



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΗΣ



Παραμετρική Προσομοίωση και  
Βέλτιστος Σχεδιασμός κατασκευών  
βασισμένος σε Μοντέλα Δομικής  
Πληροφορίας

Διπλωματική εργασία

Έλενα Χαριτωνίδου - Πολιτικός μηχανικός

Επιβλέπων: Σάββας Τριανταφύλλου, Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούλιος 2024



## Ευχαριστίες

Θα ήθελα, αρχικά, να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου, κ. Σάββα Τριανταφύλλου, για την πολύτιμη βοήθεια και το χρόνο που αφιέρωσε για να με καθοδηγεί και να με συμβουλεύει καθόλη τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας εργασίας. Χωρίς αυτόν η ολοκλήρωσή της δε θα ήταν εφικτή.

Επίσης, θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου προς την οικογένειά μου και το Θεό που μου έδωσαν τη δυνατότητα να φτάσω σε αυτό το σημείο. Τέλος, ευχαριστώ τους φίλους μου που ήταν δίπλα μου όλα τα χρόνια των σπουδών μου.

## Περίληψη

Η επιστήμη του Πολιτικού Μηχανικού έχει συνοδεύσει επί αιώνες την ανθρώπινη ιστορία και έχει συνδεθεί με την πρόοδο των πολιτισμών και τη βελτίωση της ποιότητας ζωής των ανθρώπων. Τα έργα του Πολιτικού Μηχανικού έχουν καταστήσει εφικτές τις σημερινές συνθήκες διαβίωσης, καθώς διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στη μεταφορά ανθρώπων και αγαθών, την ανάπτυξη των πόλεων, και την απόκτηση φυσικών πόρων. Η εξέλιξη της επιστήμης και της τεχνολογίας σε συνδυασμό με την έμφυτη τάση του ανθρώπου για μεγαλεπήβολες επιδιώξεις επιφέρουν διαρκώς πολυπλοκότητα στη μελέτη και την υλοποίηση των έργων. Πλέον, τα έργα δεν αρκεί να εκπληρώνουν το σκοπό για τον οποίο κατασκευάζονται, αλλά απαιτείται να υλοποιούνται με σεβασμό προς το περιβάλλον και τους χρήστες τους. Οι έννοιες της Βιωσιμότητας (Sustainability) και της Μηχανικής της Αξίας (Value Engineering) απαιτείται να συνοδεύουν το σχεδιασμό και την υλοποίηση των σύγχρονων έργων. Επιπροσθέτως, πέραν της δημιουργίας νέων κατασκευών το αντικείμενο του Πολιτικού Μηχανικού έχει επεκταθεί στη συντήρηση και την τροποποίηση των υφιστάμενων.

Οι απαιτήσεις της μελέτης και της κατασκευής των έργων σήμερα καθιστούν αναγκαία τη συνεργασία μεταξύ πολλών ατόμων διαφορετικών κλάδων. Η απαίτηση συνεργασίας μεταξύ των συμβαλλόμενων μερών ενός έργου αυξάνει την πολυπλοκότητα και τη δυσκολία της υλοποίησης των έργων και συχνά οδηγεί στην αστοχία και την υπέρβαση των διατιθέμενων πόρων τους. Έτσι, ο σχεδιασμός των έργων αποτελεί ένα σύνθετο πρόβλημα του οποίου η επίλυση επιδιώκει την επίτευξη πολλών διαφορετικών και συχνά αντικρουόμενων στόχων, αλλά και τη συνεργασία μεταξύ όσων συμβάλλουν στην εκπλήρωση αυτών.

Η εξέλιξη της τεχνολογίας και της επιστήμης των υπολογιστών έχει προσφέρει στο επάγγελμα του Πολιτικού Μηχανικού νέες δυνατότητες και εργαλεία με τα οποία είναι δυνατό να ανταπεξέλθει με επιτυχία στις απαιτήσεις των σύγχρονων έργων. Η προσέγγιση του σχεδιασμού των έργων έχει γίνει πιο ολιστική και αφορά όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής τους.

Στόχο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί η παραμετρική προσομοίωση και σχεδίαση κανονικών μεταλλικών κτηρίων με βάση τις επιτελεστικότητες και ταυτόχρονα η διερεύνηση της βέλτιστης σχεδίασής τους. Συγκεκριμένα, η εργασία αποσκοπεί στην

---

παραμετρική σχεδίαση του μοντέλου δομικών πληροφοριών απλών χαλύβδινων φορέων και την αυτοματοποιημένη εκτέλεση της στατικής ανελαστικής ανάλυσής τους σε πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων με στόχο την εύρεση της στάθμης επιτελεστικότητας των μελών του. Παράλληλα, έχουν αναπτυχθεί διαδικασίες βελτιστοποίησης ορισμένων παραμέτρων σχεδιασμού, ώστε να διερευνηθεί η βέλτιστη γεωμετρία του φορέα για την επίτευξη της επιθυμητής συμπεριφοράς της κατασκευής υπό την επίδραση του σεισμού σχεδιασμού της. Η εργασία επιδιώκει τη συνεργασία μεταξύ ευρέως διαδεδομένων και χρησιμοποιούμενων τεχνολογιών σχεδιασμού που συχνά αποτυγχάνουν να συνυπάρξουν σε ένα κοινό λογισμικό πρόγραμμα ανάλυσης.

Λέξεις-κλειδιά : Παραμετρικός Σχεδιασμός, Παραμετρική Προσομοίωση, Μοντέλο Δομικών Πληροφοριών, Βελτιστοποίηση, Στατική Ανελαστική Ανάλυση, Σχεδιασμός με βάση τις επιτελεστικότητες

# Abstract

Civil engineering has accompanied human history for centuries and has been linked to the progress of civilizations and the improvement of quality of life. Civil engineering projects have made today's living conditions possible by playing a crucial role in the transportation of people and goods, the development of cities, and the acquisition of natural resources. Science and technology, in conjunction with humans' innate ambition, constantly add complexity to the study and implementation of projects. Nowadays, projects should not only serve their intended purpose but also respect their environment and users. Sustainability and value engineering should be considered in the design and construction of modern projects. Furthermore, beyond creating new structures, civil engineering now involves the maintenance and modification of existing ones.

Modern project requirements demand collaboration among individuals from various disciplines. This collaboration increases the complexity and difficulty of project implementation, often leading to failures and cost overruns. Thus, project planning becomes a complex problem that aims to achieve numerous and sometimes conflicting objectives, while also fostering cooperation among contributors.

The evolution of technology and computer science has provided civil engineering with new possibilities and tools, enabling successful coping with the demands of modern projects. The approach to project planning has become more holistic, considering the entire duration of their life cycle.

This thesis focuses on parametric modeling and limit state design of steel structures, along with detailed research into their design optimization. In detail, the aim of this thesis is the parametric design of the building information model of simple steel structures and automatically perform the pushover analysis of the structure using finite element analysis to define the limit state of each member. Additionally, optimization methods have been developed to define the optimal solution for the structure's geometry. The thesis attempts to achieve collaboration between common design technologies, which often struggle to coexist within the same analysis software.

---

Keywords : Parametric Design, Parametric Modeling, Building Information Model, Structural Optimization, Pushover Analysis, Limit State Design

# Περιεχόμενα

<b>1</b>	<b>Εισαγωγή</b>	<b>1</b>
1.1	Εισαγωγή . . . . .	1
1.2	Περιγραφή του προβλήματος . . . . .	2
1.3	Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας . . . . .	3
1.4	Ερευνητικοί στόχοι . . . . .	4
1.5	Μεθοδολογία . . . . .	4
1.6	Διάρθρωση . . . . .	7
<b>2</b>	<b>Παραμετρική προσομοίωση κατασκευών</b>	<b>9</b>
2.1	Εισαγωγή στον παραμετρικό σχεδιασμό . . . . .	9
2.2	Παραμετρικός σχεδιασμός και βελτιστοποίηση . . . . .	11
2.3	Παραμετρικός σχεδιασμός και Μοντέλα Δομικών Πληροφοριών . . . . .	12
<b>3</b>	<b>Μέθοδοι μη γραμμικής ανάλυσης κατασκευών</b>	<b>15</b>
3.1	Εισαγωγή στη μη γραμμική ανάλυση . . . . .	15
3.2	Περιγραφή της μεθόδου των μη γραμμικών αναλύσεων . . . . .	16
3.2.1	Μη γραμμική ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία . . . . .	17
3.2.2	Η μέθοδος Newton-Raphson . . . . .	19
3.2.3	Η μέθοδος Newton-Raphson στη μη γραμμική ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία . . . . .	20
3.3	Μη γραμμικά στοιχεία δοκού . . . . .	24
3.3.1	Στοιχεία δοκού με συγκεντρωμένη πλαστικότητα . . . . .	25
3.3.2	Στοιχεία δοκού με κατανεμημένη πλαστικότητα (πολυστρωματική θέρωση) . . . . .	26
<b>4</b>	<b>Αντισεισμικός σχεδιασμός και ανασχεδιασμός κατασκευών</b>	<b>29</b>
4.1	Η φιλοσοφία του αντισεισμικού σχεδιασμού . . . . .	29
4.2	Σχεδιασμός με βάση τις επιτελεστικότητες . . . . .	30
4.3	Στατική ανελαστική ανάλυση (Pushover) . . . . .	33
<b>5</b>	<b>Εξελικτικοί Αλγόριθμοι</b>	<b>37</b>



5.1	Γενετικοί Αλγόριθμοι . . . . .	37
5.2	Εισαγωγή στους Εξελικτικούς Αλγορίθμους . . . . .	40
5.3	Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-II (NSGA-II) . . . . .	42
<b>6</b>	<b>Περιγραφή της εργασίας</b>	<b>47</b>
6.1	Διάγραμμα ροής της εργασίας . . . . .	47
6.2	Περιγραφή της ροής της εργασίας . . . . .	47
6.3	Περιγραφή της διαδικασίας βελτιστοποίησης της εργασίας . . . . .	51
6.3.1	Βελτιστοποίηση των αποστάσεων των υποστυλωμάτων σε κάθε διεύθυνση . . . . .	51
6.3.2	Βελτιστοποίηση του αριθμού των υποστυλωμάτων σε κάθε διεύθυνση	52
<b>7</b>	<b>Παραδείγματα εφαρμογών της εργασίας</b>	<b>55</b>
7.1	1η Εφαρμογή . . . . .	55
7.1.1	Σύγκριση αποτελεσμάτων αρχικής λύσης και βελτιστοποιημένων λύσεων . . . . .	62
7.2	2η Εφαρμογή . . . . .	67
7.2.1	Σύγκριση αποτελεσμάτων αρχικής λύσης και βελτιστοποιημένων λύσεων . . . . .	71
<b>8</b>	<b>Συμπεράσματα και Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα</b>	<b>77</b>

# Κατάλογος Σχημάτων

1	Η εξέλιξη των κατασκευών του Πολιτικού Μηχανικού [Wikipedia (n.d.)]	2
2	Διάγραμμα ροής της εργασίας	5
3	Περιβάλλον γραφικού προγραμματισμού	6
4	Σύγκριση διαδικασίας συμβατικού και παραμετρικού σχεδιασμού	11
5	Διαγραμμα ροής της συνεργασίας παραμετρικού σχεδιασμού και BIM	13
6	Γεωμετρικός ορισμός της δυσκαμψίας σε γραμμικά προβλήματα (αριστερά) και γεωμετρικός ορισμός της ενεργούς και της εφαπτομενικής δυσκαμψίας σε μη γραμμικά προβλήματα (δεξιά)	17
7	Newton Raphson	20
8	Διαγραμματικά τα βήματα της μεθόδου Newton Raphson σε προβλήματα μη γραμμικής ανάλυσης	22
9	Τρόποι κατανομής της πλαστικότητας στα στοιχεία δοκού	25
10	Στοιχείο δοκού με συγκεντρωμένη πλαστικότητα	26
11	Στοιχείο δοκού με κατανεμημένη πλαστικότητα	27
12	Η επιθυμητή συμπεριφορά των κατασκευών υπό την επίδραση σεισμών διαφορετικής έντασης	31
13	Επιτρεπτά επίπεδα βλάβης ανάλογα με τη σπουδεότητα της κατασκευής και την περίοδο επαναφοράς του σεισμού	32
14	Στοχευόμενη μετακίνηση	34
15	Οριζόντια σεισμικά φορτία για άγνωστες τιμές των ιδιομορφών των ορόφων	35
16	Καμπύλη ικανότητας της κατασκευής και βαθμός βλάβης στον οποίο αντιστοιχούν οι διάφορες θέσεις της	35
17	Διαγραμματική ροή στατικής ανελαστικής ανάλυσης	36
18	Οι λειτουργίες των γενετικών αλγορίθμων	39
19	Γραφική απεικόνιση των λύσεων Pareto	42
20	Διάγραμμα ροής του αλγόριθμου NSGA-II	43
21	Βασική διαδικασία διαλογής πληθυσμού	43
22	Διαλογή Crowing Distance	44
23	Δημιουργία του πληθυσμού $Q_t$	44

