

Παραμετρική Σεισμική Ανάλυση Κτιρίου μέσω Ανάπτυξης Λογισμικού με Γραφικό Περιβάλλον Χρήστη και Διερεύνησης Εφαρμογών Τεχνητής Νοημοσύνης και Μηχανικής Μάθησης

Αντώνιος Τομάζος

Πολιτικός Μηχανικός Πανεπιστημίου Πατρών
MSc. Σεισμική Μηχανική & Αντισεισμικές Κατασκευές
MSc. Πληροφοριακά Συστήματα
Μεταπτ. Φοιτητής ΔΧΤ/ΣΘΕΤ, ΕΑΠ

aptom@tee.gr, std164035@ac.eap.gr

Δρ. Γεώργιος Χατζηγεωργίου

Καθηγητής ΕΑΠ

hatzigeorgiou@eap.gr

Περίληψη - Το θέμα της μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας είναι η παραμετρική σεισμική ανάλυση κτιρίου μέσω ανάπτυξης λογισμικού με γραφικό περιβάλλον χρήστη και διερεύνησης εφαρμογών τεχνητής νοημοσύνης και μηχανικής μάθησης. Η πρακτική εφαρμογή της υφιστάμενης γνώσης στο σχεδιασμό, την αποτίμηση και τη μη γραμμική δυναμική ανάλυση κτιρίων λαμβάνει ιδιαίτερη αξία όταν συνδυάζεται με τις τρέχουσες ερευνητικές εξελίξεις και ιδιαίτερα με τον ραγδαία αναπτυσσόμενο τομέα της τεχνητής νοημοσύνης. Η εργασία αποσκοπεί σε μεθοδική, αναλυτική αλλά και κριτική εφαρμογή του θεωρητικού υπόβαθρου της σεισμικής μηχανικής με την εκπόνηση παραμετρικής μελέτης πενταόροφου κτιρίου γραφείων με τυπικές διαστάσεις και φορτίσεις, σε διαφορετικές ζώνες σεισμικότητας και κατηγορίες εδαφικών συνθηκών. Για τους σκοπούς της εργασίας χρησιμοποιούνται δύο εμπορικά λογισμικά και ένα ακαδημαϊκό, το Ruaumoko-3D του Πανεπιστημίου Canterbury της Νέας Ζηλανδίας. Η μεθοδολογία εκπόνησης της εργασίας αποτελείται από τη βιβλιογραφική επισκόπηση, την παραμετρική σεισμική μελέτη του κτιρίου, την ανάπτυξη του κώδικα σε γλώσσα προγραμματισμού Python του γραφικού περιβάλλοντος χρήστη για το λογισμικό Ruaumoko-3D και την διερεύνηση εφαρμογής αλγορίθμων μηχανικής μάθησης σε Python με βάση την προσομοίωση και την ανάλυση του κτιρίου με το λογισμικό Ruaumoko-3D. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τα διάφορα στάδια της ανάπτυξης της εργασίας αναλύονται και ερμηνεύονται κριτικά, για την εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων. Εστιάζεται ιδιαίτερα η συμβολή της τεχνητής νοημοσύνης και μηχανικής μάθησης στην εκπόνηση τεχνικών μελετών με μεγαλύτερη επιστημονική ακρίβεια, αποτελεσματικότητα, αποδοτικότητα, ταχύτητα και οικονομία.

Λέξεις-Κλειδιά: Σεισμική Ανάλυση Κτιρίων, Τεχνητή Νοημοσύνη, Μηχανική Μάθηση, Ruaumoko-3D.

I. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο βασικός σκοπός της Μεταπτυχιακής Διπλωματικής Εργασίας (ΜΔΕ) είναι μία μεθοδική εφαρμογή του σχεδιασμού, της αποτίμησης και της μη γραμμικής σεισμικής ανάλυσης κτιρίων. Για τον σκοπό αυτό εκπονείται παραμετρική μελέτη ενός πενταόροφου κτιρίου γραφείων με τυπικές διαστάσεις και φορτίσεις, σε δύο διαφορετικές ζώνες σεισμικότητας και δύο

κατηγορίες εδαφικών συνθηκών. Η παραμετρική μελέτη περιλαμβάνει γραμμικές δυναμικές αναλύσεις, μη γραμμικές στατικές αναλύσεις pushover και μη γραμμικές δυναμικές αναλύσεις χρονοϊστορίας. Τα αποτελέσματα αναλύονται κριτικά, ώστε να προκύψουν χρήσιμα συμπεράσματα στον τομέα της σεισμικής μηχανικής.

Αναγνωρίζοντας την ευελιξία του λογισμικού Ruaumoko-3D στη προσομοίωση κατασκευών και τις δυνατότητες του για μη γραμμικές δυναμικές αναλύσεις θεωρήθηκε ιδιαίτερα σημαντικό να μπορεί να αξιοποιηθεί τόσο για ερευνητική, όσο και για επαγγελματική χρήση. Ωστόσο, η εισαγωγή των δεδομένων στο Ruaumoko-3D γίνεται με αρχείο κειμένου όπου κάθε γραμμή του αρχείου πρέπει να περιλαμβάνει δεδομένα σε αυστηρά προδιαγεγραμμένη σειρά με το ενδεχόμενο λανθασμένων εισαγωγών. Συνεπώς, ο δεύτερος βασικός σκοπός της ΜΔΕ είναι η ανάπτυξη ενός γραφικού περιβάλλοντος χρήστη το οποίο θα επιταχύνει την εισαγωγή των δεδομένων στο λογισμικό Ruaumoko-3D, θα μειώσει τον κίνδυνο λαθών και θα βελτιώσει την επεξεργασία των αποτελεσμάτων.

Ο τρίτος βασικός σκοπός της ΜΔΕ αφορά τη διερεύνηση εφαρμογής της τεχνητής νοημοσύνης και μηχανικής μάθησης στον κατασκευαστικό τομέα και ειδικότερα στη σεισμική μηχανική. Καθώς η τεχνητή νοημοσύνη εξελίσσεται ραγδαία και υπεισέρχεται σε κάθε επιστημονικό πεδίο η περαιτέρω διερεύνηση εφαρμογής της στη σεισμική μηχανική θα ανακαλύψει το πλεονέκτημα της εκπόνησης τεχνικών μελετών με μεγαλύτερη επιστημονική ακρίβεια, αποτελεσματικότητα, αποδοτικότητα, ταχύτητα και οικονομία.

II. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Η μεθοδολογία εκπόνησης της ΜΔΕ είναι η διαδικασία που ακολουθείται για την ανάλυση και εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικών με το θέμα της εργασίας. Η μεθοδολογία περιλαμβάνει τη μεθοδολογία έρευνας και τη μεθοδολογία ανάπτυξης.

Η μεθοδολογία έρευνας αφορά τη βιβλιογραφική επισκόπηση, τη σύνοψη των ευρημάτων, την ανάλυση, σύνθεση και κριτική παρουσίαση τους.

Με τη βιβλιογραφική επισκόπηση εξετάζεται το θεωρητικό υπόβαθρο του σχεδιασμού κτιρίων από Οπλισμένο Σκυρόδεμα (Ο/Σ), η φιλοσοφία του σεισμικού σχεδιασμού και οι συνθήκες εφαρμογής του. Διερευνώνται οι απαιτήσεις των Ευρωκωδίκων 8 και 2 (EC8, EC2) για το σχεδιασμό κτιρίων από Ο/Σ και οι έννοιες της πλαστιμότητας και του ικανοτικού σχεδιασμού. Όσον αφορά τη σεισμική αποτίμηση κτιρίων εξετάζονται οι στάθμες αξιοπιστίας, οι οριακές καταστάσεις και τα κριτήρια συμμόρφωσης κατά EC8-3. Αναλύονται τα βασικά στοιχεία της μη γραμμικής σεισμικής ανάλυσης. Τίθενται οι βάσεις ανάπτυξης λογισμικού γραφικού περιβάλλοντος χρήστη σε γλώσσα προγραμματισμού Python και τέλος διερευνώνται βιβλιογραφικά οι εφαρμογές της τεχνητής νοημοσύνης και μηχανικής μάθησης τόσο στον κατασκευαστικό τομέα όσο και στο πεδίο της σεισμικής μηχανικής.

Η μεθοδολογία ανάπτυξης περιλαμβάνει:

1) την ανάπτυξη γραφικού περιβάλλοντος χρήστη του λογισμικού Ruaumoko-3D σε γλώσσα προγραμματισμού Python με τη χρήση της βιβλιοθήκης Γραφικών Διεπαφής Χρήστη TKinter.

2) Τον παραμετρικό σχεδιασμό του φέροντος οργανισμού ενός κτιρίου γραφείων με τυπικές διαστάσεις και φορτίσεις, με τη χρήση του εμπορικού λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων SCADA Pro. Ο αρχικός σχεδιασμός γίνεται για μέτρια ζώνη σεισμικότητας με έδαφος τύπου Α και στη συνέχεια ο σχεδιασμός ελέγχεται για υψηλή ζώνη σεισμικότητας με έδαφος τύπου Α, μέτρια ζώνη σεισμικότητας με έδαφος τύπου Β και υψηλή ζώνη σεισμικότητας με έδαφος τύπου Β.

3) Την παραμετρική σεισμική αποτίμηση του φέροντος οργανισμού του κτιρίου με το εμπορικό λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων SeisMobuild. Η σεισμική αποτίμηση γίνεται για τα τέσσερα ανωτέρω σενάρια, ήτοι μέτρια ή υψηλή ζώνη σεισμικότητας και τύπο εδάφους Α ή Β και για τις τρεις στάθμες επιτελεστικότητας (DL, SD, NC). Για τις σεισμικές αποτιμήσεις χρησιμοποιούνται μη γραμμικές στατικές αναλύσεις pushover και μη γραμμικές δυναμικές αναλύσεις χρονοϊστορίας με τεχνητά επιταχυνσιογραφήματα που βασίζονται στα φάσματα του EC8.

4) Την παραμετρική μη γραμμική δυναμική ανάλυση του φέροντος οργανισμού του κτιρίου με το λογισμικό Ruaumoko-3D για τον υπολογισμό των δεικτών βλάβης Park & Ang των δομικών στοιχείων του φέροντος οργανισμού.

5) Την ανάπτυξη ροής εργασιών μηχανικής μάθησης (ML pipeline) σε γλώσσα προγραμματισμού Python με βάση την προσομοίωση του φέροντος οργανισμού του κτιρίου και την ανάλυση του με το λογισμικό Ruaumoko-3D, χρησιμοποιώντας τεχνητά επιταχυνσιογραφήματα.

6) Την επεξεργασία, ανάλυση και κριτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων όλων των ανωτέρω, με σκοπό εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων.

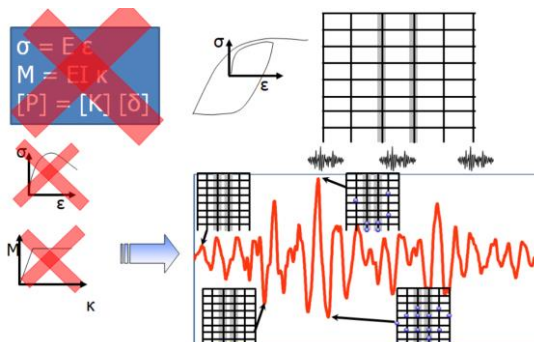
A. Στοιχεία Σεισμικού Σχεδιασμού & Αποτίμησης Κτιρίων

Η φιλοσοφία του σεισμικού σχεδιασμού κτιρίων στοχεύει σε μικρές βλάβες σε μικρής έντασης και συχνούς σεισμούς, σε βλάβες που μπορούν να επιδιορθωθούν σε μέσης έντασης σεισμούς και σε σοβαρές βλάβες, αλλά χωρίς κατάρρευση σε μεγάλης έντασης σεισμούς. Το κτίριο θα πρέπει να διαθέτει επαρκή δυσκαμψία, αντοχή

και πλαστιμότητα για έναν ασφαλή σχεδιασμό. Με τον ικανοτικό σχεδιασμό εξασφαλίζεται ότι όλοι οι όροφοι θα συμμετέχουν στην ανελαστική συμπεριφορά του κτιρίου, κατά τη διάρκεια ενός ισχυρού σεισμού, με τους ανελαστικούς μηχανισμούς παραμορφώσεων (πλαστικές αρθρώσεις) να δημιουργούνται στα άκρα των δοκών, ενώ τα κατακόρυφα δομικά στοιχεία να παραμένουν ελαστικά σε όλους τους ορόφους, εκτός από το τη βάση τους στο επίπεδο της θεμελίωσης.

