
10	53,2	44,0	-9,2
12,5	63,1	43,8	-19,3
16	61,9	44,9	-17,0
20	67,7	56,2	-11,5
25	82,6	67,8	-14,7
31,5	85,8	62,0	-23,9
40	89,8	67,4	-22,4
50	69,3	58,2	-11,2
63	66,0	52,8	-13,2
80	66,9	49,6	-17,3
100	83,0	53,8	-29,2
125	62,6	38,6	-24,0
160	45,2	36,3	-8,9
200	41,6	32,9	-8,7



Σχήμα 7.26 - Συνάρτηση μεταφοράς Υπόγειο κτιρίου-Ισόγειο κτιρίου

Πίνακας 7.10 - Αποτελέσματα Συνάρτησης μεταφοράς Υπόγειο κτιρίου-Ισόγειο κτιρίου

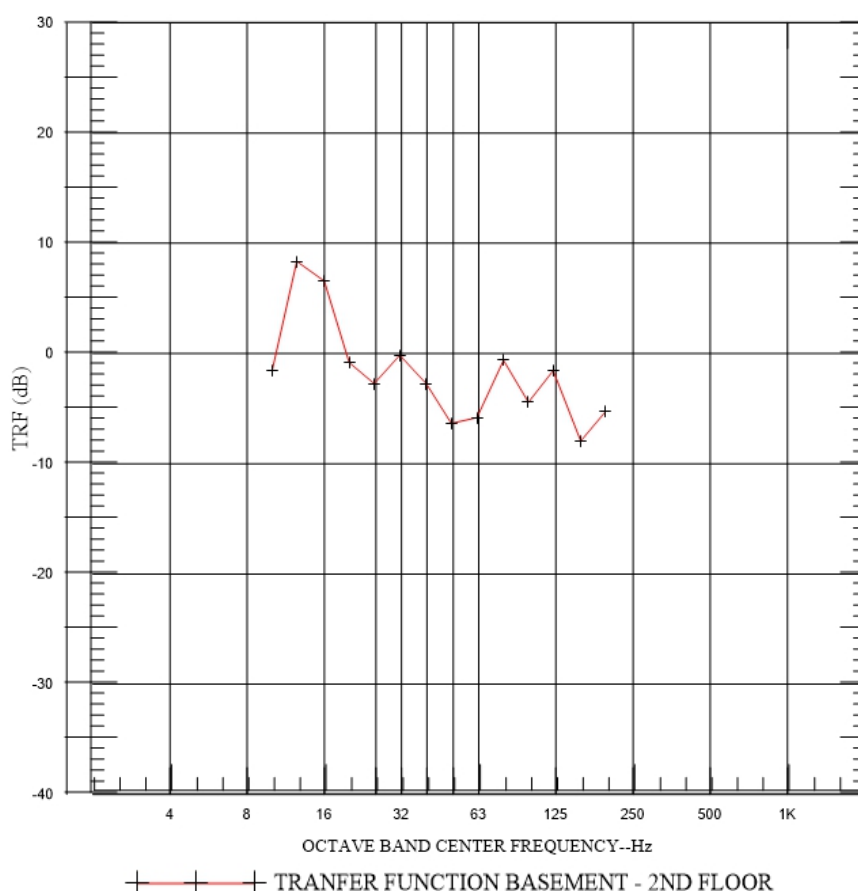
Hz	BASEMENT	GROUND FLOOR	TF
10	44,0	43,57	-0,4
12,5	43,8	47,85	4,1
16	44,9	46,66	1,8
20	56,2	53,41	-2,8
25	67,8	66,17	-1,7
31,5	62,0	62,64	0,7
40	67,4	63,42	-4,0
50	58,2	53,04	-5,1
63	52,8	49,71	-3,1
80	49,6	49,73	0,1
100	53,8	61,20	7,4
125	38,6	38,62	0,0
160	36,3	33,39	-2,9
200	32,9	28,20	-4,7



Σχήμα 7.27 - Συνάρτηση μεταφοράς Υπόγειο κτιρίου-1^{ος} όροφος κτιρίου

Πίνακας 7.11 - Αποτελέσματα Συνάρτησης μεταφοράς Υπόγειο κτιρίου-1^{ος} όροφος κτιρίου

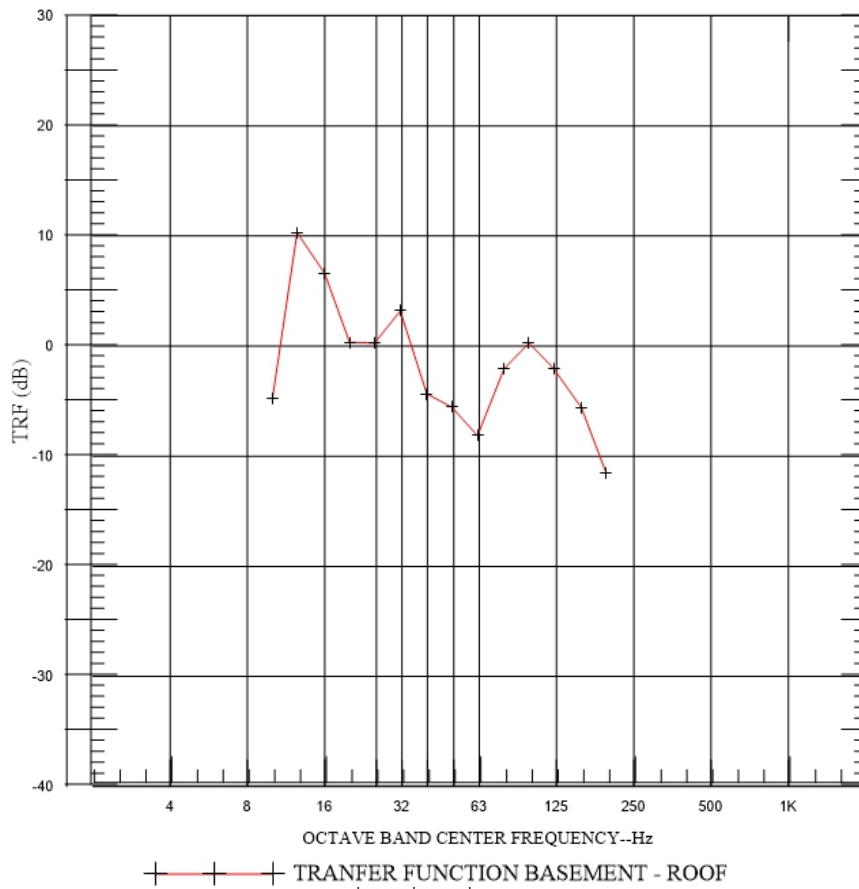
Hz	BASEMENT	1st FLOOR	TF
10	44,0	42,7	-1,3
12,5	43,8	51,3	7,5
16	44,9	50,6	5,7
20	56,2	53,1	-3,0
25	67,8	62,3	-5,5
31,5	62,0	59,9	-2,1
40	67,4	62,2	-5,2
50	58,2	54,0	-4,2
63	52,8	52,3	-0,5
80	49,6	45,7	-3,9
100	53,8	58,8	4,9
125	38,6	42,7	4,0
160	36,3	33,4	-2,9
200	32,9	27,2	-5,7