24	Επιλογή γονέων για τη δημιουργία απογόνων . . . . .	45
25	Διάγραμμα ροής της βασικής διαδικασίας της παρούσας εργασίας . . . . .	48
26	Το παράθυρο διεπαφής χρήστη του Dynamo Player . . . . .	56
27	Το παράθυρο διεπαφής χρήστη για την εισαγωγή των δεδομένων των διατομών του χάλυβα από το αρχείο Excel . . . . .	57
28	Η δομή του αρχείου Excel από το οποίο εισάγονται οι διατομές του χάλυβα στο Revit . . . . .	57
29	Η εισαγωγή και αναπαράσταση των στάθμεων των ορόφων της κατασκευής.	58
30	Εισαγωγή και αναπράσταση του τρισδιάστατου μοντέλου της κατασκευής της 1ης εφαρμογής . . . . .	58
31	Το φάσμα του Ευρωκώδικα 8 για κάθε επιτάχυνση εδάφους . . . . .	59
32	Η καμπύλη ικανότητας της κατασκευής . . . . .	59
33	Το διάγραμμα ροπής καμπυλότητας για τη διατομή HEA360 που έχει επιλεγεί για τα υποστυλώματα της κατασκευής . . . . .	60
34	Τα αποτελέσματα των στάθμεων επιτελεστικότητας των υποστυλωμάτων της κατασκευής για κάθε επιτάχυνση εδάφους . . . . .	61
35	Σύγκριση των αποτελεσμάτων κάθε λύσης συγκεντρωτικά . . . . .	62
36	Σύγκριση των καμπυλών ικανότητας της κατασκευής για την αρχική λύση της κατασκευής της εφαρμογής 1 και των βελτιστοποιημένων. . . . .	63
37	Σύγκριση των αποτελεσμάτων κάθε λύσης της ανάλυσης για τα υποστυλώματα της κατασκευής της εφαρμογής 1 . . . . .	64
38	Σύγκριση των αποτελεσμάτων κάθε λύσης της ανάλυσης για τις δοκούς της κατασκευής της εφαρμογής 1 παράλληλα με τη διαύθυνση του σεισμού . . .	65
39	Σύγκριση των ποσοστών των υποστυλωμάτων και των δοκών που βρίσκονται στις στάθμες ‘Άμεση Χρήση’ και ‘Προστασία Ζωής’ υπό τη δράση σεισμού με πιθανότητα υπέρβασης 10% στα 475 χρόνια για κάθε λύση του κτηρίου της εφαρμογής 1. Τα διαγράμματα 39i, 39ii, 39iii αναφέρονται στα υποστυλώματα, ενώ τα διαγράμματα 39iv, 39v, 39vi αναφέρονται στις δοκούς. . . .	66
40	Τρισδιάστατη αναπαράσταση του μοντέλου της 2ης εφαρμογής . . . . .	67
41	Πλάγια όψη του μοντέλου της 2ης εφαρμογής . . . . .	68
42	Καμπύλη ικανότητας της κατασκευής . . . . .	68
43	Καμπύλη ικανότητας της κατασκευής . . . . .	69
44	Καμπύλη ικανότητας της κατασκευής . . . . .	70
45	Σύγκριση των αποτελεσμάτων κάθε λύσης συγκεντρωτικά . . . . .	71
46	Σύγκριση των καμπυλών ικανότητας της κατασκευής για την αρχική λύση της κατασκευής της εφαρμογής 1 και των βελτιστοποιημένων. . . . .	72

---

47	Σύγκριση των αποτελεσμάτων κάθε λύσης της ανάλυσης για τα υποστυλώματα της κατασκευής της εφαρμογής 2 . . . . .	73
48	Σύγκριση των αποτελεσμάτων κάθε λύσης της ανάλυσης για τις δοκούς της κατασκευής της εφαρμογής 2 παράλληλα με τη διαύθυνση του σεισμού . . .	74
49	Σύγκριση των ποσοστών των υποστυλωμάτων και των δοκών που βρίσκονται στις στάθμες ‘Άμεση Χρήση’ και ‘Προστασία Ζωής’ υπό τη δράση σεισμού με πιθανότητα υπέρβασης 50% στα 70 χρόνια για κάθε λύση του κτηρίου της εφαρμογής 2. Τα διαγράμματα 49i, 49ii, 49iii αναφέρονται στα υποστυλώματα, ενώ τα διαγράμματα 49iv, 49v, 49vi αναφέρονται στις δοκούς. . . . .	75
50	Σύγκριση των ποσοστών των υποστυλωμάτων και των δοκών που βρίσκονται στις στάθμες ‘Άμεση Χρήση’ και ‘Προστασία Ζωής’ υπό τη δράση σεισμού με πιθανότητα υπέρβασης 10% στα 475 χρόνια για κάθε λύση του κτηρίου της εφαρμογής 1. Τα διαγράμματα 39i, 39ii, 39iii αναφέρονται στα υποστυλώματα, ενώ τα διαγράμματα 39iv, 39v, 39vi αναφέρονται στις δοκούς. . . .	76

# Κατάλογος Πινάκων

- 4.1 Ενδεικτική συσχέτιση περιόδου επαναφοράς και πιθανότητας υπέρβασης της σεισμικής δράσης με την αντίστοιχη ανηγμένη οριζόντια εδαφική επιτάχυνση. 30
- 4.2 Στόχοι αποτίμησης ή Ανασχεδιασμού (στάθμες επιτελεστικότητας) ΚΑΝ.ΕΠΕ. 32
- 6.1 Όριο γωνίας στροφής χορδής της διατομής για κάθε στάθμη επιτελεστικότητας 51

# Κεφάλαιο 1

## Εισαγωγή

### 1.1 Εισαγωγή

Η επιστήμη του Πολιτικού Μηχανικού έχει τις ρίζες της στη αρχαιότητα και αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι της ανθρώπινης ιστορίας. Πρωτοεμφανίζεται στην αρχαία Εγγύς Ανατολή, όπου οι Σουμέριοι, οι Βαβυλώνιοι και οι Αιγύπτιοι δημιούργησαν γιγάντιες κατασκευές, όπως είναι οι Πυραμίδες της Αιγύπτου (2700 π.Χ.) και οι Κρεμαστοί Κήποι της Βαβυλώνας (600 π.Χ.), χρησιμοποιώντας απλές τεχνικές και εργαλεία για την υλοποίησή τους. Τα επιτεύγματά τους έθεσαν τα θεμέλια για την εξέλιξη του Πολιτικού Μηχανικού. Κατά το Μεσαίωνα η ανάπτυξη Γοτθικών καθεδρικών ναών, κάστρων και γεφυρών έκανε τη μελέτη και την υλοποίηση των έργων πιο σύνθετη. Κατά τον 18ο αιώνα η βιομηχανική επανάσταση και η εφεύρεση της ατμομηχανής προσέφεραν νέες δυνατότητες και πολυπλοκότητα στα έργα. Ανακαλύφθηκαν νέα δομικά υλικά και έγινε για πρώτη φορά χρήση του χάλυβα σε δομικές κατασκευές. Ο χάλυβας επέτρεψε την κατασκευή μεγαλύτερων και ανθεκτικότερων έργων. Επιτεύχθηκε η κατασκευή του πρώτου σύγχρονου σιδηρόδρομου και δομήθηκαν οι πρώτες σύγχρονες πόλεις [Baskar (2015)]. Στην πορεία, η εξέλιξη της τεχνολογίας και η εφεύρεση του ηλεκτρονικού υπολογιστή προσέφεραν ακόμα περισσότερες προοπτικές στην ανάπτυξη του κλάδου.

Κατά την πάροδο των χρόνων οι απαιτήσεις των έργων άλλαξαν. Η εξέλιξη της τεχνολογίας, η ανακάλυψη νέων δομικών υλικών και η ανθρώπινη φιλοδοξία οδήγησαν σε πολύ πιο σύνθετες και απαιτητικές κατασκευές. Αυτή η πολυπλοκότητα αποτυπώνεται άμεσα στη μελέτη και στο σχεδιασμό των έργων. Πλέον, τα έργα αποτελούνται από περισσότερα και πιο σύνθετα υλικά. Οι μελέτες των έργων είναι πιο ακριβείς και λαμβάνουν περισσότερο υπόψη τα φυσικά φαινόμενα και τις ιδιότητες των υλικών. Σήμερα, η πρόκληση του Πολιτικού Μηχανικού είναι η δημιουργία νέων εντυπωσιακών και αξιόπιστων έργων με μεγάλη ταχύτητα και μικρό κόστος κατασκευής, αλλά και η συντήρηση και ο ανασχεδιασμός των υφισταμένων.



(i) Πυραμίδες



(ii) Γέφυρα Alcántara



(iii) Κάστρο Bodiam



(iv) Πύργος του Eiffel



(v) Γέφυρα Nansha



(vi) One World Trade Center

Σχήμα 1: Η εξέλιξη των κατασκευών του Πολιτικού Μηχανικού [Wikipedia (n.d.)]

## 1.2 Περιγραφή του προβλήματος

Η πολυπλοκότητα των έργων στο επίπεδο της μελέτης και του σχεδιασμού τους δεν πηγάζει μόνο από τα χαρακτηριστικά των ίδιων των έργων και του περιβάλλοντος τους, αλλά και από την απαίτηση συνεργασίας των συντελεστών τους. Από τη σύλληψη των έργων μέχρι την υλοποίηση, τη λειτουργία και τη συντήρησή τους απαιτείται η συνεργασία πολλών ανθρώπων. Ως αποτέλεσμα, η υπέρβαση του προϋπολογισμένου χρόνου και κόστους των έργων πολύ συχνά πηγάζει από τη δυσκολία επικοινωνίας μεταξύ των εμπλεκόμενων μερών και την ανάγκη εφαρμογής αλλαγών στο σχεδιασμό τους.

Επιπροσθέτως, η εξέλιξη της επιστήμης του Πολιτικού Μηχανικού και η απόκτηση γνώσης σχετικά με τη συμπεριφορά των υλικών και των κατασκευών έχει οδηγήσει στην σύνταξη Τεχνικών Κανονισμών, οι οποίοι πρέπει να πληρούνται σε κάθε έργο. Οι Τεχνικοί Κανονισμοί αποτελούνται από ένα σύνολο αρχών και απαιτήσεων στο σχεδιασμό των έργων, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται η απαραίτητη ασφάλεια, λειτουργικότητα και ανθεκτικότητα στις κατασκευές. Προϋπόθεση της ικανοποίησης των σύγχρονων κανονισμών αποτελεί η ακριβής και αναλυτική μελέτη των έργων σε κάθε στάδιο της διάρκειας ζωής τους.

Για την ελαχιστοποίηση των λαθών στο επίπεδο της μελέτης ολόκληρου του κύκλου ζωής των έργων του Πολιτικού Μηχανικού έχουν αναπτυχθεί πολλά εργαλεία σχεδιασμού. Η ανάπτυξη της τεχνολογίας και η χρήση του ηλεκτρονικού υπολογιστή παρέχει διαρκώς νέες

δυνατότητες στη μοντελοποίηση και την ανάλυση των έργων. Η προσέγγιση της διαδικασίας δημιουργίας και διαχείρισης του τεράστιου όγκου πληροφοριών των έργων έχει γίνει πιο ολιστική. Σήμερα, με τη δημιουργία Μοντέλων Δομικών Πληροφοριών (Building Information Models) καθίσταται δυνατή η εύκολη και άμεση συνεργασία των μελετητών και των διαχειριστών διευκολύνοντας την γρήγορη ανταλλαγή των πληροφοριών του έργου.

Συγχρόνως, η εξέλιξη της επιστήμης των υπολογιστών έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη εξελιγμένων λογισμικών και μεθόδων ανάλυσης των κατασκευών. Με τη χρήση του ηλεκτρονικού υπολογιστή είναι δυνατή η ακριβής προσομοίωση των έργων σε ψηφιακή μορφή. Τα Ψηφιακά Δίδυμα (Digital Twins) μπορούν να προσομοιώσουν και να αναλύσουν τη συμπεριφορά των φυσικών κατασκευών και έτσι να προβλέψουν τον τρόπο με τον οποίο αυτές θα συμπεριφερθούν ανάλογα με τις συνθήκες που θα τους επιβληθούν. Παράλληλα, η επεξεργασία και η επίλυση των προβλημάτων του Πολιτικού Μηχανικού με τη χρήση σύγχρονων λογισμικών προγραμμάτων συνεπάγεται τη μείωση του χρόνου και του κόστους των έργων. Η δυνατότητα του υπολογιστή να επεξεργάζεται πλήθος δεδομένων με μεγάλη ταχύτητα και ακρίβεια δίνει καλύτερες λύσεις σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα. Η ακρίβεια των αποτελεσμάτων οδηγεί στην εξοικονόμηση των απαιτούμενων υλικών και άρα τη μείωση της δαπάνης των έργων.

Ακόμα, η εισαγωγή του προγραμματισμού στο σχεδιασμό δίνει τη δυνατότητα της παραμετρικής σχεδίασης και της βελτιστοποίησης του σχεδιασμού των κατασκευών. Ο παραμετρικός σχεδιασμός στοχεύει στην αλγοριθμική συσχέτιση των μη κρίσιμων παραμέτρων του έργου με τις κρίσιμες. Δηλαδή, επιτρέπει την αυτόματη ενημέρωση του μοντέλου της κατασκευής όταν επηρεάζεται κάποια από τις παραμέτρους που έχει χαρακτηριστεί ως κρίσιμη. Παρόλο που η διαδικασία προσδιορισμού των κρίσιμων παραμέτρων και της δημιουργία του παραμετρικού μοντέλου συχνά μπορεί να μην είναι τόσο απλή, τα παραμετρικά μοντέλα προσφέρουν τη δυνατότητα της εύκολης και άμεσης πραγματοποίησης αλλαγών στο σχεδιασμό των έργων. Ακόμα, μέσα από την παρακολούθηση της επιρροής των παραμέτρων στη αποδοτικότητα του έργου μπορεί να εκτελείται με ευκολία ή και αυτοματοποιημένα η βελτίωση της σχεδίασης του.

### 1.3 Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία ασχολείται με την παραμετρικοποίηση, τον σχεδιασμό και τον ανασχεδιασμό πολυώροφων κτιρίων από χάλυβα και εξετάζει τη βέλτιστη σχεδίαση τους. Τα κτίρια που μελετώνται παρουσιάζουν κανονικότητα καθ' ύψος και εξετάζονται σύμφωνα με τις διατάξεις του Κανονισμού Επεμβάσεων (KAN.ΕΠΕ).



Πιο συγκεκριμένα, εκτελείται αυτοματοποιημένα ο σχεδιασμός του μοντέλου δομικών πληροφοριών των παραμετρικών κατασκευών και η ανελαστική στατική ανάλυση (pushover) τους με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Η διερεύνηση των βέλτιστων λύσεων υλοποιείται μέσα από ένα εργαλείο βελτιστοποίησης πολλαπλών κριτηρίων που χρησιμοποιεί γενετικούς αλγορίθμους.

Αποτέλεσμα της εργασίας είναι η συνεργασία του Μοντέλου Δομικών Πληροφοριών (BIM) και της Ανάλυσης Πεπερασμένων Στοιχείων (FEA) στην αναζήτηση βέλτιστων λύσεων, δύο ευρέως διαδεδομένων και χρησιμοποιούμενων τεχνολογιών σχεδιασμού, που συχνά αποτυγχάνουν να συνυπάρξουν σε ένα κοινό λογισμικό πρόγραμμα ανάλυσης.