Ενώ ο σχεδιασμός νέων κτιρίων βασίζεται στη μέθοδο των δυνάμεων, στην αποτίμηση ενός υφιστάμενου κτιρίου χρησιμοποιείται η μέθοδος των μετακινήσεων με την οποία υπολογίζεται η καμπύλη ικανότητας του κτιρίου μέσω ανελαστικών στατικών αναλύσεων pushover, λαμβάνοντας υπόψη την ανελαστική παραμόρφωση των άκρων των δομικών στοιχείων του κτιρίου (πλαστικές αρθρώσεις). Εναλλακτικά, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η μη γραμμική δυναμική ανάλυση χρονοϊστορίας, η οποία θα οδηγήσει σε ακριβέστερη σεισμική αποτίμηση.

Η έννοια της μη γραμμικότητας, στις μη γραμμικές δυναμικές αναλύσεις, υποδηλώνει την ανελαστική απόκριση υλικού και την επιρροή της γεωμετρικής μη γραμμικότητας, δηλαδή μεγάλες μετακινήσεις, στροφές και παραμορφώσεις του φορέα, οπότε δεν ισχύουν οι κανόνες της ελαστικότητας. Οι τάσεις (σ) δεν είναι ανάλογες με τις παραμορφώσεις (ϵ), οι δυνάμεις (P) δεν είναι ανάλογες με τις μετακινήσεις (δ) και οι ροπές κάμψης (M) δεν είναι ανάλογες με τις καμπυλότητες (κ). Η μη γραμμική ανάλυση του φορέα πρέπει να γίνεται σε βήματα εφόσον το μητρώο δυσκαμψίας του μεταβάλλεται συνεχώς, καθώς αναπτύσσονται πλαστικές αρθρώσεις στις θέσεις όπου εμφανίζονται οι δομικές βλάβες.



Εικόνα 1. Μη Γραμμική Ανάλυση Χρονοϊστορίας, Antoniou 2023

Οι δείκτες βλάβης (π.χ. δείκτης Park & Ang) μπορούν να προσδιορίσουν το επίπεδο βλάβης ενός φορέα ή ενός δομικού στοιχείου του φορέα. Ο υπολογισμός ενός δείκτη βλάβης βασίζεται σε παραμορφώσεις (μετακινήσεις ή στροφές), συσσώρευση υστερητικής ενέργειας και πλαστικής παραμόρφωσης.

B. Στοιχεία Τεχνητής Νοημοσύνης & Μηχανικής Μάθησης

Το ραγδαίως αναπτυσσόμενο πεδίο της τεχνητής νοημοσύνης (AI) και μηχανικής μάθησης (ML), υπεισέρχεται διαρκώς σε κάθε άλλο επιστημονικό πεδίο, συμπεριλαμβανομένου και αυτού της σεισμικής μηχανικής και γενικότερα του κατασκευαστικού τομέα.

Οι τελευταίες εξελίξεις στον τομέα της τεχνητής νοημοσύνης δίνουν ένα κεντρικό ρόλο στην έννοια του «πράκτορα» (agent) ο οποίος έχει αντίληψη του περιβάλλοντος του, μαθαίνει από τις ενέργειες του,

δημιουργεί στόχους και προσπαθεί να τους πραγματώσει και προσαρμόζεται σε τυχόν αλλαγές του περιβάλλοντος του.

Στη μηχανική μάθηση οι «πράκτορες» τεχνητής νοημοσύνης εκπαιδεύονται ώστε να μπορούν να αναγνωρίζουν μοτίβα στα δεδομένα, να διαπιστώνουν σχέσεις και να κάνουν προβλέψεις χωρίς, ωστόσο, να είναι ρητά προγραμματισμένοι.

Έχουν αναπτυχθεί διάφορες κατηγορίες μηχανικής μάθησης με αντίστοιχους αλγόριθμους. Η διαδικασία εφαρμογής των αλγορίθμων σε ένα μοντέλο μηχανικής μάθησης είναι: 1) Λήψη δεδομένων, 2) Προεπεξεργασία δεδομένων, 3) Διαχωρισμός δεδομένων σε δεδομένα Εκπαίδευσης / Δοκιμής, 4) Εκπαίδευση του μοντέλου, 5) Δοκιμή / Επαλήθευση του μοντέλου, 6) Μέτρηση της απόδοσης του μοντέλου, 7) Οπτικοποίηση των δεδομένων.

Η ροή εργασιών μηχανικής μάθησης (ML pipeline) συνδέει όλα τα διαδοχικά βήματα εφαρμογής της μηχανικής μάθησης σε ένα σύνολο δεδομένων (dataset).

Σημαντικό ρόλο για την επιτυχή εφαρμογή των μοντέλων μηχανικής μάθησης τους παίζουν τα ίδια τα δεδομένα που τροφοδοτούν τα μοντέλα. Η μηχανική χαρακτηριστικών (feature engineering) αναλαμβάνει την μετατροπή των πρωτογενών δεδομένων (raw data) σε χαρακτηριστικά (features), τα οποία μπορούν να επεξεργαστούν οι αλγόριθμοι μηχανικής μάθησης. Η διερευνητική ανάλυση δεδομένων (EDA) χρησιμοποιείται για την επιτυχή επιλογή των κατάλληλων αλγορίθμων μηχανικής μάθησης για συγκεκριμένο σύνολο δεδομένων.