Σχήμα 7.28 - Συνάρτηση μεταφοράς Υπόγειο κτιρίου-2^{ος} όροφος κτιρίου

Πίνακας 7.12 - Αποτελέσματα Συνάρτησης μεταφοράς Υπόγειο κτιρίου-2^{ος} όροφος κτιρίου

Hz	BASEMENT	2nd FLOOR	TF
10	44,0	42,4	-1,6
12,5	43,8	52,2	8,4
16	44,9	51,4	6,6
20	56,2	55,4	-0,8
25	67,8	65,1	-2,7
31,5	62,0	61,8	-0,1
40	67,4	64,6	-2,7
50	58,2	51,8	-6,3
63	52,8	47,0	-5,8
80	49,6	49,0	-0,6
100	53,8	49,4	-4,4
125	38,6	37,1	-1,5
160	36,3	28,4	-7,9
200	32,9	27,7	-5,3



Σχήμα 7.30 - Συνάρτηση μεταφοράς Υπόγειο κτιρίου-Δώμα

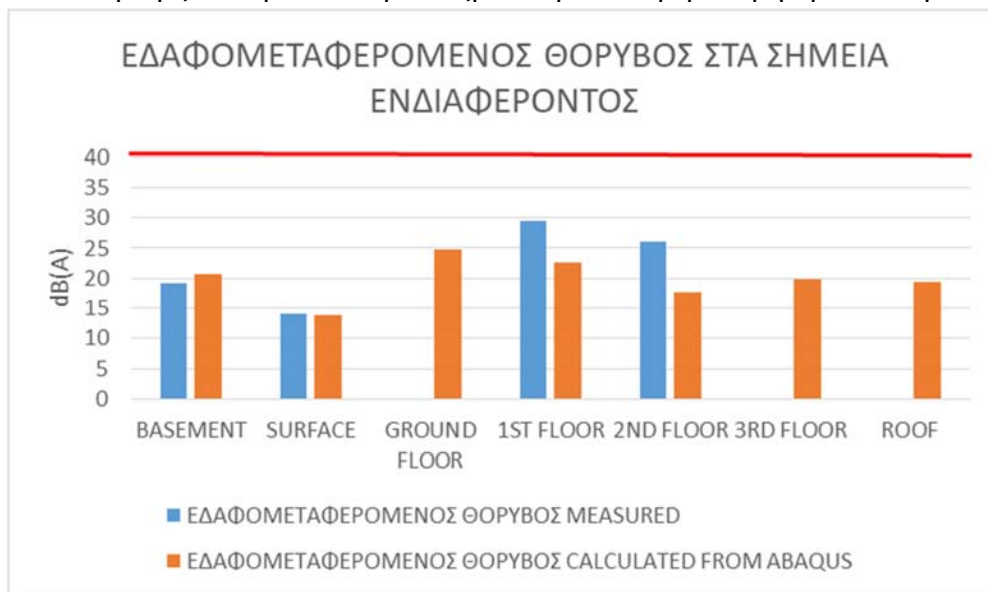
Πίνακας 7.14 - Αποτελέσματα Συνάρτησης μεταφοράς Υπόγειο κτιρίου-Δώμα

Hz	BASEMENT	ROOF	TF
10	44,0	39,2	-4,8
12,5	43,8	54,1	10,3
16	44,9	51,5	6,6
20	56,2	56,5	0,4
25	67,8	68,1	0,3
31,5	62,0	65,2	3,2
40	67,4	63,0	-4,3
50	58,2	52,6	-5,5
63	52,8	44,7	-8,1
80	49,6	47,6	-2,1
100	53,8	54,1	0,3
125	38,6	36,6	-2,1
160	36,3	30,7	-5,6
200	32,9	21,4	-11,5

7.4 Σύγκριση αποτελεσμάτων με τα θεσμοθετημένα όρια

Στη συνέχεια θα γίνει σύγκριση των αποτελεσμάτων της ταχύτητας δόνησης και του παραγόμενου εδαφομεταφερόμενου θορύβου, που διεξάχθηκαν από το προσομοίωμα που μορφώθηκε στο Abaqus, με τα θεσμοθετημένα όρια. Περαιτέρω παρατίθενται τα αποτελέσματα από τις επί τόπου μετρήσεις που έγιναν στην περιοχή μελέτης.

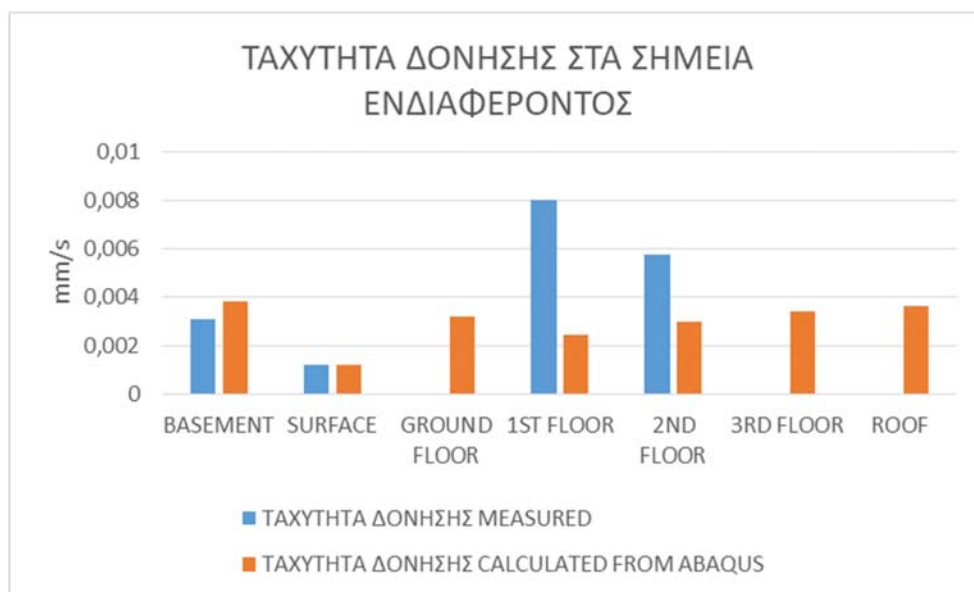
Σχήμα 7.31 - Σύγκριση αποτελεσμάτων από το πρόγραμμα Abaqus & των επί τόπου μετρήσεων με τα θεσμοθετημένα όρια εδαφομεταφερόμενου θορύβου