## 1.4 Ερευνητικοί στόχοι

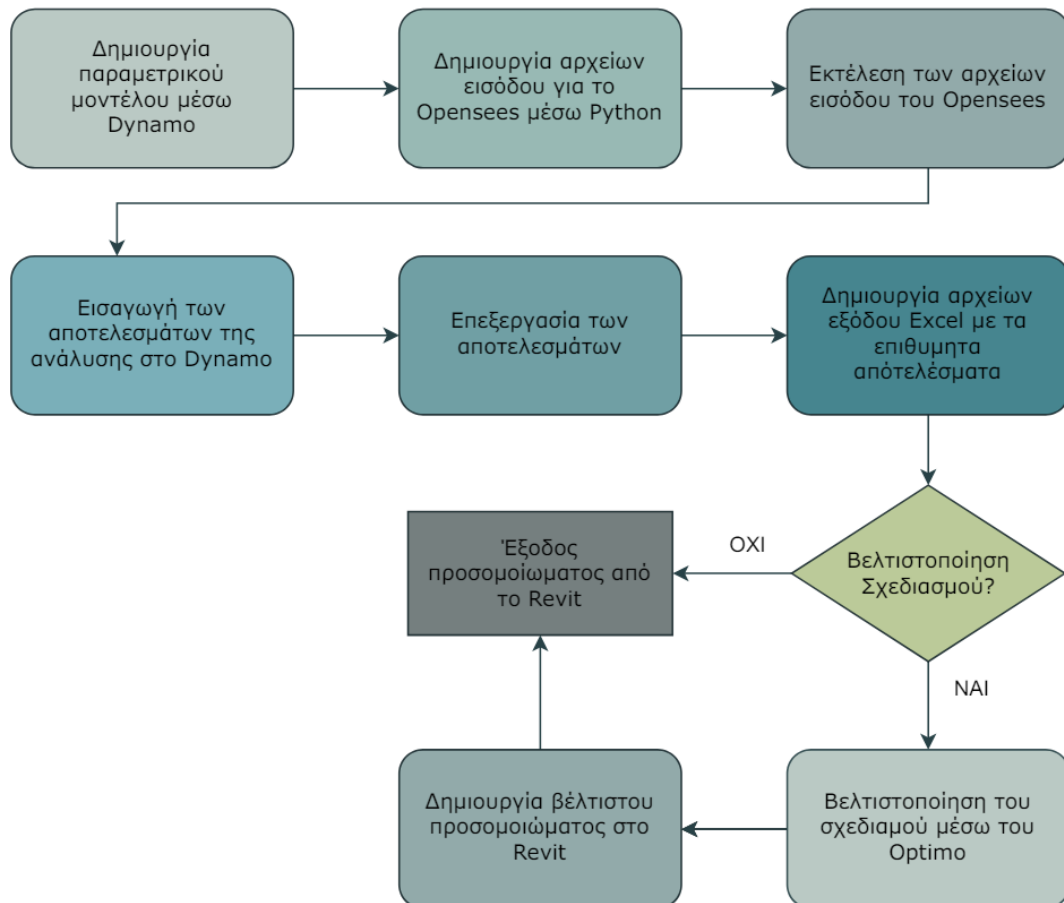
Για την ορθή μελέτη των παραμετρικών μεταλλικών κατασκευών τέθηκαν οι ακόλουθοί ερευνητικοί στόχοι.

1. Βιβλιογραφική διερεύνηση της τεχνολογίας παραμετρικών αναλύσεων μέσω Μοντέλων Δομικών Πληροφοριών (BIM), της μη γραμμικής ανάλυσης των κατασκευών και της βελτιστοποίησης μέσα από τη χρήση εξελικτικών αλγορίθμων.
2. Σύνταξη κώδικα σε περιβάλλον γραφικού προγραμματισμού για την δημιουργία παραμετρικών μεταλλικών κτιρίων.
3. Σύνταξη κώδικα για τη μελέτη της συμπεριφοράς των κτιρίων με βάσει τις αρχές της στατικής ανελαστικής ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία.
4. Εξαγωγή αποτελεσμάτων και εκτίμηση της στάθμης επιτελεστικότητας των στοιχείων της κατασκευής σύμφωνα με τους επιλεχθέντες κανονισμούς.
5. Σύνταξη κώδικα για την εκτέλεση της διαδικασίας βελτιστοποίησης ορισμένων παραμέτρων του σχεδιασμού.

## 1.5 Μεθοδολογία

Για την εκπόνηση της παρούσας εργασίας πρώτα απ' όλα καθορίστηκε με ακρίβεια το αντικείμενο και οι στόχοι της και εκτελέστηκε η βιβλιογραφική διερεύνηση στο κομμάτι της παραμετροποίησης των κατασκευών και της ανελαστικής στατικής ανάλυσής τους. Στη συνέχεια, έπειτα από την εξοικείωση με τα χρησιμοποιούμενα προγράμματα, συντάχθηκε σε περιβάλλον γραφικού προγραμματισμού Dynamo κώδικας για την σχεδίαση παραμετρικών κτιρίων από χάλυβα και τη δημιουργία του μοντέλου δομικών πληροφοριών (BIM) τους

στο περιβάλλον του Revit. Κατόπιν, αυτοματοποιήθηκε με τη γλώσσα προγραμματισμού Python η διαδικασία δημιουργίας και εισαγωγής κατάλληλων αρχείων εισόδου (input files) σε γλώσσα προγραμματισμού TCL για την εκτέλεση στατικής ανελαστικής ανάλυσης (pushover) των παραμετρικών κατασκευών στο OpenSees. Τέλος, μετά από την εκτέλεση της ανάλυσης της κατασκευής μέσω του OpenSees γίνεται η εισαγωγή και η επεξεργασία των αποτελεσμάτων της ανάλυσης στο Dynamo και εξάγονται αποτελέσματα σχετικά με την κατάσταση των μελών της υπό μελέτη κατασκευής σε αρχείο Excel. Ανάλογα με την κατάσταση των μελών της κατασκευής κρίνεται απαραίτητη η ενίσχυση ή η αντικατάσταση ορισμένων εξ αυτών και μπορεί να εκτελεσθεί εκ νέου η ανάλυση της. Παράλληλα, αναπτύχθηκε στο περιβάλλον του Dynamo με τη βοήθεια του Optimo, που αποτελεί ένα εργαλείο βελτιστοποίησης πολλαπλών κριτηρίων, κώδικας για την βελτιστοποίηση ορισμένων παραμέτρων του σχεδιασμού. Στο σχήμα 2 φαίνεται διαγραμματικά η πορεία ροής της εργασίας.



Σχήμα 2: Διάγραμμα ροής της εργασίας

Παρακάτω περιγράφονται τα μέσα και οι μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν για την εκπλήρωση των στόχων της εργασίας.

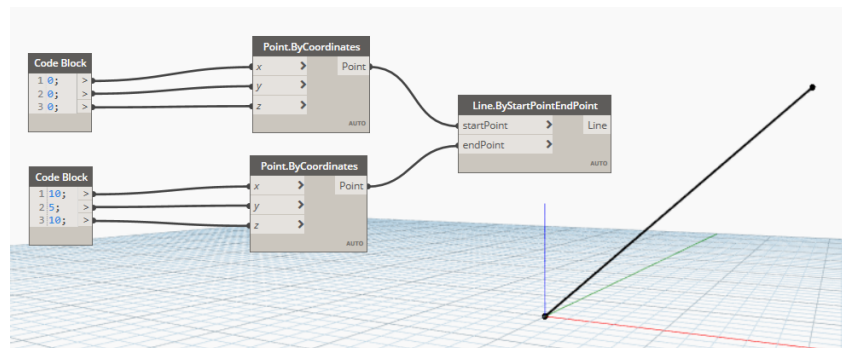
- Revit

Το Revit είναι ένα λογισμικό σχεδίασης 4D Μοντέλων Δομικών Πληροφοριών (BIM)

που επιτρέπει την σχεδίαση και την παρακολούθηση των έργων καθ' όλη τη διάρκεια της διαδικασίας υλοποίησης και της λειτουργία τους. Ταυτόχρονα, παρέχει τη δυνατότητα άμεσης συνεργασίας μεταξύ των συντελεστών του έργου αυξάνοντας έτσι την αποδοτικότητα του. Επίσης, μέσω των εργαλείων του δίνει τη δυνατότητα της εύκολης δημιουργίας ρεαλιστικών μοντέλων με μεγάλη ακρίβεια και της παραμετρικής σχεδίασης των έργων.

- **Dynamo**

Το Dynamo είναι ένα εργαλείο γραφικού προγραμματισμού (visual programming). Ο γραφικός προγραμματισμός επιτρέπει τη δημιουργία προγραμμάτων μέσω του γραφικού χειρισμού των στοιχείων του προγράμματος αντί της σύνταξης κοινού κώδικα (textural programming) (βλ. σχήμα 3). Το Dynamo παρέχεται ως ενσωματωμένο εργαλείο του Revit και διευρύνει τις δυνατότητες σχεδίασής του. Αρχικά, ορίζοντας τη γεωμετρία του έργου μέσω του Dynamo παρέχεται η δυνατότητα της παραμετρικής σχεδίασης του έργου. Ακόμα, το Dynamo μπορεί να επεξεργαστεί και να μετατρέψει τα δεδομένα των στοιχείων του μοντέλου του έργου από το Revit. Τέλος, το Dynamo μέσω ενός εργαλείου του, το Optimo, έχει τη δυνατότητα να βελτιστοποιεί τη λύση των προβλημάτων που επεξεργάζεται ο χρήστης χρησιμοποιώντας εξελικτικούς αλγορίθμους (evolutionary algorithms).



Σχήμα 3: Περιβάλλον γραφικού προγραμματισμού

- **Opensees**

Το Opensees αποτελεί ένα ανοικτού κώδικα (open source) ισχυρό λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων για εφαρμογές γεωτεχνικής και δομοστατικής μηχανικής, το οποίο χρησιμοποιείται ευρέως σε σεισμικές αναλύσεις των κατασκευών. Σε αντίθεση με άλλα λογισμικά, το Opensees δεν παρέχει στο χρήστη περιβάλλον διεπαφής (user interface), αλλά η εισαγωγή των δεδομένων της ανάλυσης γίνεται μέσω αρχείων κώδικά σε γλώσσα προγραμματισμού TCL και τα αποτελέσματα της ανάλυσης εξέρχονται σε αρχεία κειμένου.

- **Μη γραμμική ανάλυση**

Η μη γραμμική ανάλυση είναι η ανάλυση στην οποία η σχέση μεταξύ των επιβαλλόμενων δυνάμεων και των παραγόμενων μετατοπίσεων είναι μη γραμμική. Η μη γραμμικότητα μπορεί να προέρχεται από τη γεωμετρική μη γραμμικότητα, την ανελαστική συμπεριφορά των υλικών ή τις συνοριακές συνθήκες ενός προβλήματος. Η μη γραμμικότητα επηρεάζει το μητρώο στιβαρότητας των κατασκευών το οποίο παύει να είναι σταθερό κατά την επιβολή των φορτίων. Η επίλυση μη γραμμικών προβλημάτων απαιτεί την μαθηματική προσέγγιση των λύσεων των εξισώσεων ισορροπίας κατά την ανάλυση των φορέων μέσα από διάφορες μεθόδους.

- Στατική ανελαστική ανάλυση

Η στατική ανελαστική ανάλυση είναι μία διαδικασία μη γραμμικής ανάλυσης για την εκτίμηση της ικανότητας αντοχής μίας κατασκευής πέραν του ελαστικού της ορίου. Η ανάλυση αυτή στοχεύει στον υπολογισμό του ορίου αντοχής της κατασκευής στο μετελαστικό κλάδο συμπεριφοράς της. Η μέθοδος της στατικής ανελαστικής ανάλυσης προβλέπει επίσης τις πιθανές περιοχές αστοχίας των φορέων παρακολουθώντας την αλληλουχία της δημιουργίας των βλαβών κάθε δομικού μέλους του [Leslie (2013)].

- Κανονισμός Επεμβάσεων (ΚΑΝ.ΕΠΕ.)

Ο Κανονισμός Επεμβάσεων (ΚΑΝ.ΕΠΕ.) είναι ένα θεσμοθετημένο σύνολο κριτηρίων για την αποτίμηση της φέρουσας ικανότητας υφιστάμενων κατασκευών και κανόνων εφαρμογής για τον αντισεισμικό ανασχεδιασμό τους, καθώς και για τις ενδεχόμενες επεμβάσεις, επισκευές ή ενισχύσεις. Πρόκειται για την εφαρμογή στην Ελλάδα του Μέρους 3 του ΕΚ8 που αφορά σε μεθόδους αποτίμησης και επισκευής κατασκευών. Οι βασικές αρχές και τα κριτήρια του κανονισμού, όπως π.χ. οι στάθμες επιτελεστικότητας και οι στόχοι αποτίμησης ή ανασχεδιασμού, μπορούν να εφαρμοστούν και για κτίρια με φέροντα οργανισμό από άλλα υλικά πέραν του ωπλισμένου σκυροδέματος. Ο Κανονισμός αυτός ισχύει παράλληλα τόσο με τον εκάστοτε ισχύοντα Αντισεισμικό Κανονισμό, όσο και με τους εκάστοτε ισχύοντες κανονισμούς σχεδιασμού δομημάτων με συγκεκριμένο υλικό [Ο.Α.Σ.Π. (2022)].

## 1.6 Διάρθρωση

- Στο κεφάλαιο 2 θα γίνει η βιβλιογραφική διερεύνηση της παραμετρικής προσομοίωσης των κατασκευών.
- Στο κεφάλαιο 3 θα αναλυθούν οι μέθοδοι μη γραμμικής ανάλυσης των κατασκευών.
- Στο κεφάλαιο 4 θα παρουσιαστεί η διαδικασία σχεδιασμού και ανασχεδιασμού με βάση τις επιτελεστικότητες.

- Στο κεφάλαιο 5 θα γίνει μία εισαγωγή στους Γενετικούς Αλγορίθμους
- Στο κεφάλαιο 6 θα παρουσιατεί αναλυτικά η ροή της εργασίας.
- Στο κεφάλαιο 7 θα παρουσιαστούν ορισμένες εφαρμογές σύμφωνα με το διάγραμμα ροής της εργασίας.
- Στο κεφάλαιο 8 θα αναφερθούν ορισμένα συμπεράσματα και θα προταθούν ορισμένα θέματα για περαιτέρω διερεύνηση.