Οι ερευνητές που επιθυμούν να εφαρμόσουν μοντέλα μηχανικής μάθησης στο επιστημονικό τους πεδίο θα πρέπει να γνωρίζουν τα προβλήματα και τους κινδύνους που ελλοχεύουν για πιθανή εξαγωγή λανθασμένων συμπερασμάτων. Πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στη μηχανική χαρακτηριστικών και στα προβλήματα μεροληψίας (bias), δηλαδή ενός μη αντιπροσωπευτικού στον πληθυσμό συνόλου δεδομένων, υπερπροσαρμογής (overfitting), δηλαδή υπερβολικά καλής εκπαίδευσης του μοντέλου και υποπροσαρμογής (underfitting), δηλαδή μοντέλο χαμηλής απόδοσης.

Η ενσωμάτωση της τεχνητής νοημοσύνης στη διαχείριση τεχνικών έργων μπορεί να βελτιώσει την αποδοτικότητα και την αποτελεσματικότητα των ομάδων των έργων. Εργαλεία τεχνητής νοημοσύνης μπορούν να παρακολουθούν την πορεία των εργασιών, την τήρηση των προθεσμιών και να εντοπίζουν αποκλίσεις από τα χρονοδιαγράμματα και τους προϋπολογισμούς. Η διαχείριση κινδύνων μπορεί να γίνει αποτελεσματικότερη και η διασφάλισή της ποιότητας και της ασφάλειας των τεχνικών έργων μπορεί να βελτιωθεί.

Μοντέλα τεχνητής νοημοσύνης μπορούν να εφαρμοστούν στην ανάλυση σεισμικού κινδύνου, στην εκτίμηση της σεισμικής ευπάθειας των κατασκευών, στην ανίχνευση βλαβών και στη προσομοίωση / παραμετρική διερεύνηση της σεισμικής απόκρισης κατασκευών.

Η εφαρμογή της τεχνητής νοημοσύνης στον κατασκευαστικό τομέα περιλαμβάνει παρόλα αυτά και προκλήσεις, όπως θέματα ποιότητας και διαθεσιμότητας δεδομένων για επαρκή λήψη αποφάσεων, θέματα διαλειτουργικότητας και ενσωμάτωσης των μοντέλων τεχνητής νοημοσύνης με υπάρχοντα συστήματα, ηθικά ζητήματα (προκατάληψη και μεροληψία κατά τη

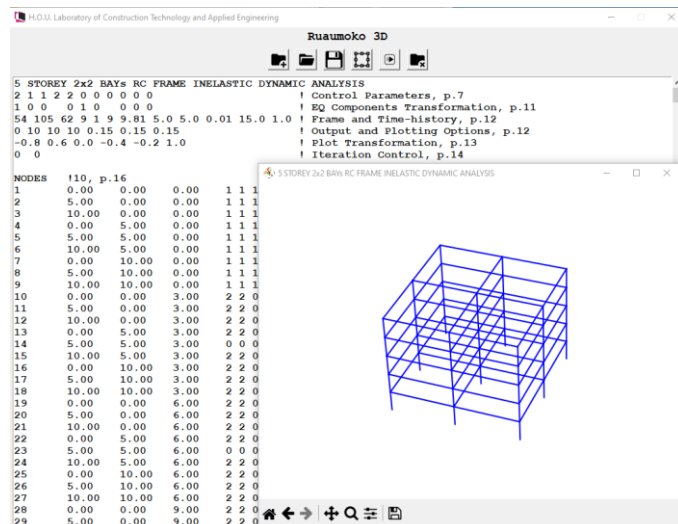
διαδικασία λήψης αποφάσεων), θέματα ασφάλειας, απορρήτου και διαχείρισης προσωπικών δεδομένων και θέματα ανεπάρκειας στην ερμηνευσιμότητα (interpretability) και επεξηγησιμότητα (explainability) των μοντέλων, η οποία μπορεί να οδηγήσει σε έλλειψη εμπιστοσύνης λόγω της αδιαφάνειας και περιπλοκότητάς του τρόπου με τον οποίο λειτουργούν τα μοντέλα τεχνητής νοημοσύνης.

C. Ανάπτυξη Λογισμικού Γραφικού Περιβάλλοντος Χρήστη

Η δομή του κώδικα Python που αναπτύχθηκε περιλαμβάνει: 1) Εισαγωγή βιβλιοθηκών, 2) Καθορισμό του κεντρικού παραθύρου, 3) Ορισμό των καθολικών μεταβλητών, 4) Ορισμό συναρτήσεων, 5) Διάταξη γραφικών αντικειμένων, 6) Μενού επιλογών, 7) Αρχή κύριου κώδικα, 8) Τέλος κύριου κώδικα.

Στη λειτουργικότητα του λογισμικού περιλαμβάνονται:

- 1) Ορισμός βασικών παραμέτρων του τρισδιάστατου πλαισίου, 2) Ορισμός ιδιοτήτων μελών, 3) Ορισμός μελών, 4) Τρισδιάστατη γραφική απεικόνιση του πλαισίου, 5) Ανάλυση του πλαισίου με το Ruaumoko-3D, 6) Απεικόνιση αποτελεσμάτων.



Εικόνα 2. Λογισμικό Γραφικού Περιβάλλοντος Χρήστη

Το λογισμικό διαθέτει ενσωματωμένο κειμενογράφο, ώστε να δίνεται η δυνατότητα στο χρήστη να παρέμβει στα δεδομένα του Ruaumoko-3D.

D. Εφαρμογή Μηχανικής Μάθησης

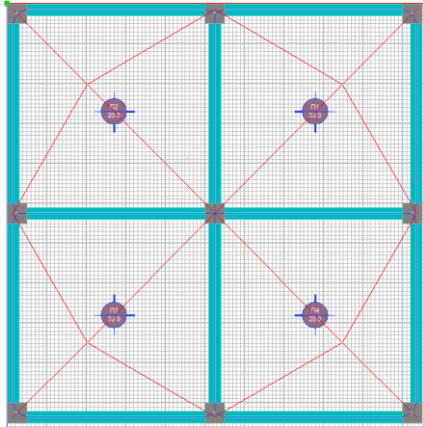
Η πρακτική εφαρμογή της μηχανικής μάθησης στη ΜΔΕ αφορούσε την ανάπτυξη ροής εργασιών μηχανικής μάθησης (ML pipeline) σε γλώσσα προγραμματισμού Python με βάση την προσομοίωση του φέροντος οργανισμού του κτιρίου και την ανάλυση του με το λογισμικό Ruaumoko-3D με τη χρήση τεχνητών επιταχυνσιογραφημάτων.