Πίνακας 7.15 - Τελικά αποτελέσματα εδαφομεταφερόμενου θορύβου από το πρόγραμμα Abaqus & από τις επί τόπου μετρήσεις

	MEASURED	CALCULATED FROM ABAQUS	DIFF	STV
BASEMENT	19,3 dB(A)	20,8 dB(A)	1.5	1.1
SURFACE	14 dB(A)	13,8 dB(A)	0.2	0.1
GROUND FLOOR		24,8 dB(A)		
1ST FLOOR	29,6 dB(A)	22,7 dB(A)	6.9	4.9
2ND FLOOR	26 dB(A)	17,6 dB(A)	8.4	5.9
3RD FLOOR		19,8 dB(A)		
ROOF		19,4 dB(A)		

Σχήμα 7.32 - Σύγκριση αποτελεσμάτων από το πρόγραμμα Abaqus & των επί τόπου μετρήσεων με τα θεσμοθετημένα όρια ταχύτητας δόνησης



Πίνακας 7.16 - Τελικά αποτελέσματα ταχύτητας δόνησης από το πρόγραμμα Abaqus & από τις επί τόπου μετρήσεις

	MEASURED	CALCULATED FROM ABAQUS	DIFF	STV
BASEMENT	0,003092 mm/s	0,00385 mm/s	0.0008	0.000536
SURFACE	0,001218 mm/s	0,00122 mm/s	0.000002	0.000001
GROUND FLOOR		0,003201 mm/s		
1ST FLOOR	0,008033 mm/s	0,002456 mm/s	0.0056	0.003944
2ND FLOOR	0,005742 mm/s	0,002955 mm/s	0.0028	0.001971
3RD FLOOR		0,003393 mm/s		
ROOF		0,003633 mm/s		

Σε όλες τις ανωτέρω περιπτώσεις των σημείων ενδιαφέροντος, εντός και εκτός του μελετώμενου κτιρίου, δεν παρατηρείται καμία υπέρβαση στον εδαφομεταφερόμενο θόρυβο, όπως επίσης και στην ταχύτητα των δονήσεων.

Οι αποκλίσεις των αποτελεσμάτων που εξάχθηκαν από το προσομοίωμα του Abaqus, με τις πραγματικές επί τόπου μετρήσεις, θα σχολιαστούν στο κεφάλαιο των συμπερασμάτων.

8. Συμπεράσματα

Από την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων των ανωτέρω ευρημάτων της μεταπτυχιακής εργασίας, όπως αυτά προέκυψαν από τα δεδομένα των επί τόπου καταγραφών όπως και από την μόρφωση και επεξεργασία του προσομοιώματος, εξήχθησαν τα συμπεράσματα που παρατίθενται ακολούθως:

- Τα επιμέρους προσομοιώματα που μορφώθηκαν χρησιμοποιώντας τα σχεδιαστικά προγράμματα της Autodesk (AutoCAD, Revit, Inventor) εισάχθηκαν επιτυχώς στο υπολογιστικό πρόγραμμα Abaqus, χωρίς την εμφάνιση σφαλμάτων παντός τύπου.
- Έχοντας δώσει αρκετή προσοχή στη λεπτομέρεια, προέκυψε ένα προσομοίωμα μεγάλου αριθμού στοιχείων και κόμβων. Όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των στοιχείων, τόσο περισσότερους βαθμούς ελευθερίας διαθέτει το προσομοίωμα και τελικώς χρειάζεται ο υπολογισμός μεγαλύτερου αριθμού ιδιομορφών. Για το λόγο αυτό, οποιοδήποτε προσομοίωμα άνω των 12.000 ιδιομορφών χρειάζεται να διασπαστεί σε επιμέρους προσομοιώματα κοινής γεωμετρίας αλλά με διαφορετικά φάσματα συχνοτήτων για τον υπολογισμό του με τη μεθοδολογία Lanczos.
- Σε ότι αφορά τις περιβαλλοντικές παραμέτρους, το προσομοίωμα υποεκτιμά τις παραγόμενες ταχύτητες δονήσεων και κατ' επέκταση τις στάθμες θορύβου από την συχνότητα των 40Hz έως τα 63Hz. Ως εκ τούτου, δεδομένου πως τα αποτελέσματα των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν στην περιοχή μελέτης (εδαφομεταφερόμενος θόρυβος και ταχύτητα δόνησης) είναι εντός των θεσμοθετημένων ορίων (<40dB(A) & <0.5mm/s) τα αποτελέσματα του προσομοιώματος είναι και αυτά εντός των θεσμοθετημένων ορίων.
- Το συλλογικό προσομοίωμα, το οποίο υποβλήθηκε στη διαδικασία διεξαγωγής αποτελεσμάτων στο υπολογιστικό πρόγραμμα Abaqus της SIMULIA, προσεγγίζει με ακρίβεια την ταχύτητα δόνησης που παράγεται από τη θεωρητική διέλευση του υπόγειου μέσου σταθερής τροχιάς στην πλειονότητα των συχνοτήτων, αλλά υστερεί στην ορθή πρόβλεψη των τιμών στο εύρος συχνοτήτων από 40-63Hz στους ορόφους του κτιρίου (1^{ος}, 2^{ος}, 3^{ος}, δώμα). Στη συνέχεια, απαριθμούνται οι παράγοντες που επηρέασαν την ορθότητα των αποτελεσμάτων στις συχνότητες 40-63Hz στους άνωθεν ορόφους. Οι παράγοντες παρουσιάζονται με φθίνουσα σειρά πιθανότητας επιρροής στο τελικό προσομοίωμα:
 1. Μια από τις κυριότερες παραδοχές που έγιναν στην μεταπτυχιακή εργασία είναι ότι το προσομοίωμα δημιουργήθηκε και αξιολογήθηκε με υλικά πλήρως ομογενοποιημένα, κάτι το οποίο δεν συναντάται στη φύση. Περαιτέρω, δεν υπήρχε η απαραίτητη πληροφόρηση όσον αφορά τα χρησιμοποιηθέντα υλικά του κτιρίου, καθώς και για την κατάσταση στην οποία βρίσκονταν (ποσοστό ρηγμάτωσης κτιρίου, στάδιο λειτουργίας πλακών) και έγιναν εύλογες παραδοχές στα υλικά της τοικοποιίας και του σκυροδέματος.