# Κεφάλαιο 2

## Παραμετρική προσομοίωση κατασκευών

### 2.1 Εισαγωγή στον παραμετρικό σχεδιασμό

Η προσομοίωση των κατασκευών αποτελεί μία ιδιαίτερα απαιτητική και χρονοβόρα διαδικασία, η οποία επιταχύνεται και απλοποιείται χάρη στη χρήση του ηλεκτρονικού υπολογιστή. Τα πρώτα εργαλεία υπολογιστών που υιοθετήθηκαν από τους μηχανικούς ήταν οι ηλεκτρονικές εκδόσεις των παραδοσιακών εργαλείων σχεδίασης και απόδοσης, οι οποίες επέτρεπαν την ταχύτερη σχεδίαση των μοντέλων των κατασκευών, χωρίς, όμως, να διαφοροποιούν τη διαδικασία του σχεδιασμού. Τα συμβατικά λογισμικά Computer-Aided Design (CAD) στην πραγματικότητα σχεδιάστηκαν ώστε να διευκολύνουν την επαναλαμβανόμενη εργασία στο σχεδιασμό, επιτρέποντας τη χρήση βασικών λειτουργιών επεξεργασίας, όπως είναι η “αντιγραφή”, η “αποκοπή” και η “επικόλληση” [Casini (2022)]. Οι λειτουργίες αυτές παρέχουν τη δυνατότητα στο χρήστη να προσθέσει, να αφαιρέσει ή να επανατοποθετήσει στοιχεία του έργου με ευκολία και ταχύτητα.

Τα στοιχεία του έργου στο συμβατικό σχεδιασμό είναι λίγο ή πολύ ανεξάρτητα μεταξύ τους, και έτσι η διαφοροποίηση ή η αφαίρεση κάποιου από τα στοιχεία του σχεδιασμού δεν επηρεάζει το σχεδιασμό των υπολοίπων. Για παράδειγμα, στο σχεδιασμό ενός δωματίου η μεταφορά ενός παραθύρου από κάποια θέση σε μία άλλη θα απαιτούσε την ανασχεδίαση της τοιχοποιίας στην αρχική θέση και την αφαίρεσή της στην τελική. Έτσι, παρόλο που είναι δεδομένο για κάθε έργο το γεγονός ότι η τοιχοποιία παύει να υπάρχει στα σημεία των ανοιγμάτων, ενώ απαιτείται να υπάρχει στα υπόλοιπα τμήματα περιμετρικά του κτιρίου, κατά το συμβατικό σχεδιασμό αυτό δε συμβαίνει αυτοματοποιημένα.

Ο συμβατικός σχεδιασμός με τη χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή, επιτρέπει την ταχύτερη ανάπτυξη και τροποποίηση του σχεδιασμού και την ακριβή προσομοίωση των κατασκευών.

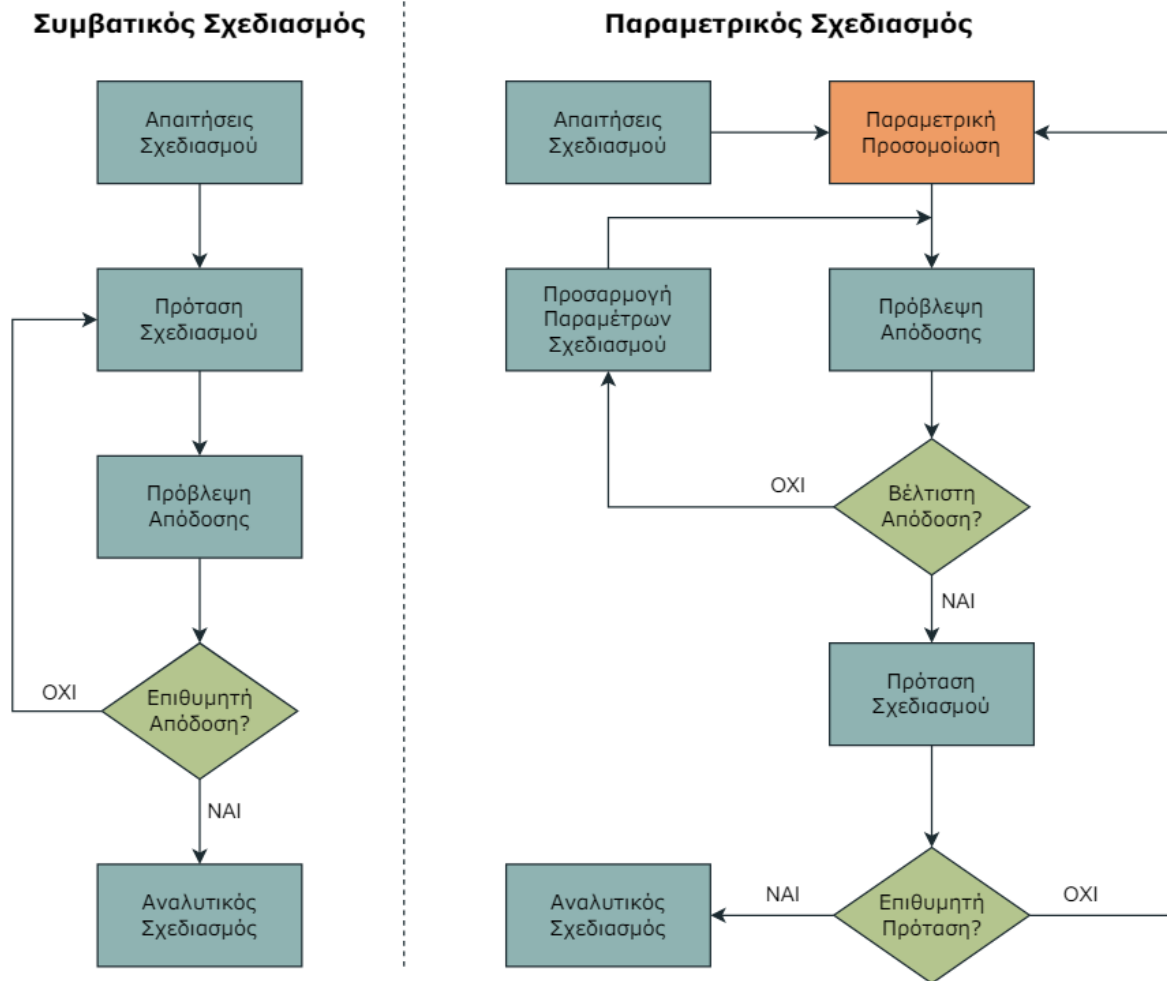
Όμως, η επιβολή κάθε αλλαγής εξακολουθεί να απαιτεί τη χειροκίνητη (manual) τροποποίηση πολλών στοιχείων [Casini (2022)]. Επομένως, η αλλαγή κάποιου στοιχείου του έργου μπορεί να καταναλώσει αρκετό χρόνο και να αυξήσει τις πιθανότητες λάθους στο σχεδιασμό του. Ανάλογα με την πολυπλοκότητα του έργου ο χρόνος και η δυσκολία της εφαρμογής των απαραίτητων αλλαγών μπορούν να αυξηθούν σημαντικά.

Αποτέλεσμα του κόστους της εφαρμογής αλλαγών στα προσομοιώματα των κατασκευών είναι ο περιορισμός τόσο της διερεύνησης εναλλακτικών λύσεων στα αρχικά στάδια της μελέτης του έργου, όσο και της δυνατότητας τροποποιήσεων του σχεδιασμού σε μεταγενέστερα στάδια της μελέτης [Casini (2022)]. Ο περιορισμός στην εξέταση διαφορετικών λύσεων μειώνει τις δυνατότητες της σχεδίασης των έργων και οδηγεί σε μη βέλτιστες λύσεις.

Τις τελευταίες δεκαετίες η ενεργειακή κρίση, η εξέλιξη της επιστήμης και η ανάγκη για οικονομικότερα έργα έχει ωθήσει σε νέες αυξημένες απαιτήσεις τα πρότυπα του σχεδιασμού. Η ενσωμάτωση νέων φιλόδοξων απαιτήσεων στα αρχικά στάδια του σχεδιασμού, με στόχο την ελαχιστοποίηση των επιπτώσεων των έργων στο περιβάλλον και την κοινωνία έχει καταστήσει το βιώσιμο σχεδιασμό σημαντικό μέλημα και ενεργό ερευνητικό πεδίο της επιστήμης του πολιτικού μηχανικού [Eleftheria Toulouropaki (2017)]. Με σκοπό την εκπλήρωση των σύγχρονων κοινωνικοοικονομικών και περιβαλλοντικών απαιτήσεων, έχει εισέλθει στις μελέτες των έργων η έννοια του παραμετρικού σχεδιασμού.

Σε αντίθεση με το συμβατικό σχεδιασμό, όπου η διαδικασία βελτιστοποίησης του σχεδιασμού βασίζεται στην σταδιακή τροποποίηση των παραμέτρων μέσω μίας διαδικασίας δοκιμής και λάθους, ο παραμετρικός σχεδιασμός εστιάζει σε μία δυναμική διαδικασία λήψης αποφάσεων [Eleftheria Toulouropaki (2017)]. Ο παραμετρικός σχεδιασμός βασίζεται στον καθορισμό σχέσεων μεταξύ των ανεξάρτητων στοιχείων του έργου και του τρόπου με τον οποίο αυτές οργανώνονται και ελέγχονται. Καθιερώνοντας σχέσεις αλληλεξάρτησης μεταξύ των στοιχείων, η παραμετρική προσέγγιση του σχεδιασμού αντικαθιστά τη χειροκίνητη αλληλεπίδραση του μηχανικού με το μοντέλο. Τα χαρακτηριστικά του σχεδιασμού διαμορφώνονται σύμφωνα με αλγοριθμικές διαδικασίες και το προσομοίωμα του έργου δημιουργείται και τροποποιείται αυτόματα, ανάλογα με την πρόθεση του σχεδιασμού και την απόκριση του μοντέλου.

Με τον παραμετρικό σχεδιασμό είναι δυνατή η προσέγγιση των βέλτιστων λύσεων σε σύνθετα προβλήματα χάρη στην δυνατότητα διερεύνησης και αξιολόγησης μεγάλου πλήθους εναλλακτικών προτάσεων. Έτσι, οι παραμετρικές προσομοιώσεις των κατασκευών μπορούν να οδηγήσουν σε πιο βιώσιμα έργα καθώς μπορούν να επεξεργαστούν με δυναμικό τρόπο το μεγάλο πλήθος των παραμέτρων στις οποίες βασίζεται η έννοια της βιωσιμότητας τους.



Σχήμα 4: Σύγκριση διαδικασίας συμβατικού και παραμετρικού σχεδιασμού

## 2.2 Παραμετρικός σχεδιασμός και βελτιστοποίηση

Κατά τη σχεδίαση ενός έργου ο μηχανικός έρχεται αντιμέτωπος με μεγάλο πλήθος επιλογών οι οποίες συχνά έχουν αντιφατικές επιπτώσεις στην απόδοση του κτηρίου. Για παράδειγμα, στο σχεδιασμό ενός ενεργειακού κτηρίου η μεγάλη επιφάνεια παραθύρων αυξάνει το φυσικό φωτισμό του, αλλά ταυτόχρονα αυξάνει και τη θερμοκρασία του. Έτσι, σχεδιάζοντας μεγάλες επιφάνειες παραθύρων μειώνεται η απαίτηση κατανάλωσης ρεύματος για το φωτισμό του κτηρίου, όμως συγχρόνως αυξάνεται σημαντικά η κατανάλωση ενέργειας για την ψύξη και τη θέρμανση του.

Σήμερα μέσω της προσομοίωσης της συμπεριφοράς των κτηρίων (building performance simulation – BPS) είναι δυνατό να προβλεφθεί με ακρίβεια η υποθετική ή η υπάρχουσα απόδοση ενός έργου σε διάφορους τομείς [Eleftheria Touloupaki (2017)]. Μπορεί να υπολογιστεί η αναμενόμενη κατανάλωση ενέργειας, η ποιότητα του αέρα των εσωτερικών χώρων, οι απαιτήσεις του συστήματος κλιματισμού ή το κόστος λειτουργίας των έργων. Η



προσομοίωση της συμπεριφοράς των κτηρίων είναι απαραίτητη στη σχεδίαση βιώσιμων έργων τόσο για το περιβάλλον όσο και για το χρήστη. Η επιδίωξη της μείωσης των αρνητικών επιπτώσεων των έργων μέσω στρατηγικών εξοικονόμησης πόρων, μείωσης αποβλήτων και ελαχιστοποίησης του κόστους του κύκλου ζωής των έργων είναι απαραίτητη ενέργεια για τα σύγχρονα έργα.

Οι παράμετροι οι οποίες επηρεάζουν την απόδοση του έργου σε κάθε τομέα, αλλά και ο τρόπος με τον οποίο τον επηρεάζουν είναι σημαντικό να διερευνώνται στα αρχικά στάδια της μελέτης ενός έργου. Οι παράμετροι του σχεδιασμού, όπως είναι το σχήμα και ο προσανατολισμός του έργου επηρεάζουν σε μεγάλο ποσοστό την απόδοση και το κόστος κατασκευής και λειτουργίας του [Eleftheria Toulouropaki (2017)]. Επομένως, η βελτιστοποίηση της σχεδίασης του έργου έχει νόημα να λαμβάνει υπόψη αυτές τις αρχικές παραμέτρους του σχεδιασμού.

Για να είναι δυνατή η εύρεση της βέλτιστης λύσης της σχεδίασης από τα πρώιμα στάδια του σχεδιασμού του έργου είναι απαραίτητη η ανάπτυξη παραμετρικών προσομοιωμάτων. Τα παραμετρικά προσομοιώματα, όπως ήδη αναφέρθηκε, παρέχουν τη δυνατότητα διερεύνησης πλήθους εναλλακτικών προτάσεων χωρίς χρονοβόρες επεξεργασίες και προσαρμογές των μοντέλων. Η διερεύνηση εναλλακτικών λύσεων είναι δυνατό να επιτυγχάνεται ακόμα και αυτόνομα εντός των παραμέτρων του σχεδιασμού και να εξετάζονται νέες εναλλακτικές που μπορεί να μην είναι εξ αρχής προφανείς στο μηχανικό.