Από τα αποτελέσματα των μη γραμμικών δυναμικών αναλύσεων συλλέχθηκαν οι δείκτες βλάβης Park & Ang για τη δημιουργία ενός συνόλου δεδομένων, το οποίο διέθετε τα εξής χαρακτηριστικά: μέγιστη εδαφική επιτάχυνση (PGA), μέγιστη εδαφική ταχύτητα (PGV), ένταση Agias και σταθμισμένο δείκτη βλάβης Park & Ang για κάθε ανάλυση.

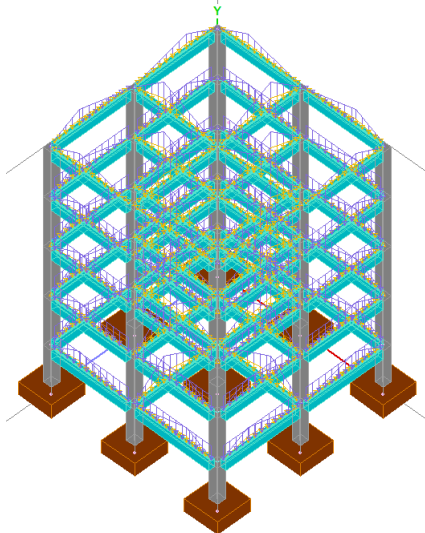
III. ΕΠΙΛΕΓΜΕΝΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

A. Παραμετρικός Σχεδιασμός & Αποτίμηση Κτιρίου

Για τον παραμετρικό σεισμικό σχεδιασμό του κτιρίου με το λογισμικό SCADA Pro η εισαγωγή των δεδομένων του κτιρίου έγινε με γραφικό τρόπο, εισάγοντας τις γενικές παραμέτρους υλικών και ανάλυσης, τη γεωμετρία του φέροντος οργανισμού και τις διαστάσεις δομικών στοιχείων χωρίς κάποιον ιδιαίτερο υπολογισμό από το χρήστη.



Εικόνα 3. Κάτοψη Πλακών Ορόφου, Γραμμές Διαρροής



Εικόνα 4. Αξονομετρικό Σχέδιο με Κατακόρυφα Φορτία

Μετά το πέρας της ανάλυσης οι κανονιστικοί έλεγχοι για τη σεισμική ζώνη II και τύπο εδάφους A ικανοποιούνται πλήρως, εφόσον αυτές οι συνθήκες αποτελούσαν και τη βάση του σχεδιασμού. Παρεμπιπτόντως, προέκυψε ότι οι έλεγχοι επίσης ικανοποιούνται και για τη σεισμική ζώνη III για τον τύπο εδάφους A. Οι κανονιστικοί έλεγχοι ικανοποιούνται τόσο με τη χρήση της ισοδύναμης στατικής φασματικής ανάλυσης όσο και με τη χρήση της ιδιομορφικής φασματικής ανάλυσης.

Στην περίπτωση του τύπου εδάφους B όλοι οι κανονιστικοί έλεγχοι ικανοποιούνται για τη σεισμική ζώνη II, είτε την ισοδύναμη στατική φασματική ανάλυση είτε με την ιδιομορφική φασματική ανάλυση. Στην περίπτωση, όμως της σεισμικής ζώνης III, με τύπο εδάφους B δεν ικανοποιούνται οι έλεγχοι σχετικής μετακίνησης κάποιων ορόφων είτε με την ισοδύναμη

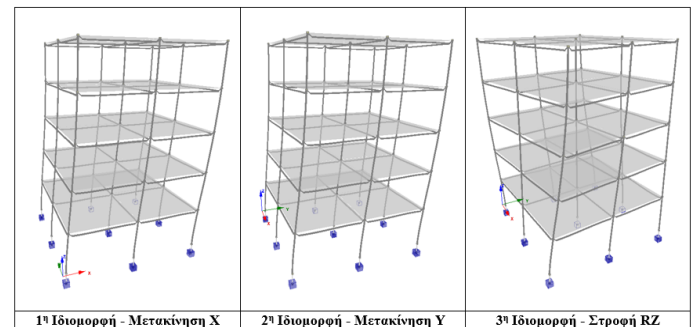
στατική φασματική ανάλυση, είτε με την ιδιομορφική φασματική ανάλυση. Σε αυτές τις περιπτώσεις απαιτείται επανασχεδιασμός (π.χ. με αύξηση των διατομών των υποστυλωμάτων), ώστε να αυξηθεί η οριζόντια δυσκαμψία του φέροντος οργανισμού.

Παρατηρήθηκε ότι η συμμετοχή των ανωτέρων ιδιομορφών (από τη 2η και πάνω) είναι σημαντική, συνεπώς δεν ενδείκνυται η εφαρμογή της ισοδύναμης στατικής φασματικής ανάλυσης, αλλά απαιτείται η εφαρμογή της ιδιομορφικής φασματικής ανάλυσης.

Μετά την ολοκλήρωση των διαστασιολογήσεων από το SCADA Pro προέκυψαν οι οπλισμοί των δομικών στοιχείων και οι ξυλότυποι των ορόφων. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι δεν υπήρξε διαφοροποίηση στους οπλισμούς για τα τέσσερα σενάρια παραμετρικού σχεδιασμού, ήτοι σεισμικής ζώνης II ή III και τύπου εδάφους A ή B.

Για τον παραμετρική σεισμική αποτίμηση του κτιρίου με το λογισμικό Seisbuild επιλέχθηκε ο Κανονισμός EC8-3 με το Ελληνικό Παράρτημα και η εισαγωγή των δεδομένων του κτιρίου έγινε με γραφικό τρόπο, εισάγοντας εκτός από τη γεωμετρία του φέροντος οργανισμού, τις διαστάσεις των δομικών στοιχείων και τις γενικές παραμέτρους υλικών, τους οπλισμούς των δομικών στοιχείων όπως αυτοί υπολογίστηκαν από το λογισμικό SCADA Pro κατά τη φάση του σχεδιασμού.