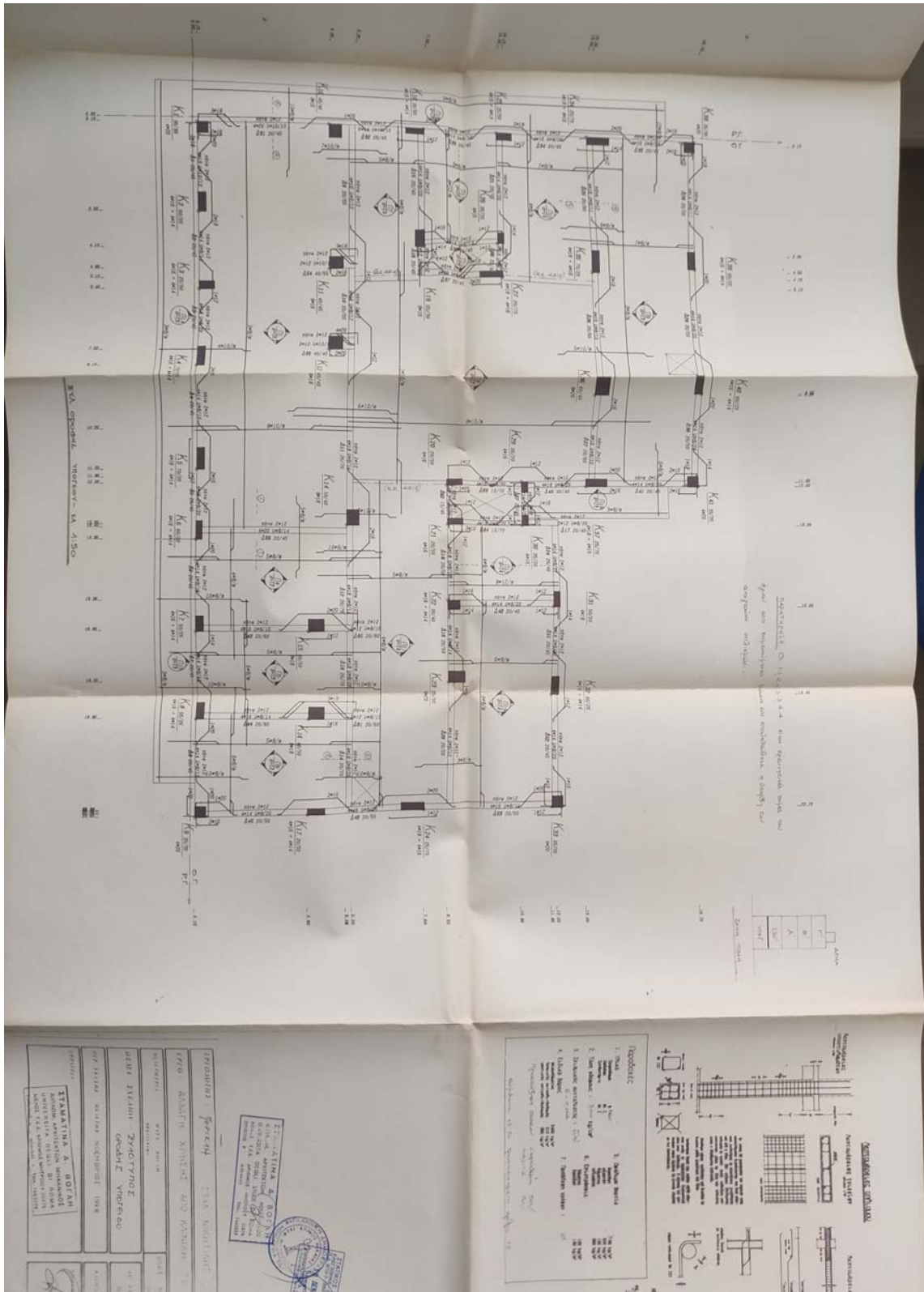
2. Λόγω περιορισμού του προγράμματος Abaqus, έπρεπε να επιλεγεί μία καθολική ιδιομορφική απόσβεση για όλο το προσομοίωμα (έδαφος, σήραγγα, κτίριο), παράγοντας πολύ δεσμευτικός, δεδομένου ότι στην φύση θα έχει διαφορετική ιδιομορφική απόσβεση το έδαφος, το κτίριο και η σήραγγα αντίστοιχα. Στην εν λόγω προσομοίωση επιλέχθηκε απόσβεση 7% ως μέσος όρος των τριών τιμών που θα έπρεπε να προσδοθούν στα εκατέρωθεν προσομοιώματα.
3. Αν και συνυπολογίστηκαν οι επικαλύψεις στις πλάκες στην συνολική μάζα, δεν έγινε διερεύνηση κατανομής του κινητού φορτίου.