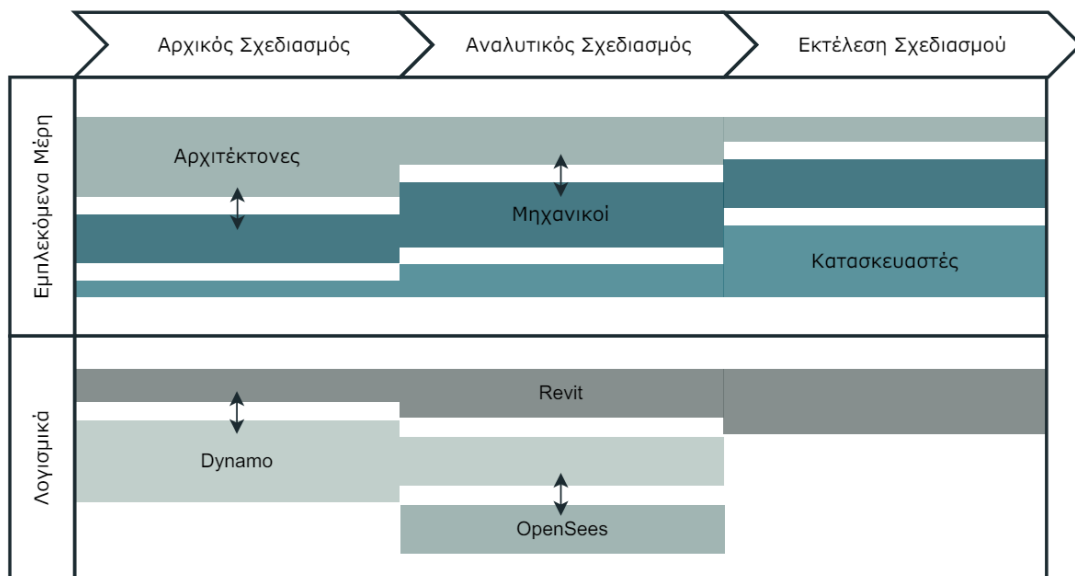
Η εύρεση της βέλτιστης λύσης δεν είναι πάντα εύκολο να επιτευχθεί μέσω χειροκίνητων δοκιμών. Τα κτήρια αποτελούν σύνθετες δομές και η αξιολόγηση διαφορετικών μεταβλητών παραμέτρων που συχνά εξυπηρετούν αντικρουόμενους στόχους αποτελεί μία αρκετά δύσκολη διαδικασία. Καταλληλότερες μέθοδοι για την βελτιστοποίηση των πολύπλοκων δομών των έργων του πολιτικού μηχανικού είναι οι μέθοδοι βελτιστοποίησης με πολλαπλά κριτήρια (multi objective optimization - MOO)

## 2.3 Παραμετρικός σχεδιασμός και Μοντέλα Δομικών Πληροφοριών

Η διαδικασία της βελτιστοποίησης και της ανάλυσης των διαφόρων εναλλακτικών προτάσεων των έργων είθισται διεξάγεται σε δύο μέρη. Τα δύο αυτά μέρη αποτελούνται από τους αρχιτέκτονες και τους μηχανικούς. Οι αρχιτέκτονες δίνουν έμφαση στους τομείς της εργονομίας, της αισθητικής και της λειτουργίας των έργων, ενώ οι μηχανικοί στοχεύουν στην ικανοποίηση της σταθερότητας και της αποδοτικότητας των έργων. Το χάσμα που δημιουργεί ο διαχωρισμός της διαδικασίας της σχεδίασης στα δύο παραπάνω μέρη οδηγεί σε δυσκολίες κατά το σχεδιασμό και σε μη βέλτιστες λύσεις [Olesen (2018)]. Αποτέλεσμα των

προηγούμενων είναι η υπέρβαση του κόστους και του χρόνου υλοποίησης και η παρουσία σφαλμάτων στα έργα.

Η ανάγκη για τη διευκόλυνση της ουσιαστικής επικοινωνίας μεταξύ των συντελεστών διαφορετικών κλάδων των έργων έχει εισαγάγει την ιδέα του Μοντέλου Δομικών Πληροφοριών (BIM) στο σχεδιασμό των έργων. Τα Μοντέλα Δομικών Πληροφοριών επιτρέπουν την ολοκληρωμένη παραγωγή και διαχείριση των δεδομένων που σχετίζονται με ένα έργο κατά τη διάρκεια ολόκληρου του κύκλου ζωής του. Η ολιστική προσέγγιση της σχεδίασης των έργων στοχεύει στην άμεση και εύκολη ανταλλαγή των πληροφοριών του έργου μεταξύ των εμπλεκόμενων μερών και την έγκαιρη επίλυση των λαθών του σχεδιασμού [F.Fedorik (2016)]. Γίνεται, λοιπόν, εφικτή η έγκαιρη συμμετοχή όλων των συντελεστών των έργων στη διαδικασία του σχεδιασμού και είναι δυνατή η λήψη βασικών αποφάσεων από τους αρμόδιους για κάθε τομέα του έργου.



Σχήμα 5: Διαγραμμα ροής της συνεργασίας παραμετρικού σχεδιασμού και BIM



## Κεφάλαιο 3

# Μέθοδοι μη γραμμικής ανάλυσης κατασκευών

### 3.1 Εισαγωγή στη μη γραμμική ανάλυση

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται στα έργα του Πολιτικού Μηχανικού παρουσιάζουν γραμμική και ελαστική συμπεριφορά μόνο για μικρές τιμές των τάσεων και των παραμορφώσεων τους. Ύστερα από κάποιο επίπεδο φόρτισης, αυτή η γραμμικότητα παύει να ισχύει και έτσι δεν υπάρχει αναλογία μεταξύ τάσεων και ανηγμένων παραμορφώσεων των δομικών υλικών [Γαντές (2015)]. Ταυτόχρονα, η επιθυμία μείωσης του κόστους και του βάρους των υλικών οδηγεί σε πιο εύκαμπτα δομικά στοιχεία και κατ' επέκταση κατασκευές. Αυτή η ευκαμψία έχει ως αποτέλεσμα τις απότομες αυξήσεις των παραμορφώσεων των φορέων για μικρές αυξήσεις της φόρτισης, άρα και την έντονη μεταβολή της γεωμετρίας του φορέα από την αρχική του κατάσταση κατά τη διάρκεια της φόρτισής του. Έτσι, η αναλογία μεταξύ φόρτισης και αναπτυσσόμενης έντασης και παραμόρφωσης δεν ισχύει.

Η έλλειψη γραμμικότητας στη συμπεριφορά των υλικών και τη γεωμετρία των φορέων κατά τη φόρτισή τους πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στο σχεδιασμό των κατασκευών του Πολιτικού Μηχανικού. Παλαιότερες προσεγγίσεις του σχεδιασμού με κριτήριο τη μη υπέρβαση των επιτρεπόμενων τάσεων των υλικών και τον περιορισμό των φορτίσεων σε στάθμες που τα υλικά δεν οδηγούνται σε μετελαστική συμπεριφορά κρίνονται αντιοικονομικές και επισφαλείς.

Για να λαμβάνεται υπόψη στο σχεδιασμό η μη γραμμικότητα των υλικών και της γεωμετρίας των δομικών στοιχείων και να υπολογίζεται η συνολική αντοχή των κατασκευών χρησιμοποιούνται μέθοδοι επίλυσης μη γραμμικών προβλημάτων. Η μη γραμμική ανάλυση λαμβάνει υπόψη την απόκριση του φορέα μέσα από τη σταδιακή προσαύξηση των επιβαλλόμενων φορτίων. Παρακολουθεί τη συμπεριφορά του σε κάθε βήμα φόρτισης μέχρι την κατάρρευσή του παρουσιάζοντας την ανακατανομή των εντάσεων που αναπτύσσονται σε αυτόν, καθώς και

το μηχανισμό αστοχίας του [Γαντές (2015)].

## 3.2 Περιγραφή της μεθόδου των μη γραμμικών αναλύσεων

Στις μη γραμμικές αναλύσεις τα εξωτερικά φορτία επιβάλλονται αυξανόμενα λίγο-λίγο σε μικρά βήματα φόρτισης, μέχρις ότου επιτευχθεί η τελική τιμή τους. Έτσι, η απόκριση της κατασκευής μπορεί να θεωρηθεί γραμμική σε κάθε επιμέρους βήμα φόρτισης. Δηλαδή, η μη γραμμική λύση του προβλήματος χωρίζεται σε σειρές γραμμικών λύσεων. Κάθε γραμμική λύση αποτελεί μία επανάληψη της μεθόδου επίλυσης. Η ισορροπία της κατασκευής σε κάθε βήμα φόρτισης εκφράζεται στην τρέχουσα παραμορφωμένη της θέση. Στόχος της ανάλυσης είναι ο υπολογισμός της θέσης ισορροπίας σε κάθε ένα από αυτά τα βήματα [Προβατίδης (2015)].

Η επαυξητική βήμα προς βήμα επίλυση στοχεύει στον προσδιορισμό της κατάστασης της κατασκευής σε κάθε βήμα φόρτισης  $n$  γνωρίζοντας την κατάστασή της στο προηγούμενο βήμα  $n - 1$  της επίλυσης. Ο προσδιορισμός της κατάστασης της κατασκευής από κάθε βήμα στο επόμενο γίνεται προσεγγιστικά. Για το λόγο αυτό είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός της επιθυμητής ακρίβειας της λύσης μέσω ενός κριτηρίου σύγκλισης, έτσι ώστε η ακρίβεια της λύσης να είναι ικανοποιητική. Η σύγκλιση των λύσεων δεν είναι εγγυημένη και μπορεί να βελτιωθεί με την μείωση του βήματος της επίλυσης (μικρότερο βήμα – περισσότερες επαναλήψεις).

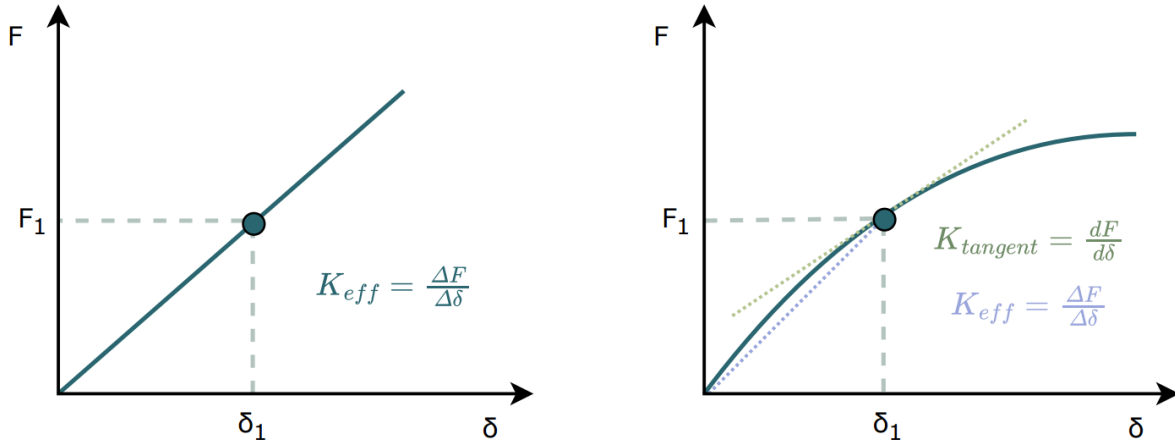
Επομένως, η λύση των μη γραμμικών προβλημάτων δεν μπορεί να δοθεί από την επίλυση της εξίσωσης:

$$\mathbf{D} = \mathbf{K}^{-1} \cdot \mathbf{F} \quad 3.2.1$$

αφού το μητρώο στιβαρότητας  $\mathbf{K}$  ή το διάνυσμα των δυνάμεων  $\mathbf{F}$  εξαρτώνται από το διάνυσμα των επικόμβιων μετακινήσεων  $\mathbf{D}$ .

Σε ένα γραμμικό πρόβλημα η κλίση του διαγράμματος Δύναμης-Μετατόπισης ( $F - \delta$ ) είναι σταθερή και ισούται με τη δυσκαμψία του φορέα. Αντίθετα σε ένα μη γραμμικό πρόβλημα η κλίση του διαγράμματος Δύναμης-Μετατόπισης δεν είναι σταθερή και σε κάθε σημείο του διαγράμματος αντιστοιχούν δύο διαφορετικά είδη κλίσης. Η πρώτη κλίση αντιστοιχεί στην κλίση της ευθείας με αρχή την αρχή των αξόνων του διαγράμματος  $F - \delta$  και πέρας το σημείο ενδιαφέροντος της καμπύλης  $F - \delta$ , ενώ η δεύτερη κλίση αντιστοιχεί στην κλίση

της εφαπτομένης της καμπύλης  $F - \delta$  στο σημείο ενδιαφέροντος. Ορίζονται, λοιπόν, δύο είδη δυσκαμψίας του φορέα. Τα παραπάνω γίνονται ευκολότερα αντιληπτά παρατηρώντας το σχήμα 6.



Σχήμα 6: Γεωμετρικός ορισμός της δυσκαμψίας σε γραμμικά προβλήματα (αριστερά) και γεωμετρικός ορισμός της ενεργούς και της εφαπτομενικής δυσκαμψίας σε μη γραμμικά προβλήματα (δεξιά)

Η δυσκαμψία που αντιστοιχεί στην πρώτη κλίση ονομάζεται ενεργός δυσκαμψία (secant stiffness) και δίνεται από τη σχέση:

$$K_{eff} = K = \frac{\Delta F}{\Delta \delta} \quad 3.2.2$$

και η δυσκαμψία που αντιστοιχεί στη δεύτερη κλίση ονομάζεται εφαπτομενική δυσκαμψία (tangent stiffness) και δίνεται από τη σχέση:

$$K_{tangent} = K_t = \frac{dF}{d\delta} \quad 3.2.3$$

Επειδή όμως ισχύει η σχέση:

$$F = K \cdot \delta \quad 3.2.4$$

Η εξίσωση 3.2.3 μπορεί να γραφεί:

$$K_t = K + \frac{dK}{d\delta} \cdot \delta \quad 3.2.5$$

### 3.2.1 Μη γραμμική ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία

Η μη γραμμική προσέγγιση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων μπορεί να δώσει αξιόπιστα προσομοιώματα ικανά να προβλέψουν την συμπεριφορά οποιασδήποτε κατασκευής

υπό στατική ή δυναμική φόρτιση. Τα στάδια της μη γραμμικής ανάλυσης μιας κατασκευής με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων είναι τα εξής :

- Δημιουργία του digital twin μοντέλου της κατασκευής
- Διακριτοποίηση του μοντέλου σε πεπερασμένα στοιχεία
- Μόρφωση και επίλυση εξισώσεων ισορροπίας
- Έλεγχος των αποτελεσμάτων της επίλυσης
- Πρόβλεψη της αναμενόμενης συμπεριφοράς της κατασκευής βάση των αποτελεσμάτων της επίλυσης

Υποθέτοντας ότι η συνθήκη ισορροπίας στο βήμα  $i$  της ανάλυσης ενός προβλήματος για το οποίο έχει μορφωθεί προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων δίνεται από την εξίσωση:

$$F_i - r_i = 0 \quad 3.2.6$$

όπου  $F_i$  είναι οι επικόμβιες εξωτερικές φορτίσεις και  $r_i$  οι επικόμβιες δυνάμεις που αντιστοιχούν στις αναπτυσσόμενες τάσεις των στοιχείων στο βήμα  $i$  της ανάλυσης.