Με την ολοκλήρωση της ιδιομορφικής ανάλυσης αποτυπώνονται οι τρεις πρώτες ιδιομορφές ως ακολούθως.



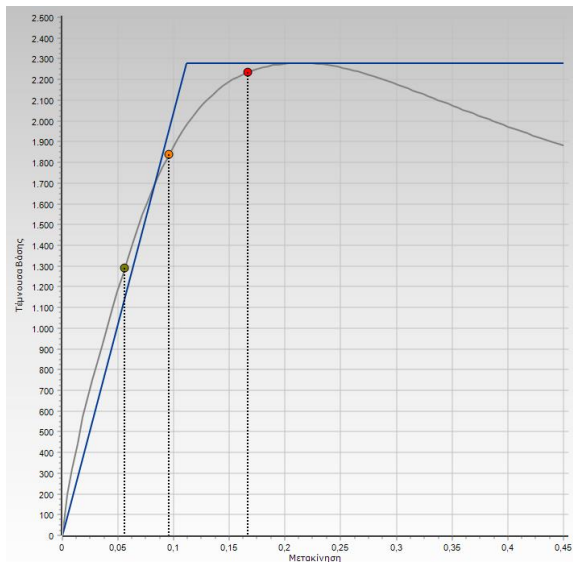
Εικόνα 5. Ιδιομορφές Προσομοιώματος

Συγκρίνοντας τις ιδιοπεριόδους για την περίπτωση εδάφους τύπου A με την περίπτωση εδάφους τύπου B παρατηρούμε ότι οι ιδιοπερίοδοι για τύπο εδάφους B είναι γενικά μεγαλύτεροι, ήτοι το προσομοίωμα του φέροντος οργανισμού είναι πιο «εύκαμπτο», δεδομένης της ίδιας μάζας του φέροντος οργανισμού.

Πραγματοποιήθηκαν 576 μη γραμμικές στατικές αναλύσεις pushover από το λογισμικό Seisbuild, με ομοιόμορφη και ιδιομορφική κατανομή, μονή και διπλή εκκεντρότητα, για τα τέσσερα σενάρια παραμετρικής αποτίμησης, ήτοι σεισμικής ζώνης II ή III και τύπου εδάφους A ή B και για τις τρεις στάθμες επιτελεστικότητας (DL, SD, NC). Στους ελέγχους Στροφής / Χορδής δεν παρατηρήθηκε καμία υπέρβαση του Λόγου Απαίτησης προς Ικανότητα και για τις τρεις στάθμες επιτελεστικότητας.

Οι έλεγχοι διατμητικών δυνάμεων, για έδαφος A και ζώνη II ικανοποιούνται πλήρως για όλες τις στάθμες επιτελεστικότητας. Για έδαφος A και ζώνη III υπήρξαν οριακές υπερβάσεις μόνο στη στάθμη NC, σε δοκούς του πρώτου και δεύτερου ορόφου, ωστόσο, γενικά οι λόγοι ήταν πολύ κοντά στη μονάδα. Για έδαφος B και ζώνη II

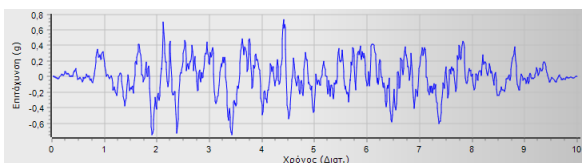
υπήρξαν οριακές υπερβάσεις μόνο στη στάθμη NC και πάλι πολύ κοντά στη μονάδα σε δοκούς του πρώτου και δεύτερου ορόφου. Για έδαφος B και ζώνη III υπήρξαν μόνο δύο οριακές υπερβάσεις σε δύο δοκούς του πρώτου ορόφου στη στάθμη SD κοντά στη μονάδα και αρκετές υπερβάσεις σε δοκούς του πρώτου και δεύτερου ορόφου στη στάθμη NC. Παρεμπιπτόντως, δεν υπήρξε καμία υπέρβαση του Λόγου Απαιτήσης προς Ικανότητα σε ελέγχους Στροφής / Χορδής και διατμητικών δυνάμεων σε κανένα υποστυλώμα και για τα τέσσερα σενάρια του παραμετρικού σχεδιασμού και B και για τις τρεις στάθμες επιτελεστικότητας (DL, SD, NC).



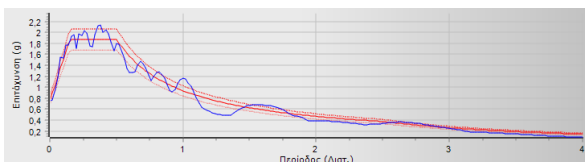
Εικόνα 6. Ενδεικτική Καμπύλη Ικανότητας, Έδαφος B, Ζώνη III

Πραγματοποιήθηκαν 168 μη γραμμικές αναλύσεις χρονοϊστορίας από το λογισμικό SeisMobuild για κάθε οριζόντια διεύθυνση X, Y, για κάθε στάθμη επιτελεστικότητας (DL, SD, NC), για τους δύο τύπους εδάφους A, B και για τις σεισμικές ζώνες II, III. Χρησιμοποιήθηκαν επτά (7) τεχνητά επιταχυνσιογραφήματα ανά σεισμική ζώνη και τύπο εδάφους, τα οποία βασίστηκαν στα φάσματα του EC8.

Δεν υπήρξε καμία ιδιαίτερη διαφοροποίηση στους ελέγχους Στροφής/Χορδής και Διατμητικών Δυνάμεων σε σχέση με τις μη γραμμικές στατικές αναλύσεις pushover.