Βιβλιογραφία

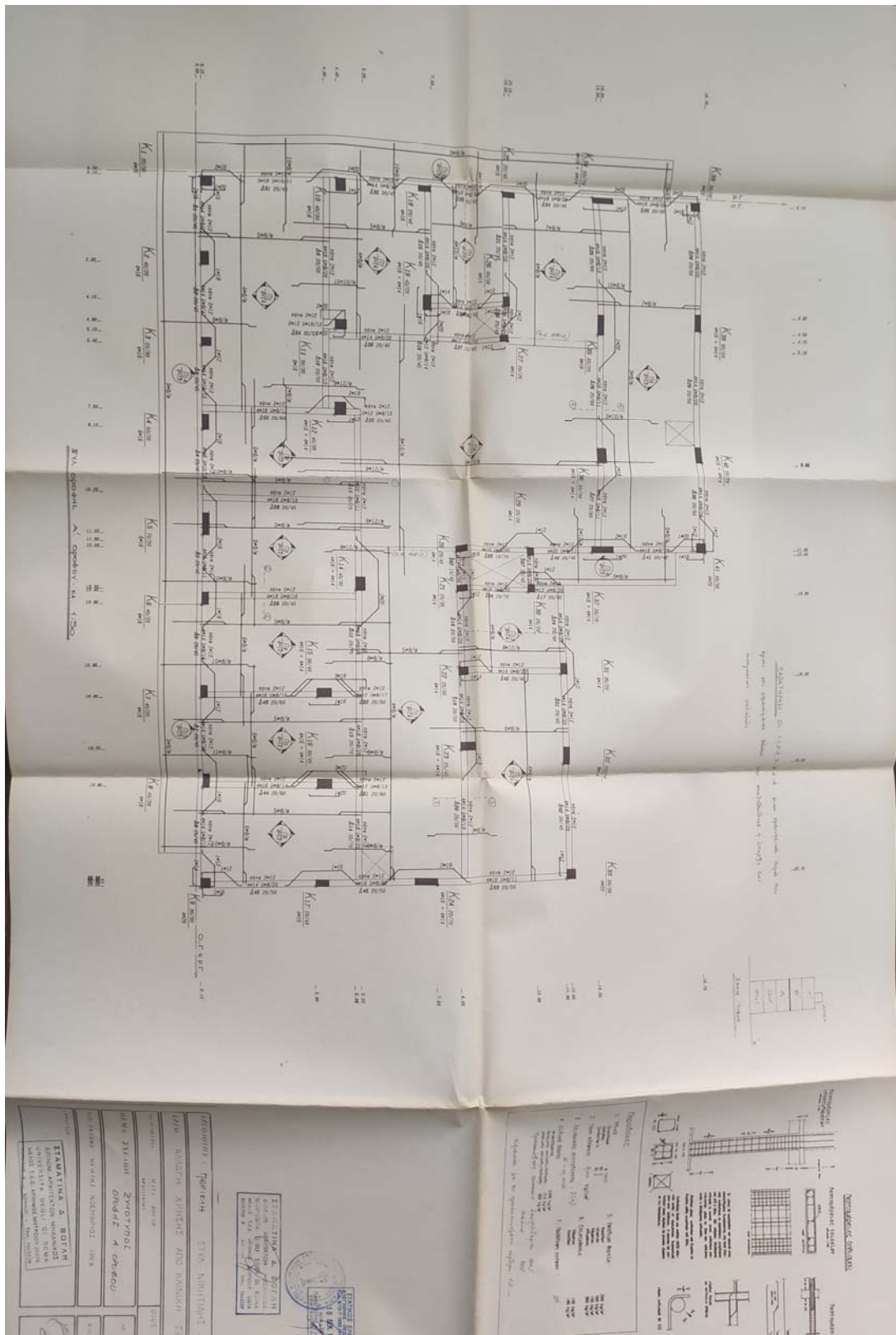
1. Κωνσταντίνος Ε. Βογιατζής (2010). Περιβαλλοντική Τεχνική & Θεσμικό Πλαίσιο Εφαρμογής, Εκδόσεις Συμμετρία
2. Neyfert (2000), Οικοδομική & Αρχιτεκτονική Σύνθεση, Εκδόσεις Μ.Γκιούρδας
3. Νεκτάριος Παπαγιάννης Και Ευθύμιος Μπακαρέζος (2015). Κυματική Φυσική Για Μηχανικούς Ήχου Και Ακουστική, Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών
4. Σ.Σ.Ε. & Περιβάλλον (2020). “Μετρήσεις Αποτελεσματικότητας Απόσβεσης Δονήσεων & Εδαφομεταφερόμενου Θορύβου στην Επέκταση Της Γραμμής 3τμημα Χαϊδάρι - Πειραιάς”
5. Konstantinos Vogiatzis, Vassiliki Zafiropoulou, Haralampos Mouzakis (2018). “Monitoring and assessing the effects from Metro networks construction on the urban acoustic environment: The Athens Metro Line 3 Extension”, Science of the Total Environment
6. Konstantinos Vogiatzis (2012). “Environmental ground borne noise and vibration protection of sensitive cultural receptors along the Athens Metro Extension to Piraeus”, Science of the Total Environment
7. Charalampos Mouzakis, Konstantinos Vogiatzis, Vassiliki Zafiropoulou (2018). “Assessing subway network ground borne noise and vibration using transfer function from tunnel wall to soil surface measured by muck train operation“, Science of the Total Environment