Στο επόμενο βήμα της ανάλυσης θα γίνει επαύξηση του φορτίου κατά  $F$  και η εξίσωση ισορροπίας θα είναι:

$$F_{i+1} - r_{i+1} = 0 \quad 3.2.7$$

όπου

$$r_{i+1} = r_i + r \quad 3.2.8$$

Η επαύξηση των επικόμβιων δράσεων  $r$  μπορεί να προσδιοριστεί από το εφαπτομενικό μητρώο δυσκαμψίας της κατασκευής για το προηγούμενο βήμα  $i$  και την αντίστοιχη επαύξηση των επικόμβιων μετακινήσεων:

$$r = K_{t,i} \cdot \delta \quad , \quad K_{t,i} = \frac{\partial F_i}{\partial \delta_i} \quad 3.2.9$$

Από την αντικατάσταση των εξισώσεων 3.2.8 και 3.2.9 στην 3.2.7 προκύπτει η σχέση:

$$K_{t,i} \cdot \delta = F_{i+1} - r_i \quad 3.2.10$$

και λύνοντας τη σχέση 3.2.10 ως προς  $\delta$  μπορεί να υπολογιστεί η έκφραση:

$$\delta_{i+1} = \delta_i + \delta \quad 3.2.11$$

η οποία προσεγγίζει τις μετατοπίσεις στο βήμα  $i + 1$ . Γνωρίζοντας τις μετατοπίσεις στο βήμα  $i + 1$  μπορούν να προσδιοριστούν οι τάσεις και οι αντίστοιχες επικόμβιες δυνάμεις  $r_{i+1}$ .

Τα λογισμικά πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιούν αλγορίθμους για την επίλυση των μη γραμμικών προβλημάτων. Οι σημαντικότεροι από αυτούς είναι η Μέθοδος Newton-Raphson και η Τροποποιημένη Μέθοδος Newton-Raphson [Γαντές (2015)].

### 3.2.2 Η μέθοδος Newton-Raphson

Η μέθοδος Newton-Raphson αποτελεί την συνηθέστερα χρησιμοποιούμενη μέθοδο μη γραμμικής επίλυσης προβλημάτων πολιτικού μηχανικού και είναι μία από τις πιο δυνατές και γνωστές μεθόδους προσέγγισης της ρίζας μη γραμμικών εξισώσεων. Τα πλεονεκτήματά της είναι η ακρίβεια της λύσης της και η γρήγορη - αλλά υπό προϋποθέσεις - ταχύτητα σύγκλισής της. Το σημαντικό της μειονέκτημα είναι η πιθανότητα μη σύγκλισης, η οποία παρουσιάζεται ιδιαίτερα όταν το πρόβλημα ή το χρησιμοποιούμενο υλικό είναι έντονα μη γραμμικό [Daichao Sheng (2002)]. Παρόλα αυτά, έχουν αναπτυχθεί ποικίλες τεχνικές για την σταθεροποίηση και την επιτάχυνση της σύγκλισής της, ώστε να ξεπεραστεί σε σημαντικό βαθμό αυτό το μειονέκτημα [Γεώργιος Σ. Παπαγεωργίου (2015)].

Ο επαναληπτικός τύπος της μεθόδου είναι :

$$\xi_n = \xi_{n-1} - \frac{f(\xi_{n-1})}{f'(\xi_{n-1})} \quad 3.2.12$$

όπου ο όρος  $\xi_{n-1}$  είναι ίσος με μία ενδιαμέση προσέγγιση και  $n = 1, 2, 3, \dots$  είναι το τρέχον βήμα επανάληψης. Για την πρώτη επανάληψη της μεθόδου δίνεται μία αρχική προσέγγιση ίση με  $\xi_0$ . Εκτελούνται επαναλήψεις της μεθόδου μέχρι να ικανοποιείται κάποιο συγκεκριμένο κριτήριο σύγκλισης.

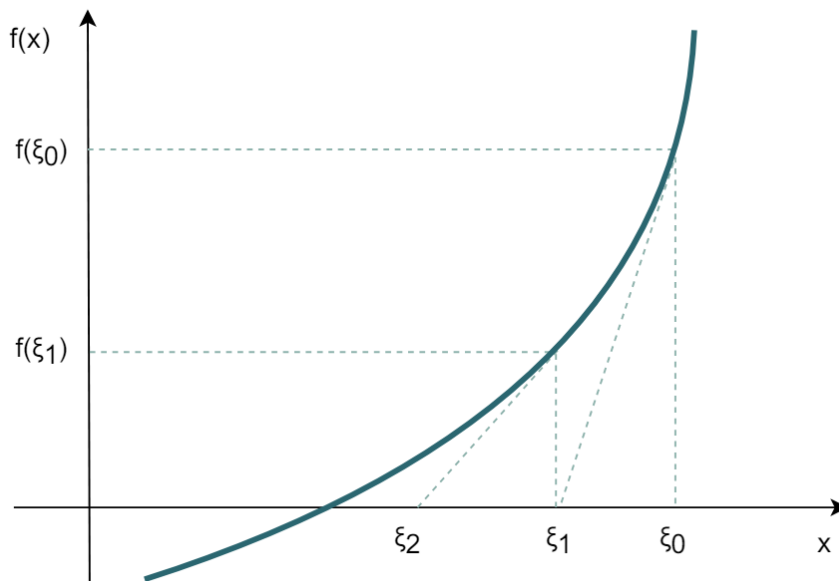
Γραφικά η μέθοδος απεικονίζεται στο σχήμα 7 από το οποίο εύκολα αποδεικνύεται ο επαναληπτικός της τύπος:

$$\tan(\omega) = \frac{f(\xi_0)}{\xi_0 - \xi_1} \Rightarrow f'(\xi_0) = \frac{f(\xi_0)}{\xi_0 - \xi_1} \Rightarrow \xi_1 = \xi_0 - \frac{f(\xi_0)}{f'(\xi_0)} \quad 3.2.13$$

Για την προσέγγιση μίας πραγματικής ρίζας της εξίσωσης  $f(x) = 0$  με αρχική προσέγγιση  $\xi_0$ , φράγμα  $TOL$  και μέγιστο αριθμό επαναλήψεων  $N$ , τα βήματα του αλγόριθμου επίλυσης με τη μέθοδο Newton-Raphson είναι τα ακόλουθα [Γεώργιος Σ. Παπαγεωργίου (2015)]:

- Βήμα επανάληψης:  $i = 1$
- Αν  $i \leq N$  : Αν  $|\xi - \xi_0| \leq TOL$





Σχήμα 7: Newton Raphson

- $\xi = \xi_0 - \frac{f(\xi_0)}{f'(\xi_0)}$
- Αν  $|\xi - \xi_0| \leq TOL$  τότε οι επαναλήψεις σταματούν και η ζητούμενη ρίζα είναι ίση με  $\xi$
- Αν  $|\xi - \xi_0| > TOL$  τότε:
  - \*  $\xi_0 = \xi$  (ανανέωση της τιμής της προσέγγισης της ρίζας  $\xi_0$ )
  - \*  $i = i + 1$  (ανανέωση του βήματος επανάληψης  $i$ )
  - \* Επανάλαβε με τις ανανεωμένες τιμές από το βήμα 2

### 3.2.3 Η μέθοδος Newton-Raphson στη μη γραμμική ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία

Στην παράγραφο αυτή θα περιγραφεί ο τρόπος με τον οποίο η μέθοδος Newton-Raphson προσεγγίζει τις λύσεις των μη γραμμικών εξισώσεων ισορροπίας των μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων.

Έστω ότι αντιμετωπίζουμε το πρόβλημα εύρεσης της μετατόπισης  $\delta$  ενός φορέα με έναν βαθμό ελευθερίας που συμπεριφέρεται μη γραμμικά για την επιβολή της φόρτισης  $F$ . Γνωρίζουμε τις αρχικές συνθήκες του προβλήματος, οι οποίες είναι :

- η αρχική μετατόπιση του φορέα είναι ίση με μηδέν:  $\delta_0 = 0$
- η αρχική αντίδραση του φορέα είναι ίση με μηδέν:  $r_0 = 0$

Αν το φορτίο  $F$  επιβληθεί σε δύο (2) βήματα τότε σε κάθε βήμα η προσαύξηση του φορτίου θα είναι ίση με  $\frac{F}{2}$ . Έτσι, η πρώτη επαύξηση του φορτίου θα οδηγήσει από τη φόρτιση  $F_0 = 0$  στη φόρτιση  $F_1 = \frac{F}{2}$  και η δεύτερη από τη φόρτιση  $F_1$  στην  $F_2 = F_1 + \frac{F}{2} = \frac{F}{2} + \frac{F}{2} = F$ . Επομένως, μέσα σε δύο βήματα η επιβαλλόμενη φόρτιση θα φτάσει την επιθυμητή τιμή.

Για τον υπολογισμό της μετατόπισης που αντιστοιχεί σε κάθε βήμα φόρτισης του φορέα θα γίνει χρήση της μεθόδου Newton-Raphson. Σε κάθε βήμα θα γίνει επαρκής αριθμός επαναλήψεων μέχρις ότου το σφάλμα υπολογισμού της μετατόπισης να είναι επαρκώς μικρό, και άρα η λύση να έχει την επιθυμητή ακρίβεια. Για καλύτερη εποπτεία της πορείας επίλυσης του προβλήματος παρατίθεται το σχήμα 8.

Αρχικά, φέρνοντας την εφαπτομένη της καμπύλης Δύναμης-Μετατόπισης του φορέα στο σημείο που αντιστοιχεί σε μετατόπιση ίση με την αρχική, δηλαδή  $\delta = \delta_0 = 0$ , μπορεί να υπολογιστεί η αρχική εφαπτομενική στιβαρότητα του φορέα, η οποία δίνεται από τη σχέση:

$$K_{t0} = K_0 + \frac{dK}{d\delta} \cdot \delta_0 \quad 3.2.14$$

Στη συνέχεια, από την εφαπτομενική στιβαρότητα υπολογίζεται η εκτιμώμενη μετακίνηση για την 1η επανάληψη της μεθόδου από την σχέση:

$$\delta_1 = \delta_0 + \frac{F_1 - r_0}{K_{t0}} = \delta_0 + \frac{e_0}{K_{t0}} \quad 3.2.15$$

Υπολογίζοντας το σημείο τομής της καμπύλης Δύναμης-Μετατόπισης και της κατακόρυφης ευθείας που διέρχεται από το σημείο  $\delta_1$ , μπορούμε να υπολογίσουμε την κλίση της ευθείας που ενώνει το σημείο αυτό με το σημείο της καμπύλης που αντιστοιχεί σε μετατόπιση ίση με την αρχική ( $\delta_0 = 0$ ). Η κλίση της ευθείας αυτής θα ισούται με τη ενεργό στιβαρότητα της κατασκευής για την πρώτη επανάληψη :

$$K_1 = K(\delta_1) \quad 3.2.16$$

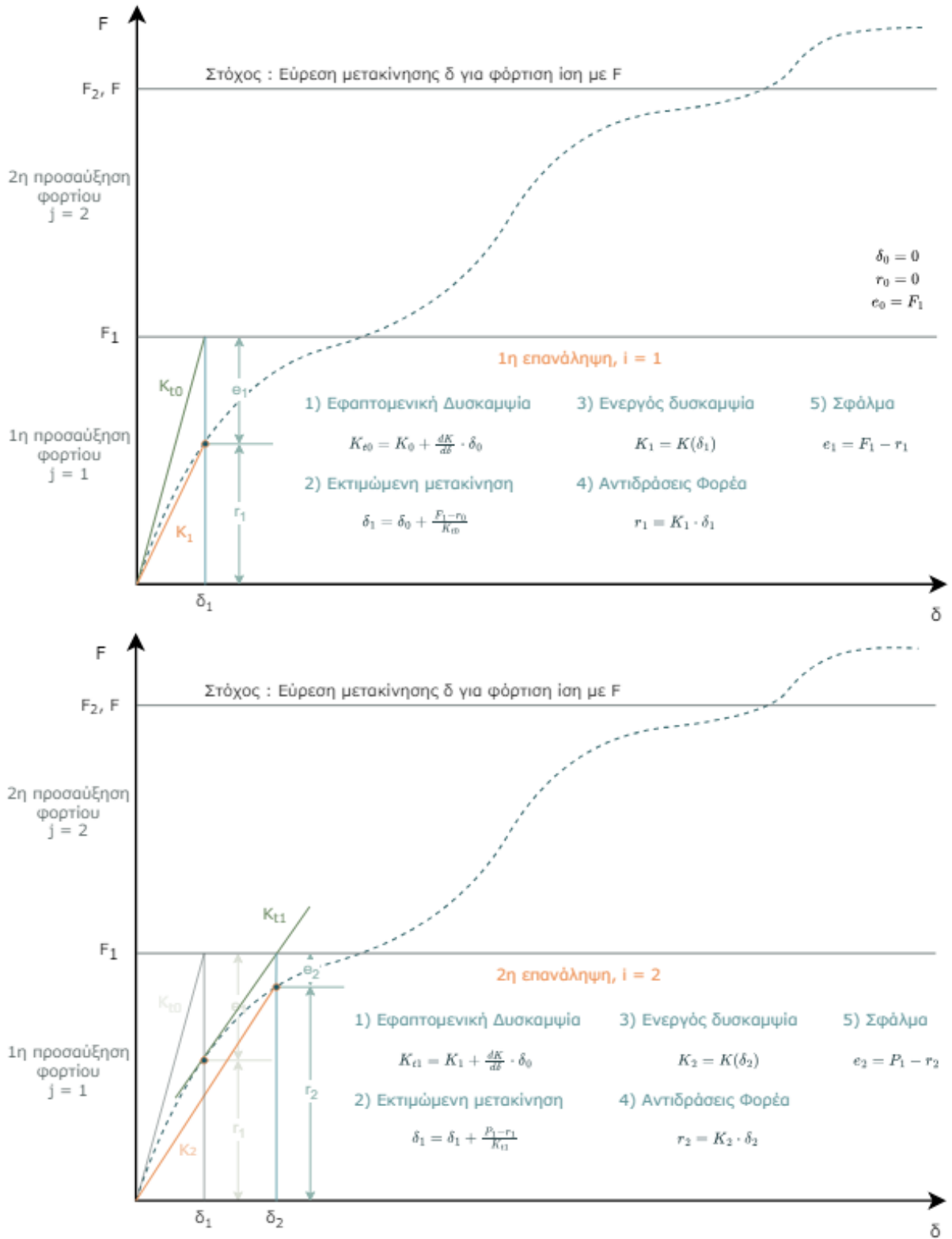
Έχοντας υπολογίσει την ενεργό στιβαρότητα του φορέα μπορεί να βρεθεί η εκτιμώμενη αντίδρασή του για τη φόρτιση  $F_1$  σύμφωνα με τη σχέση:

$$r_1 = K_1 \cdot \delta_1 \quad 3.2.17$$

και στη συνέχεια να βρεθεί το σφάλμα της πρώτης επανάληψης που είναι ίσο με:

$$e_1 = F_1 - r_1 \quad 3.2.18$$

Όσο η διαφορά μεταξύ δύναμης φόρτισης και δύναμης αντίδρασης του φορέα είναι σημαντική,