Εικόνα 7. Ενδεικτική Χρονοϊστορία Επιτάχυνσης (NC, B, III)



Εικόνα 8. Φάσμα για την ανωτέρω Χρονοϊστορία (NC, B, III)

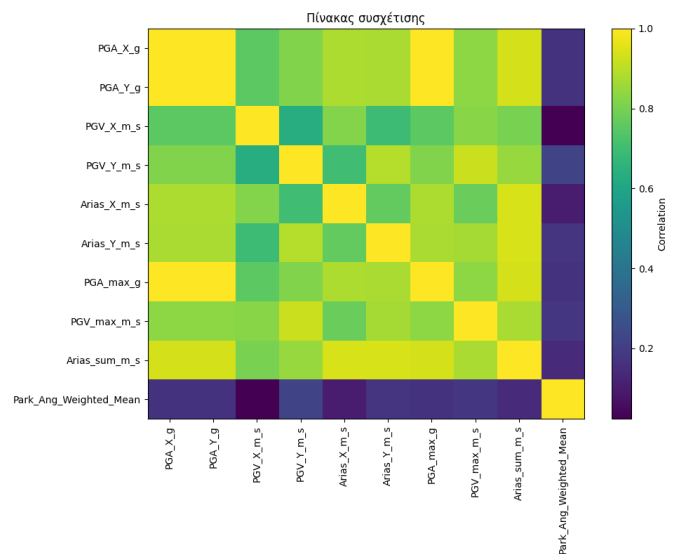
Η εισαγωγή των δεδομένων του φέροντος οργανισμού στο λογισμικό μη γραμμικής δυναμικής ανάλυσης Ruaumoko-3D γίνεται σε αρχείο κειμένου, όπου κάθε γραμμή περιλαμβάνει τα απαιτούμενα δεδομένα σε προδιαγεγραμμένη σειρά. Στο αρχείο δεδομένων, δίνονται

η γεωμετρία του φορέα, οι ιδιότητες των μελών, τα υστερητικά μοντέλα, οι μάζες, το μοντέλο απόσβεσης, οι φορτίσεις, οι σεισμικές καταγραφές και οι ρυθμίσεις αριθμητικής ανάλυσης. Για την προσομοίωση της θεμελίωσης επί ελαστικού εδάφους ορίζονται από το χρήστη οι σταθερές αξονικών και στροφικών ελατήριων.

Για τη δοκιμή της μη γραμμικής δυναμικής ανάλυσης χρονοϊστορίας, τόσο για τύπο εδάφους A όσο και για τύπο εδάφους B, χρησιμοποιήθηκαν επιταχυνσιογραφήματα που συνοδεύουν το Ruaumoko-3D. Από τα αποτελέσματα των αναλύσεων προέκυψε ότι οι δείκτες βλάβης Park & Ang σε επιλεγμένα δομικά στοιχεία είναι υψηλοί στους δύο πρώτους ορόφους και γενικά είναι υψηλότεροι για τον τύπο εδάφους B από τον τύπο εδάφους A.

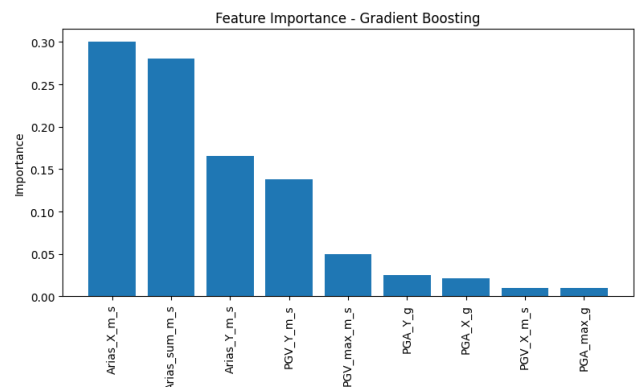
B. Εφαρμογή Μηχανικής Μάθησης

Η εφαρμογή της μηχανικής μάθησης συνίσταται στην εκτέλεση της ροής εργασιών μηχανικής μάθησης από την οποία λήφθηκαν ο πίνακας συσχέτισης και διάγραμμα σημαντικότητας χαρακτηριστικών.



Εικόνα 9. Πίνακας Συσχέτισης Χαρακτηριστικών

Προέκυψε ότι ο σταθμισμένος δείκτης βλάβης Park & Ang έχει θετική συσχέτιση με PGA, PGV και ένταση Arias, δηλαδή σε σεισμικές διεγέρσεις μεγαλύτερης έντασης προκύπτουν και μεγαλύτεροι δείκτες βλάβης.



Εικόνα 10. Διάγραμμα Σημαντικότητας Χαρακτηριστικών

Από την εξερευνητική ανάλυση δεδομένων (EDA) ως σημαντικότερο χαρακτηριστικό σε σχέση με το σταθμισμένο δείκτη Park & Ang προέκυψε η ένταση Arias που συνάδει με το γεγονός ότι η ένταση Arias,

λαμβάνει υπόψη τόσο το μέγεθος των εδαφικών επιταχύνσεων, όσο και τη διάρκεια της σεισμικής διέγερσης.

Δοκιμάστηκαν πέντε αλγόριθμοι μηχανικής μάθησης τρεις που προορίζονται κυρίως για γραμμικές σχέσεις μεταξύ των χαρακτηριστικών (Linear Regression, Ridge Regression, Lasso Regression) και δύο που προορίζονται για μη γραμμικές και πολύπλοκες σχέσεις μεταξύ των χαρακτηριστικών (Random Forest, Gradient Boosting).

Χρησιμοποιήθηκαν ως μέτρα απόδοσης των αλγορίθμων το Μέσο Απόλυτο Σφάλμα (MAE), η Τετραγωνική Ρίζα του Μέσου Τετραγωνικού Σφάλματος (RMSE) και ο Συντελεστής Προσδιορισμού (R^2).

Προέκυψε ότι οι γραμμικοί αλγόριθμοι αποτυγχάνουν (πολύ μεγάλες τιμές MAE, RMSE και αρνητικές τιμές R^2) στο να προβλέψουν, το σταθμισμένο δείκτη βλάβης Park & Ang. Οι μη γραμμικοί αλγόριθμοι συμπεριφέρθηκαν κάπως καλύτερα, όχι όμως αρκετά ικανοποιητικά.

Απαιτείται περαιτέρω διερεύνηση με αλγόριθμους που να μπορούν να ανταπεξέλθουν σε υψηλές μη γραμμικότητες και πολύπλοκες σχέσεις μεταξύ των χαρακτηριστικών, ενώ το μέγεθος του συνόλου των δεδομένων θα πρέπει να αυξηθεί κατά πολύ περισσότερο, τόσο σε αριθμό χαρακτηριστικών, όσο και σε πλήθος επιταχυνσιογραφημάτων και αντίστοιχων μη γραμμικών δυναμικών αναλύσεων.