8. Konstantinos Vogiatzis & Harris Mouzakis (2017). “Ground-borne noise and vibration transmitted from subway networks to multi-storey reinforced concrete buildings”, Transport
9. Georges Kouroussis, Konstantinos E. Vogiatzis, David P. Connolly (2017). “Assessment of railway ground vibration in urban area using in-situ transfer mobilities and simulated vehicle-track interaction”, ICRT
10. Haralampos P. Mouzakis and Vasileios K. Dertimanis (2011). Experimental Earthquake Engineering
11. Patrick Vanhonacker (2005). Τεχνικά Χρονικά “αερομεταφερόμενος και εδαφομεταφερόμενος θόρυβος από τη λειτουργία συστημάτων LRT σε αστικές περιοχές”
12. *Seashore. Carl E. (1967). Psychology of Music, Dover Publications, New York*
13. *Bachus. John (1977). The Acoustical Foundations of Music (Second Edition), W. W. Norton & Company, Inc., New York*
14. ΚΥΑ 211773/2012 (ΦΕΚ 1367/Β/27-04-2012)
15. <https://www.wikipedia.org/>

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

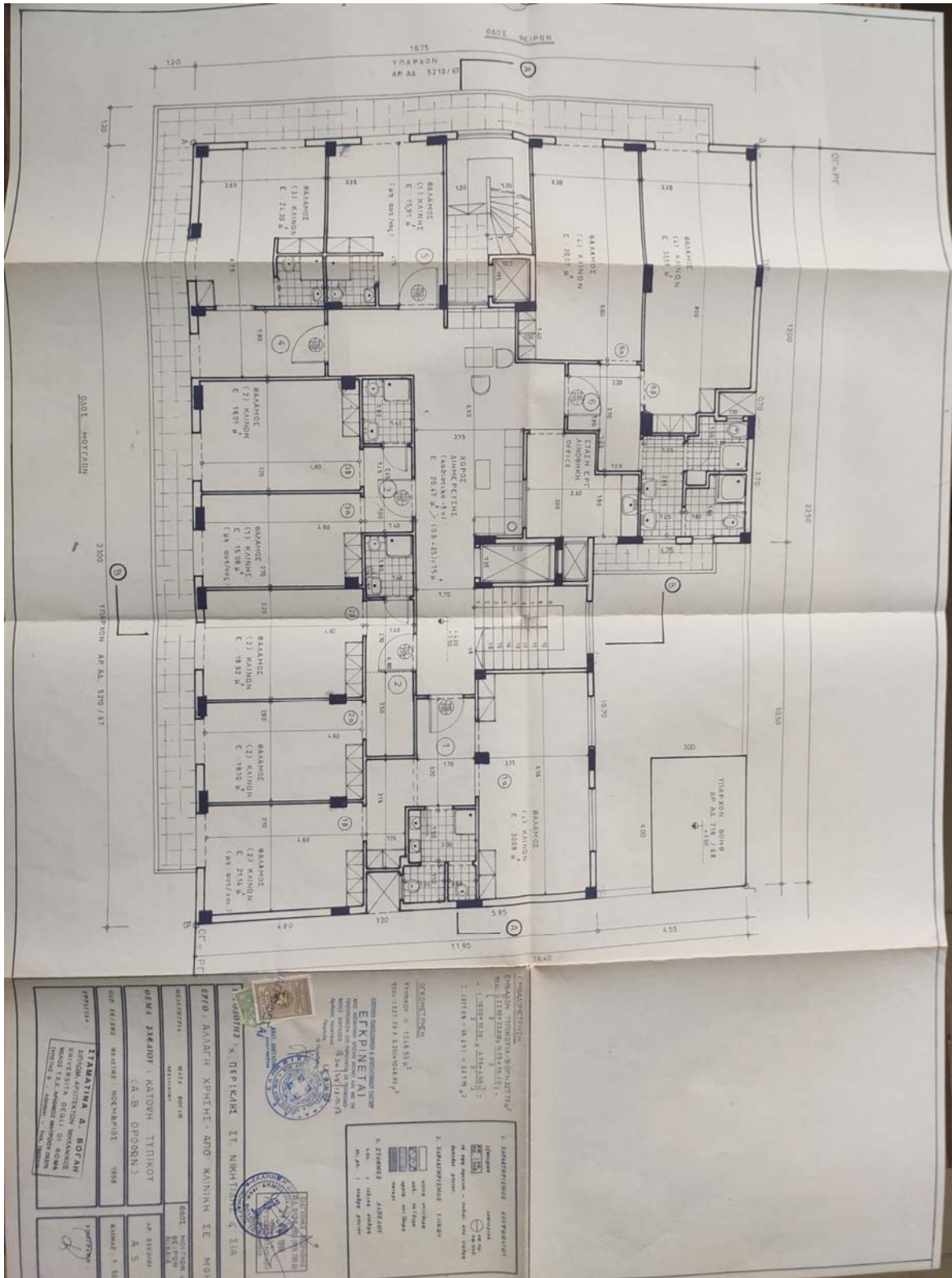
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α
Σχέδια κτιρίου