Σχήμα 8: Διαγραμματικά τα βήματα της μεθόδου Newton Raphson σε προβλήματα μη γραμμικής ανάλυσης

οι επαναλήψεις συνεχίζονται χωρίς να γίνει προσαύξηση του φορτίου. Όταν το σφάλμα γίνει επαρκώς μικρό, οι επαναλήψεις του πρώτου βήματος ολοκληρώνονται και γίνεται προσαύξη-

ση του φορτίου. Οι επαναλήψεις του δεύτερου βήματος της επίλυσης ξεκινούν με αρχικές τιμές εκείνες που βρέθηκαν στην τελευταία επανάληψη του πρώτου βήματος και φορτίο  $F_2$  ( $F_2 - \delta_{final} - K_{final} \cdot r_{final} = F_1$ ).

Αντίστοιχα εφαρμόζεται η μέθοδος Newton-Raphson στην περίπτωση περισσότερων βημάτων φόρτισης του φορέα. Η γενικευμένη διατύπωση των παραπάνω σχέσεων για  $j$  προσαυξητικά βήματα και  $n$  αριθμό επαναλήψεων σε κάθε βήμα είναι:

- $K_{t,n-1} = K_{n-1} + \frac{dK}{d\delta} \cdot \delta_{n-1}$
- $\delta_n = \delta_{n-1} + \frac{e_{n-1}}{K_{t,n-1}} = \delta_{n-1} + \frac{F_j - r_{n-1}}{K_{t,n-1}}$
- $K_n = K(\delta_n)$
- $r_n = K_n \cdot \delta_n$
- $e_n = F_j - r_n$

Όταν αντιμετωπίζονται προβλήματα περισσότερων βαθμών ελευθερίας οι μετατοπίσεις, οι δυνάμεις και οι δυσκαμψίες δεν προσδιορίζονται με αριθμούς, αλλά με διανύσματα και μητρώα. Η διαδικασία επίλυσης των μη γραμμικών προβλημάτων με τη μέθοδο Newton-Raphson παραμένει η ίδια, αλλά οι σχέσεις μετατρέπονται στις ακόλουθες.

- $\mathbf{K}_t(\delta_{n-1}) = \mathbf{K}(\delta_{n-1}) + \frac{\partial \mathbf{K}(\delta_{n-1})}{\partial \delta_{n-1}} \cdot \delta_{n-1}$
- $\delta_i = \delta_{n-1} + \mathbf{K}_t(\delta_{n-1})^{-1} (\mathbf{P}_j - \mathbf{r}_{n-1})$
- $\mathbf{K}_n = \mathbf{K}(\delta_n)$
- $\mathbf{r}_n = \mathbf{K}(\delta_n) \cdot \delta_n$
- $\mathbf{e}_n = \mathbf{F}_j - \mathbf{r}_n$

Παραπάνω αναλύεται η μέθοδος Newton-Raphson σε προβλήματα όπου γνωρίζουμε τη φόρτιση του φορέα και ψάχνουμε την μετατόπιση στην οποία αντιστοιχεί. Υπάρχουν, όμως, προβλήματα στα οποία συμβαίνει το αντίστροφο. Δηλαδή, είναι γνωστή η μετατόπιση του φορέα, και προσεγγίζεται η έντασή του. Η μέθοδος που εφαρμόζεται σε αυτές τις περιπτώσεις είναι ανάλογη με την παραπάνω, μόνο που στην περίπτωση αυτή είναι γνωστές οι τιμές των μετατοπίσεων σε κάθε προσαυξητικό βήμα και προσεγγίζονται οι υπόλοιπες παράμετροι. Σε αυτή την περίπτωση το σφάλμα της κάθε επανάληψης δίνεται από τη σχέση :

$$e_n = \delta_j - u_n$$

όπου  $u_n$  είναι η εκτιμώμενη μετατόπιση του φορέα στην  $n$ -οστή επανάληψη της Newton-Raphson του βήματος  $j$  και  $\delta_j$  είναι η μετατόπιση που επιβάλλεται στο φορέα κατά το προσαυξητικό βήμα  $j$ .

Τα βασικότερα κριτήρια σύγκλισης της μεθόδου Newton-Raphson για την επίλυση μη γραμμικών προβλημάτων πολιτικού μηχανικού είναι το κριτήριο των μετατοπίσεων και το κριτήριο των δυνάμεων. Τα κριτήρια αυτά στοχεύουν στον περιορισμό της απόκλισης της λύσης της μεθόδου από την πραγματική τιμή της μετατόπισης ή της φόρτισης αντίστοιχα. Ανάλογα με την φύση του προβλήματος επιλέγεται το κατάλληλο κριτήριο σύγκλισης της μεθόδου [Γαντές (2015)].

### 3.3 Μη γραμμικά στοιχεία δοκού

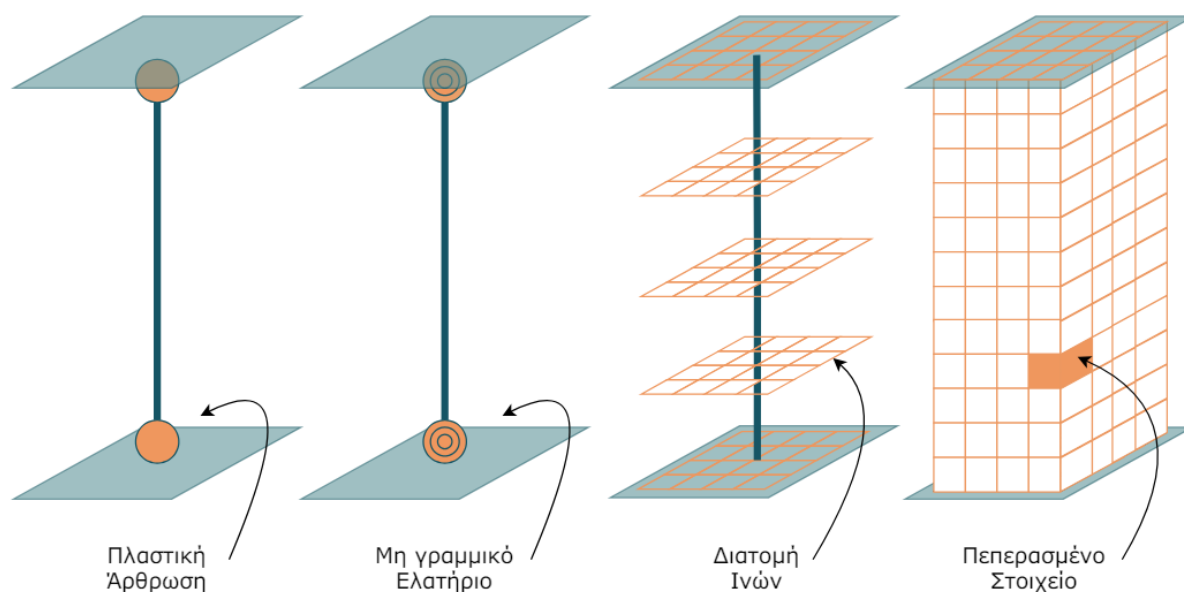
Στο κεφάλαιο αυτό θα μελετηθεί η εισαγωγή της μη γραμμικότητας στην ανάλυση των κατασκευών μέσω της δημιουργίας των μοντέλων προσομοίωσής τους. Τα μοντέλα αυτά πρέπει να είναι ικανά να αποτυπώσουν όλα τα τοπικά ανελαστικά φαινόμενα των κατασκευών, όπως είναι η διαρροή, η ρηγματώση, η κόπωση και ο λυγισμός. Η μη γραμμική ανάλυση χωρικών μοντέλων είναι χρήσιμη τόσο για την στατική όσο και για τη δυναμική ανάλυση νέων ή υφιστάμενων κατασκευών. Η ακρίβεια της ανάλυσης βασίζεται στην ακρίβεια του μοντέλου, η οποία συνεπάγεται την πολυπλοκότητά του.

Κατά την εξέλιξη της μη γραμμικής ανάλυσης των κατασκευών υπήρξαν διάφορες προσεγγίσεις για την προσομοίωση της ανελαστικής συμπεριφοράς των μελών των φορέων. Ανάλογα με την κατανομή της πλαστικότητας στην διατομή και το μήκος των δομικών μελών τους τα μοντέλα κατατάσσονται στις εξής κατηγορίες [Gregory G. Deierlein (2010)]:

- Μοντέλα στα οποία η μη γραμμική απόκριση του φορέα εμφανίζεται σε επιλεγμένους βαθμούς ελευθερίας και όχι σε όλους
- Μοντέλα τα οποία συνιστώνται από διακριτά συνδεδεμένα μεταξύ τους στοιχεία με σημειακή ή κατανεμημένη μη γραμμικότητα
- Μοντέλα των οποίων η δομή είναι διακριτοποιημένη σε πολλά διδιάστατα ή τρισδιάστατα πεπερασμένα στοιχεία

Τα κυριότερα στοιχεία δοκού που χρησιμοποιούνται στα μοντέλα μη γραμμικής ανάλυσης είναι τα στοιχεία συγκεντρωμένης πλαστικότητας και τα στοιχεία κατανεμημένης πλαστικότητας. Μερικά από αυτά φαίνονται στο σχήμα 9.

Κατά την επιλογή του τύπου των στοιχείων δοκού για την μη γραμμική ανάλυση είναι σημαντικό να είναι αντιληπτός από τον πολιτικό μηχανικό ο αναμενόμενος τρόπος συμπεριφοράς,



Σχήμα 9: Τρόποι κατανομής της πλαστικότητας στα στοιχεία δοκού

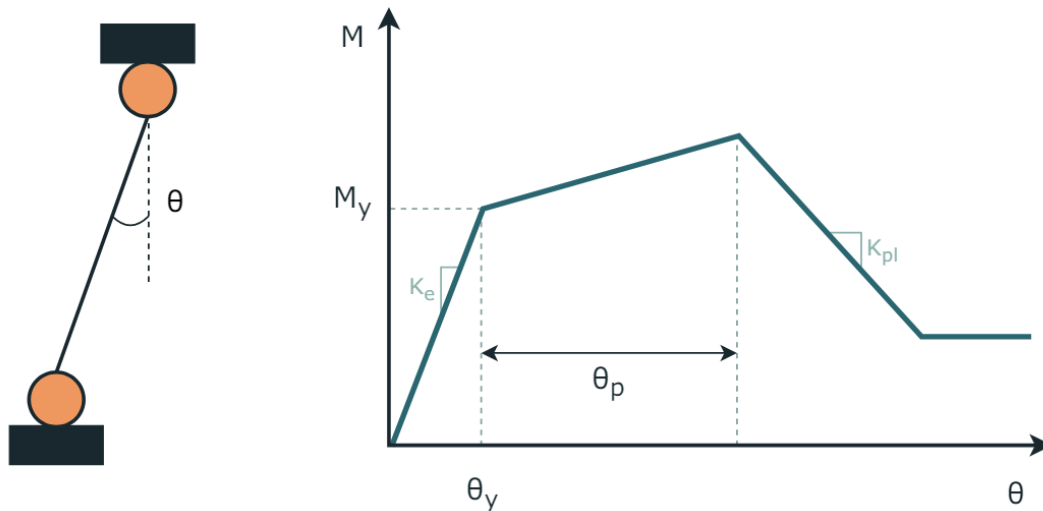
οι παραδοχές και οι προσεγγίσεις που συνοδεύουν τη χρήση του κάθε στοιχείου [Gregory G. Deierlein (2010)].

### 3.3.1 Στοιχεία δοκού με συγκεντρωμένη πλαστικότητα

Λόγω της συχνής παρατήρησης της συγκέντρωσης του μη γραμμικού χαρακτήρα των δοκών και των υποστυλωμάτων στα άκρα τους, μια αρχική προσέγγιση της εισαγωγής της μη γραμμικότητας στα μοντέλα επίλυσης των κατασκευών αποτέλεσε η εισαγωγή πλαστιμότητας στα άκρα των μελών. Στα μοντέλα αυτά γίνεται η θεώρηση ότι η ανελαστική συμπεριφορά των στοιχείων δοκού συγκεντρώνεται στις ακραίες θέσεις τους, ενώ ενδιάμεσα αυτών η συμπεριφορά τους είναι ελαστική. Η ανελαστική συμπεριφορά προσομοιώνεται με την εισαγωγή πλαστικών αρθρώσεων ή μη γραμμικών ελατηρίων στα άκρα των στοιχείων.

Οι πλαστικές αρθρώσεις ή τα μη γραμμικά ελατήρια πρέπει να προσομοιώνουν τη συμπεριφορά του μέλους σύμφωνα με την πραγματική απόκρισή του σε μονοτονική και ανακυκλιζόμενη φόρτιση. Τα διαγράμματα ροπής-στροφής και οι καμπύλες υστέρησης των μελών προκύπτουν από πειραματικές μετρήσεις, και έτσι τα μοντέλα μπορούν να μιμηθούν με ακρίβεια τη πραγματική μη γραμμική συμπεριφορά των φορέων.