Συνίσταται να χρησιμοποιηθούν πραγματικά επιταχυνσιογραφήματα ως πηγή δεδομένων για την εφαρμογή της μηχανικής μάθησης για ακόμη πιο ρεαλιστικά συμπεράσματα, όσον αφορά την έρευνα στο πεδίο της σεισμικής μηχανικής.

IV. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα συμπεράσματα της ΜΔΕ συνίστανται σε μία πρακτική εφαρμογή της υφιστάμενης γνώσης στο σχεδιασμό, αποτίμηση και στη δυναμική μη γραμμική ανάλυση κτιρίων.

Πέρα από μια μεθοδική, αναλυτική αλλά και κριτική εφαρμογή του θεωρητικού υπόβαθρου του τομέα της σεισμικής μηχανικής η ΜΔΕ συνεισφέρει στην ανάπτυξη ενός γραφικού περιβάλλοντος χρήστη για το λογισμικό Ruaumoko-3D, το οποίο προορίζεται μεν κυρίως για ερευνητικούς σκοπούς, αλλά προσφέρει δε πλήρη έλεγχο στη προσομοίωση της κατασκευής από το χρήστη, σε αντίθεση με τα εμπορικά λογισμικά, όπου ο χρήστης έχει περιορισμένες δυνατότητες επέμβασης στη προσομοίωση και ανάλυση της κατασκευής.

Η ανάπτυξη του γραφικού περιβάλλοντος χρήστη επιταχύνει την εισαγωγή των δεδομένων στο λογισμικό Ruaumoko-3D, μειώνει τον κίνδυνο λαθών από το χρήστη και βελτιώνει την επεξεργασία των αποτελεσμάτων, καθιστώντας το Ruaumoko-3D εύχρηστο, τόσο για ερευνητική, όσο και για επαγγελματική χρήση, προσφέροντας στο μηχανικό τη δυνατότητα συμβάλει με τις γνώσεις και την εμπειρία του σε μία επιστημονικά τεκμηριωμένη τεχνική μελέτη, που να αντιστοιχεί στις ακριβείς συνθήκες ενός κατασκευαστικού έργου με τη δυνατότητα ενός οικονομικότερου σχεδιασμού σε σχέση με τα εμπορικά λογισμικά.

Η αξιοποίηση του λογισμικού Ruaumoko-3D, από τους μελλοντικούς ερευνητές μπορεί επίσης να οδηγήσει σε ανάπτυξη μεθοδολογιών σχεδιασμού που να βασίζονται σε δείκτες βλάβης, τους οποίους μπορεί να υπολογίσει το λογισμικό.

Τέλος, με αρωγό το ραγδαίως αναπτυσσόμενο πεδίο της τεχνητής νοημοσύνης, το οποίο υπεισέρχεται συνεχώς σε κάθε άλλο επιστημονικό πεδίο, συμπεριλαμβανομένου και αυτού της σεισμικής μηχανικής και των αντισεισμικών κατασκευών, οι μηχανικοί θα μπορούν να εκπονούν τεχνικές μελέτες μεγαλύτερης επιστημονικής ακρίβειας, αποτελεσματικότερα, αποδοτικότερα, ταχύτερα και πιο οικονομικά.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- Amezquita-Sanchez, J. P., Valtierra-Rodriguez, M., & Adeli, H. (2020). Machine learning in structural engineering. *Scientia Iranica. Transaction A, Civil Engineering*, 27(6), 2645-2656.
- Antoniu, S. (2023). *Seismic retrofit of existing reinforced concrete buildings*. John Wiley & Sons.
- Bozorgnia, Y., & Bertero, V. V. (2004). *Earthquake engineering: from engineering seismology to performance-based engineering*. CRC press.
- Carr, A. J. (2007). RUAUMOKO Manual: User Manual for the 3 Dimensional Version Ruaumoko 3D. *University of Canterbury, Christchurch, NZ*.
- Cecconi, F. R., Khodabakhshian, A., & Rampini, L. (2025). *Building Tomorrow: Unleashing the Potential of Artificial Intelligence in Construction*. Springer Nature Switzerland.
- Deka, P. C. (2019). *A primer on machine learning applications in civil engineering*. CRC Press.
- Demertzis, K., Kostinakis, K., Morfidis, K., & Iliadis, L. (2023). An interpretable machine learning method for the prediction of R/C buildings' seismic response. *Journal of Building Engineering*, 63, 105493.
- Dhotre, P. S., Mahalle, P. N., Mane, D. T., & Jain, R. K. (2023). *Data Science for Civil Engineering: A Beginner's Guide*. CRC Press.
- Goulet, J. A. (2020). *Probabilistic machine learning for civil engineers*. MIT press.
- Kampelopoulos, D., Tsanousa, A., Vrochidis, S., & Kompatsiaris, I. (2025). A review of LLMs and their applications in the architecture, engineering and construction industry. *Artificial Intelligence Review*, 58(8), 250.
- Lagaros, N. D., & Plevris, V. (2022). Artificial intelligence (AI) applied in civil engineering. *Applied Sciences*, 12(15), 7595.
- Moore, A. (2021). *Python GUI Programming with Tkinter* (Vol. 15). Packt Publishing.
- Sun, H., Burton, H. V., & Huang, H. (2021). Machine learning applications for building structural design and performance assessment: State-of-the-art review. *Journal of Building Engineering*, 33, 101816.
- Thai, H. T. (2022, April). Machine learning for structural engineering: A state-of-the-art review. *In Structures* (Vol. 38, pp. 448-491). Elsevier.
- Xiao, P. (2022). *Artificial intelligence programming with python: from zero to hero*. John Wiley & Sons.
- Xie, Y., Ebad Sichani, M., Padgett, J. E., & DesRoches, R. (2020). The promise of implementing machine learning in earthquake engineering: A state-of-the-art review. *Earthquake spectra*, 36(4), 1769-1801.
- Zhang, L., Pan, Y., Wu, X., & Skibniewski, M. J. (2021). *Artificial intelligence in construction engineering and management* (Vol. 163). Singapore: Springer.