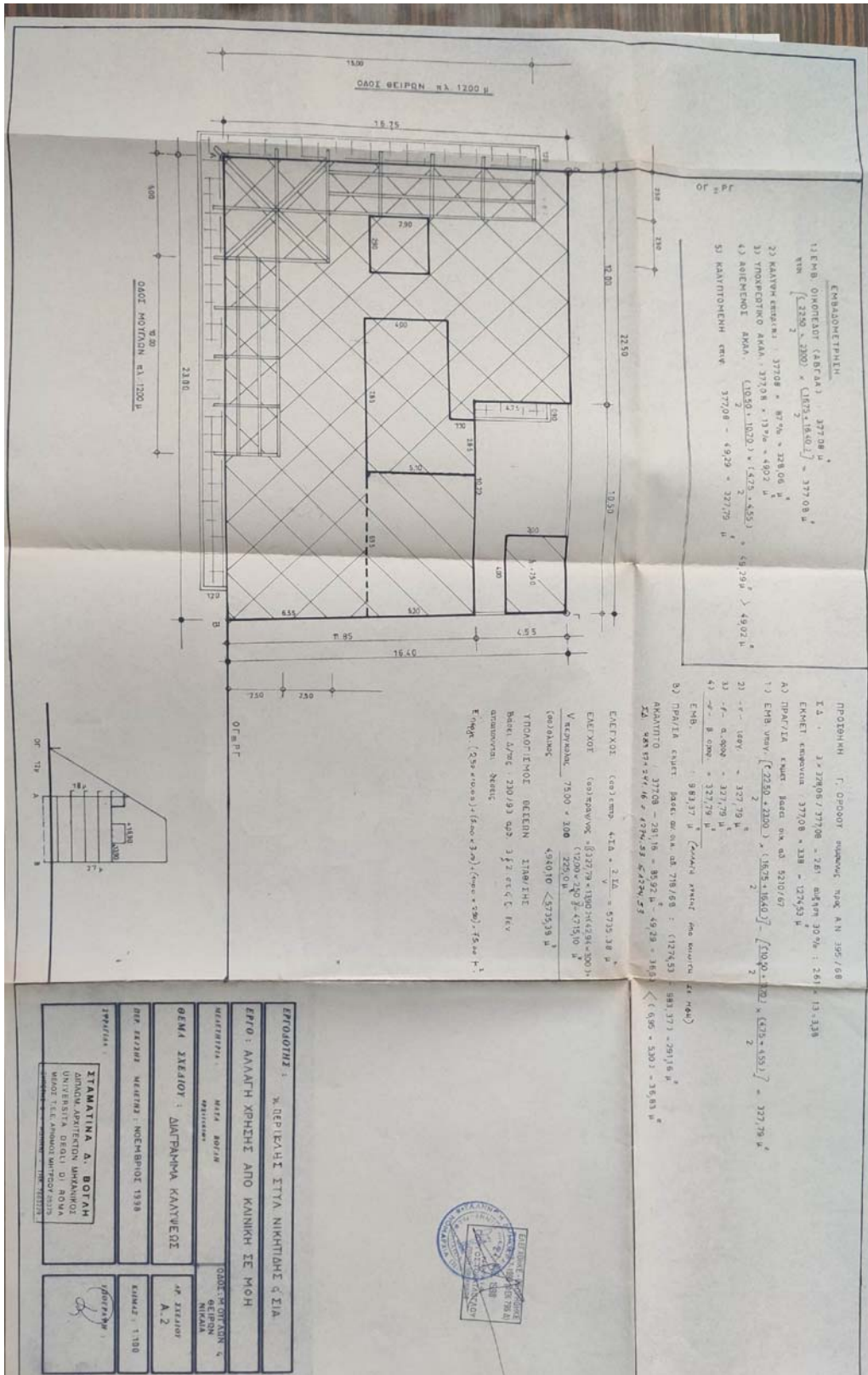
Σχέδιο: Ευλότυπος οροφής Υπογείου



Σχέδιο: Ξυλότυπος οροφής 1^{ου} Ορόφου

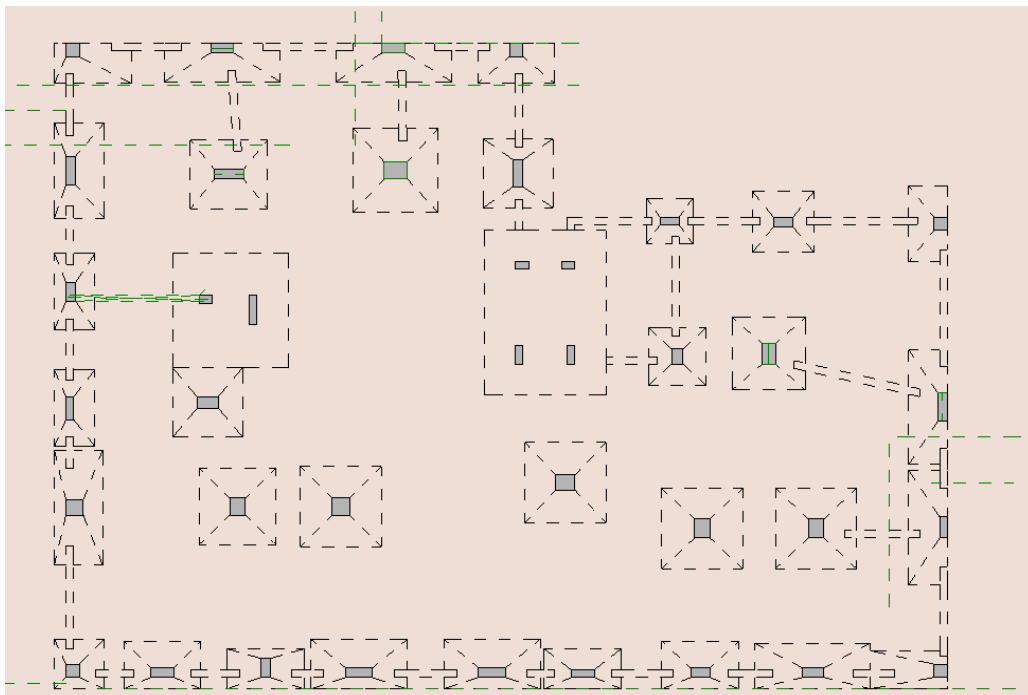


Σχέδιο: Κάτοψη Τυπικού 1^{ου} & 2^{ου} Ορόφου



Σχέδιο: Διάγραμμα Καλύψεων

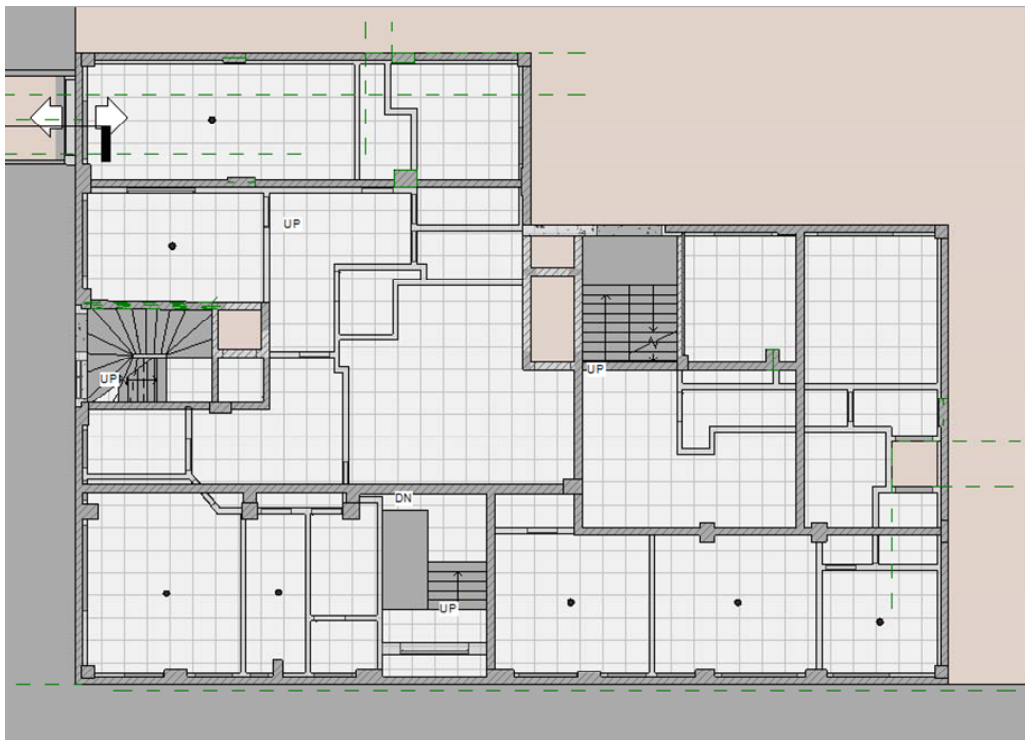
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β
Απεικόνιση προσομοιώματος στο σχεδιαστικό πρόγραμμα Revit



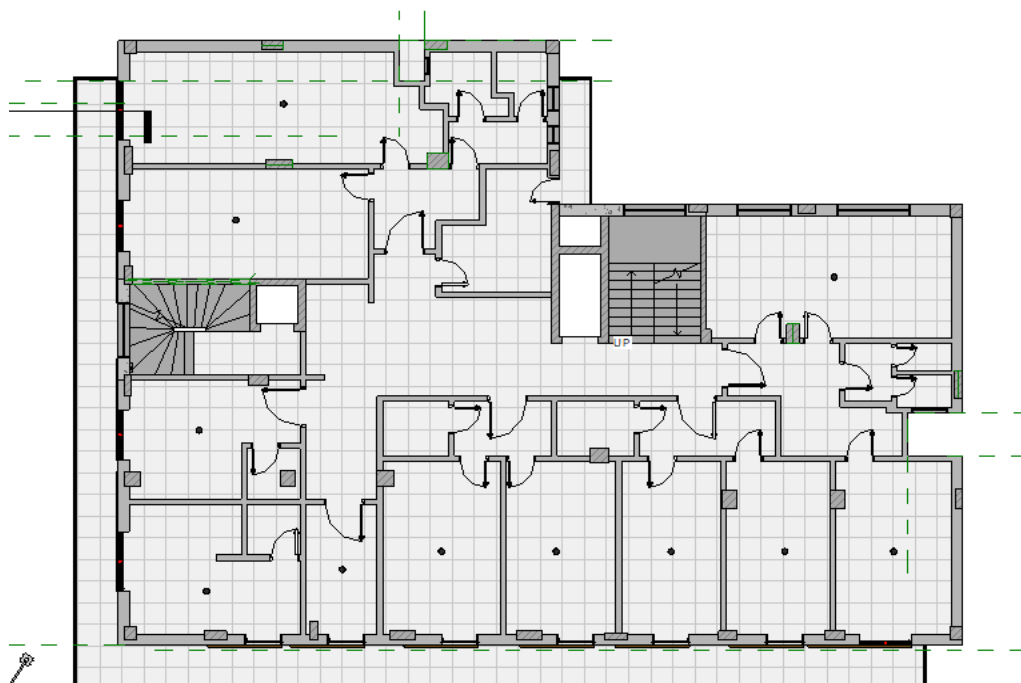
Προσομοίωμα στο επίπεδο της Θεμελίωσης



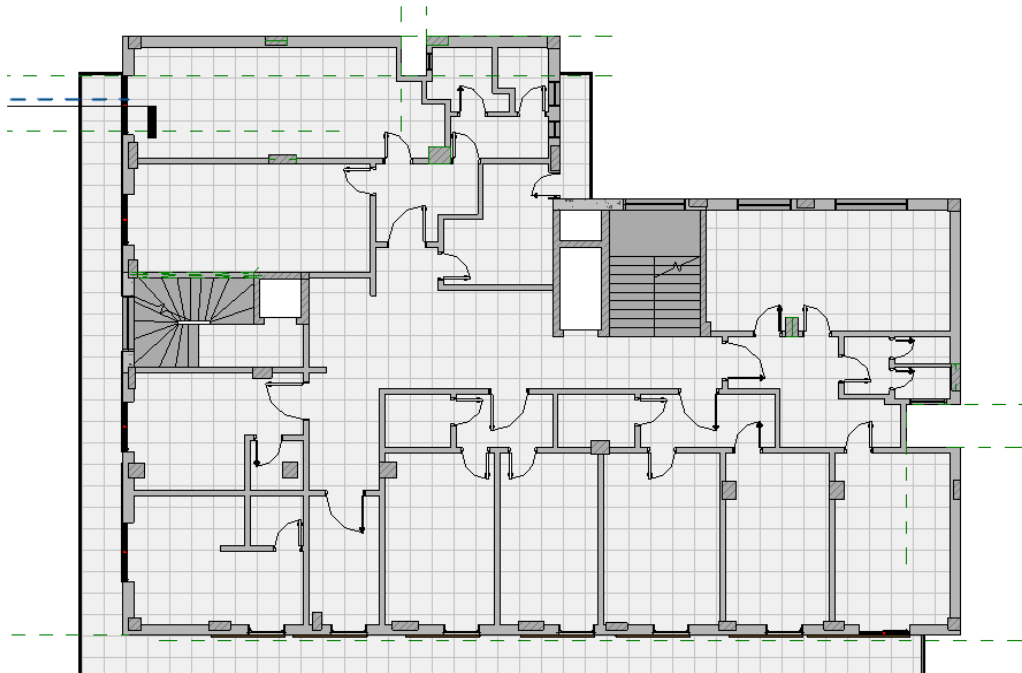
Προσομοίωμα στο επίπεδο του Υπογείου



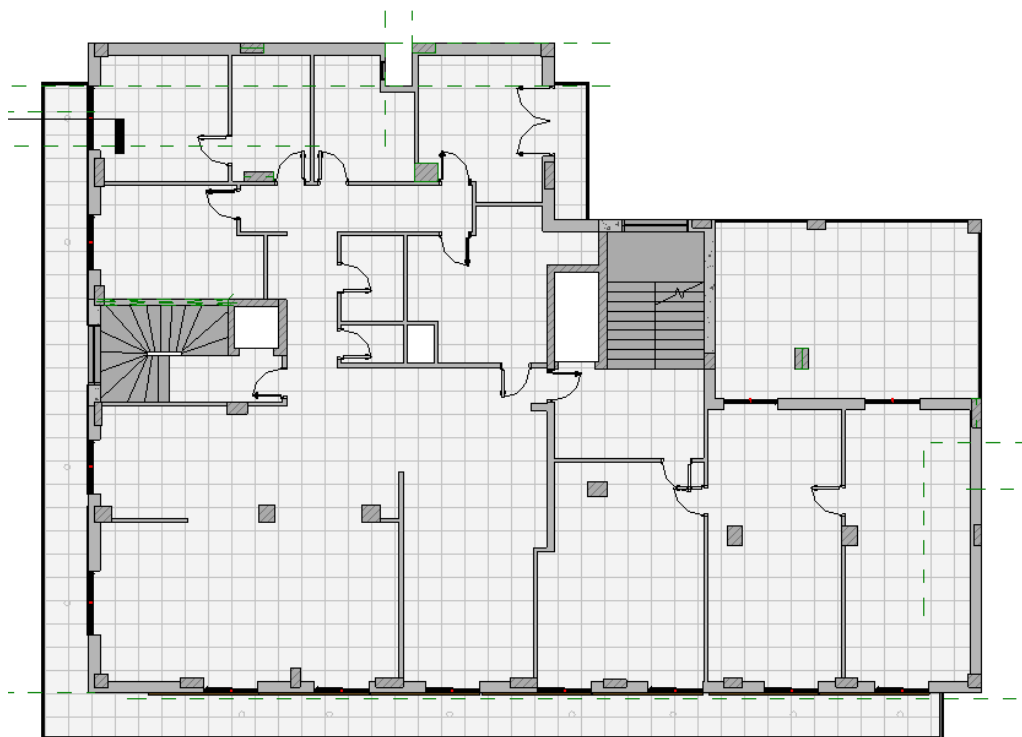
Προσομοίωμα στο επίπεδο του Ισογείου



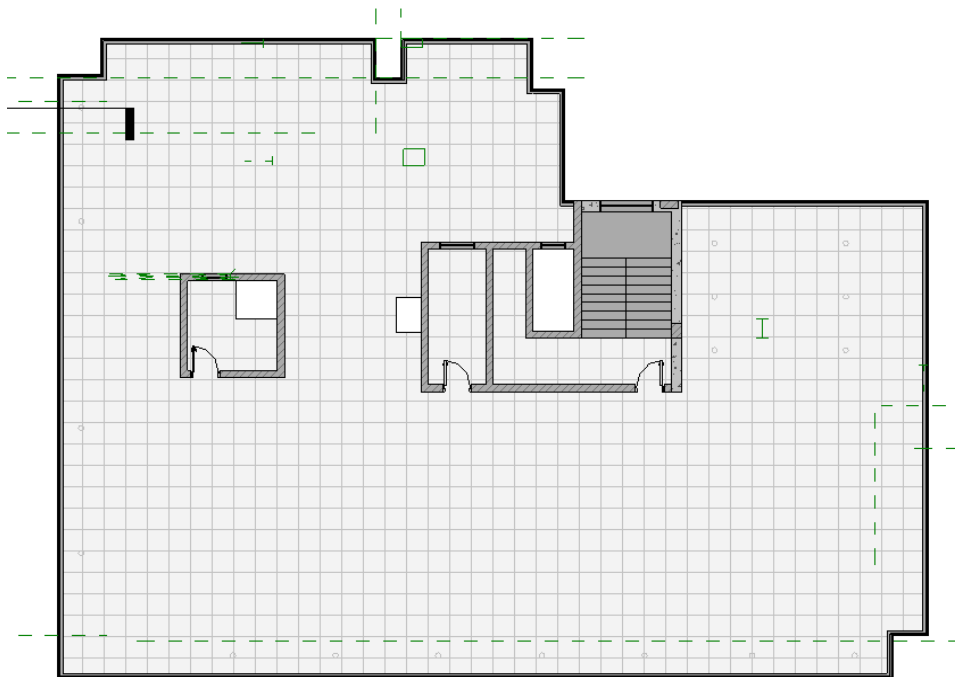
Προσομοίωμα στο επίπεδο του 1^{ου} Ορόφου



Προσομοίωμα στο επίπεδο του 2^{ου} Ορόφου



Προσομοίωμα στο επίπεδο του 3^{ου} Ορόφου



Προσομοίωμα στο επίπεδο του Δώματος



Τομές κτιρίου