Παρόλης της απλότητας τους τα στοιχεία δοκού με συγκεντρωμένη πλαστικότητα υπάρχει περίπτωση να είναι καταλληλότερα για την καταγραφή της μη γραμμικής απόκρισης των μελών μέσω της βαθμονόμησης δεδομένων καμπύλων υστέρησης και ροπής-στροφής από πειραματικές μετρήσεις [Gregory G. Deierlein (2010)].



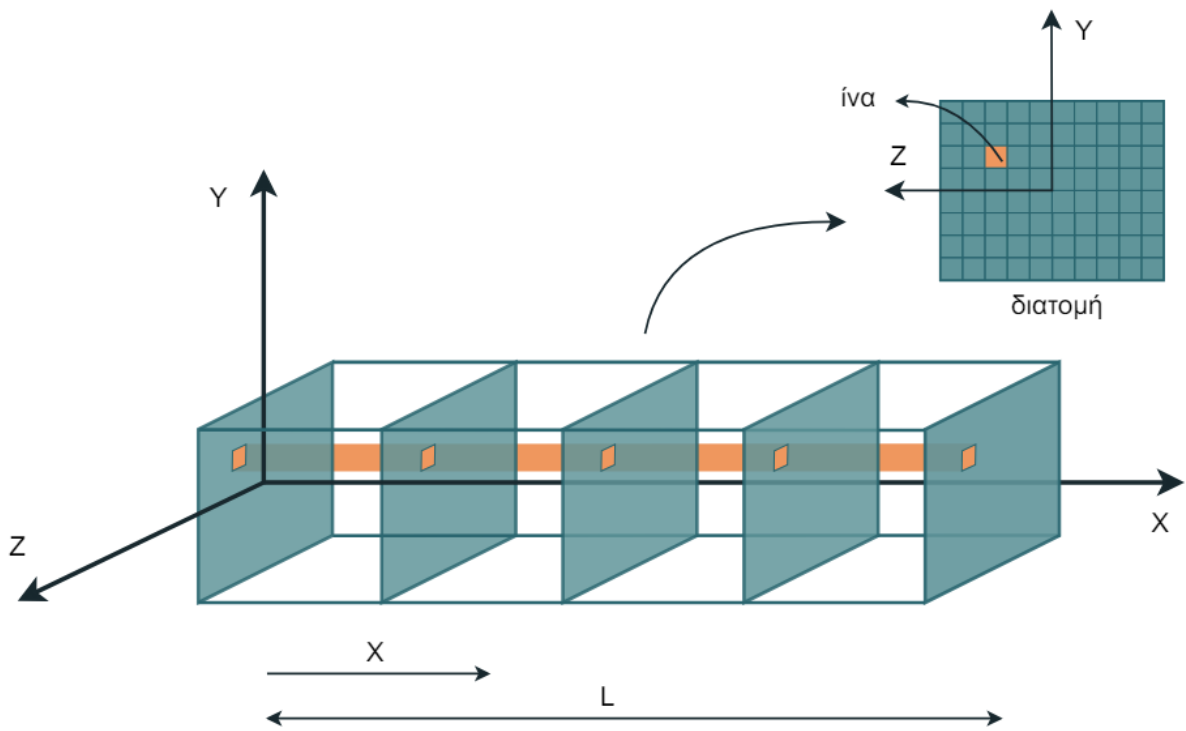
Σχήμα 10: Στοιχείο δοκού με συγκεντρωμένη πλαστικότητα

### 3.3.2 Στοιχεία δοκού με κατανεμημένη πλαστικότητα (πολυστρωματική θεώρηση)

Μία ακριβέστερη μέθοδος προσομοίωσης είναι η κατανομή της μη γραμμικότητας κατά μήκος των μελών με τη χρήση διακριτοποιημένων στοιχείων δοκού. Σε αυτή την περίπτωση κάθε στοιχείο διαιρείται σε ένα συγκεκριμένο αριθμό διατομών και κάθε μία από αυτές τοποθετείται σε ένα σημείο αριθμητικής ολοκλήρωσης του στοιχείου. Οι διατομές διαιρούνται σε ίνες παράλληλες με τον διαμήκη άξονα του στοιχείου, έτσι ώστε να ληφθεί υπόψη η μεταβολή των χαρακτηριστικών των διατομών κατά μήκος του στοιχείου (βλ. σχήμα 11). Επίσης, γίνεται η θεώρηση ότι κάθε διατομή παραμένει επίπεδη και κάθετη στον διαμήκη άξονα του στοιχείου κατά την παραμόρφωση του. Επομένως, όλες οι τάσεις και οι εντάσεις αναπτύσσονται παράλληλα σε αυτόν [Enrico Spacone (1996)].

Σε αυτή την περίπτωση ο μη γραμμικός χαρακτήρας του στοιχείου απορρέει ολοκληρωτικά από τους καταστατικούς νόμους του υλικού. Η μη γραμμικότητα του υλικού εισέρχεται στην ανάλυση μέσα από τη σχέση τάσεων-παραμορφώσεων της κάθε ίνας των διατομών.

Η επιπεδότητα της διατομής είναι μία αποδεκτή προσέγγιση για μικρές παραμορφώσεις, αλλά δεν λαμβάνει υπόψη φαινόμενα όπως η ρηγματώση και η απώλεια συνάφειας μεταξύ του σκυροδέματος και του χάλυβα των στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος [Enrico Spacone (1996)]. Παρόλα αυτά, τα στοιχεία δοκού με πολυστρωματική θεώρηση προσομοιώνουν με μεγαλύτερη λεπτομέρεια την πραγματική κατάσταση των διατομών κατά μήκος των στοιχείων. Μπορούν να αποδώσουν τοπικές συμπεριφορές των στοιχείων όπως τον τοπικό λυγισμό και τη μη γραμμική αλληλεπίδραση μεταξύ κάμψης και διάτμησης [Gregory G. Deierlein (2010)].



Σχήμα 11: Στοιχείο δοκού με κατανεμημένη πλαστικότητα





## Κεφάλαιο 4

# Αντισεισμικός σχεδιασμός και ανασχεδιασμός κατασκευών

### 4.1 Η φιλοσοφία του αντισεισμικού σχεδιασμού

Οι σεισμοί αποτελούν ένα σχετικά απρόβλεπτο φυσικό φαινόμενο που στη χώρα μας είναι βέβαιο ότι θα συμβεί επανειλημμένα κατά τη διάρκεια ζωής ενός έργου. Ο αντισεισμικός σχεδιασμός αναφέρεται στη σχεδίαση κατασκευών ικανών να αντιστέκονται στις σεισμικές δράσεις και έχει απώτερο σκοπό την διατήρηση της ασφάλειας της ανθρώπινης ζωής. Κατά τον αντισεισμικό σχεδιασμό εντοπίζονται τα σημεία της κατασκευής στα οποία εμφανίζονται βλάβες λόγω των σεισμικών φορτίων και πραγματοποιείται η κατάλληλη ενίσχυσή τους. Με τον τρόπο αυτό, διασφαλίζεται η όλκιμη συμπεριφορά της κατασκευής σε περίπτωση αστοχίας των μελών της υπό την επίδραση μίας πιθανής σεισμικής δράσης.

Το φαινόμενο του σεισμού παρουσιάζει έναν έντονα τυχηματικό χαρακτήρα. Η ένταση των σεισμικών επιταχύνσεων, το περιεχόμενο των συχνοτήτων της σεισμικής διέγερσης και η διεύθυνση ενός σεισμού αποτελούν παράγοντες που καθορίζουν τη σεισμική απόκριση των κατασκευών, όμως είναι αδύνατο να προβλεφθούν. Παράλληλα, οι ιδιαίτερα υψηλές σεισμικές επιταχύνσεις έχουν μεγάλη περίοδο επαναφοράς και η πιθανότητα εκδήλωσής τους κατά τη συμβατική διάρκεια ζωής ενός έργου (π.χ. 50 χρόνια) είναι αρκετά μικρή [Αβραμίδης (2017)] (βλέπε: Πίνακα 4.2). Ταυτόχρονα, η δημιουργία κατασκευών με απόλυτη αντισεισμική προστασία είναι ανέφικτη και η απαίτηση οι κατασκευές να συμπεριφέρονται ελαστικά στο σεισμό, δηλαδή χωρίς να εμφανίζουν βλάβες, οδηγεί σε αντιοικονομικά έργα.

Για τους λόγους αυτούς η φιλοσοφία του αντισεισμικού σχεδιασμού επικεντρώνεται στην επίτευξη μίας ισορροπίας μεταξύ των κριτηρίων που σχετίζονται με την οικονομία και την ασφάλεια των κατασκευών. Είναι περισσότερο ρεαλιστικό οι κατασκευές να σχεδιάζονται για να συμπεριφέρονται ανελαστικά κατά το σεισμό σχεδιασμού τους [Φραγκιαδάκης (2020)].

Περίοδος επαναφοράς (έτη)	Πιθανότητα υπέρβασης σεισμικής δράσης εντός του συμβατικού χρόνου ζωής των 50 ετών	$a_g/a_{g,ref}$
2475	2%	1.80
975	5%	1.30
<b>475</b>	<b>10%</b>	<b>1.00</b>
225	20%	0.75
135	30%	0.60
<b>70</b>	<b>50%</b>	<b>0.45</b>
40	70%	0.35
20	90%	0.25
$\leq 20$	$\geq 90\%$	$\leq 0.25$

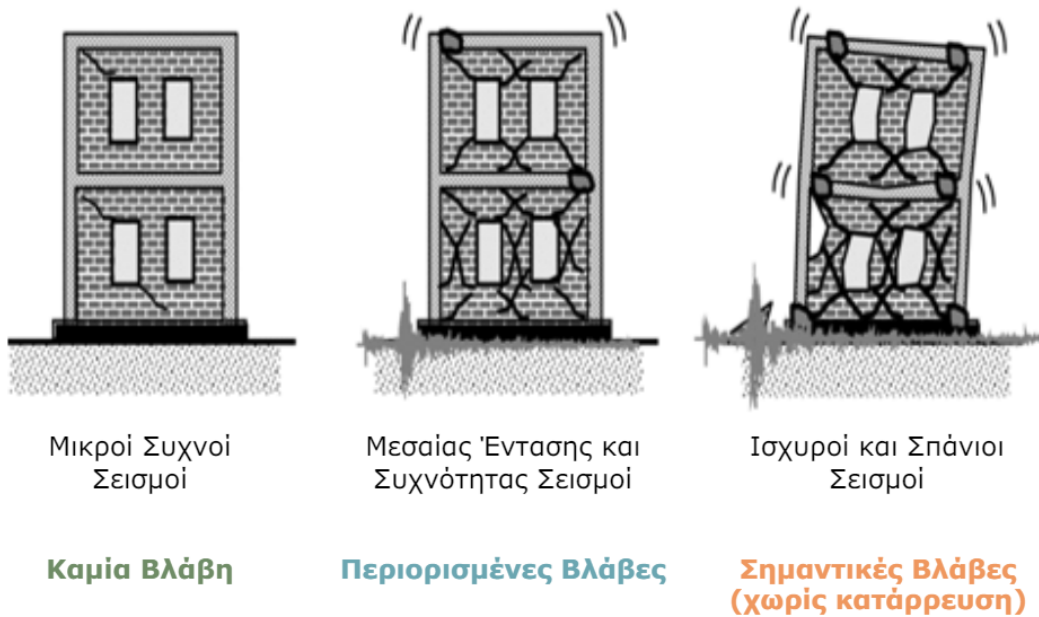
Πίνακας 4.1: Ενδεικτική συσχέτιση περιόδου επαναφοράς και πιθανότητας υπέρβασης της σεισμικής δράσης με την αντίστοιχη ανηγμένη οριζόντια εδαφική επιτάχυνση.

Γίνεται αποδεκτή η εμφάνιση ελεγχόμενων βλαβών. Η αποδοχή των βλαβών συνεπάγεται την εκμετάλλευση της διαθέσιμης πλαστιμότητας της κατασκευής για την παραλαβή της σεισμικής ενέργειας. Οι ενδεχόμενες βλάβες πρέπει να είναι περιορισμένες, επιδιορθώσιμες και να μην απειλούν την ανθρώπινη ζωή [Ο.Α.Σ.Π. (2022)]. Ο βαθμός των επιτρεπόμενων ανελαστικών παραμορφώσεων οφείλει να επιλέγεται σύμφωνα με τη σημαντικότητα της χρήσης των κατασκευών.

Οι σύγχρονοι αντισεισμικοί κανονισμοί στοχεύουν στην πρόβλεψη της απόκρισης των κατασκευών και τον υπολογισμό των παραμορφώσεων που πρόκειται να αναπτύξουν κατά τη σεισμική δράση. Οι κατασκευές θα πρέπει να παραμένουν ελαστικές για μικρής έντασης σεισμούς, να εμφανίζουν μικρές βλάβες σε μη φέροντα στοιχεία στους σεισμούς μέσης έντασης και σε περίπτωση ισχυρών σεισμών (σεισμοί σχεδιασμού) η πιθανότητα κατάρρευσής τους να είναι επαρκώς μικρή.

## 4.2 Σχεδιασμός με βάση τις επιτελεστικότητες

Ο αντισεισμικός σχεδιασμός με βάση την επιτελεστικότητα, ή αλλιώς σχεδιασμός σε όρους παραμορφώσεων, αποβλέπει στην επίτευξη της επιθυμητής συμπεριφοράς των νέων ή των υφιστάμενων κατασκευών υπό την επίδραση πιθανών σεισμών [Τομπουλίδης (2018)]. Η συμπεριφορά αυτή αξιολογείται ανάλογα με το πλήθος, το μέγεθος και τις επιπτώσεις των αστοχιών που μπορεί να παρουσιαστούν σε μία κατασκευή εξαιτίας κάποιας σεισμικής διέγερσης. Δηλαδή, κατά τη μέθοδο αυτή, επιλέγεται εξαρχής η επιθυμητή συμπεριφορά της κατασκευής για κάποιο επίπεδο σεισμικής έντασης και ο σχεδιασμός γίνεται έτσι ώστε να ικανοποιεί τον στόχο που τέθηκε.

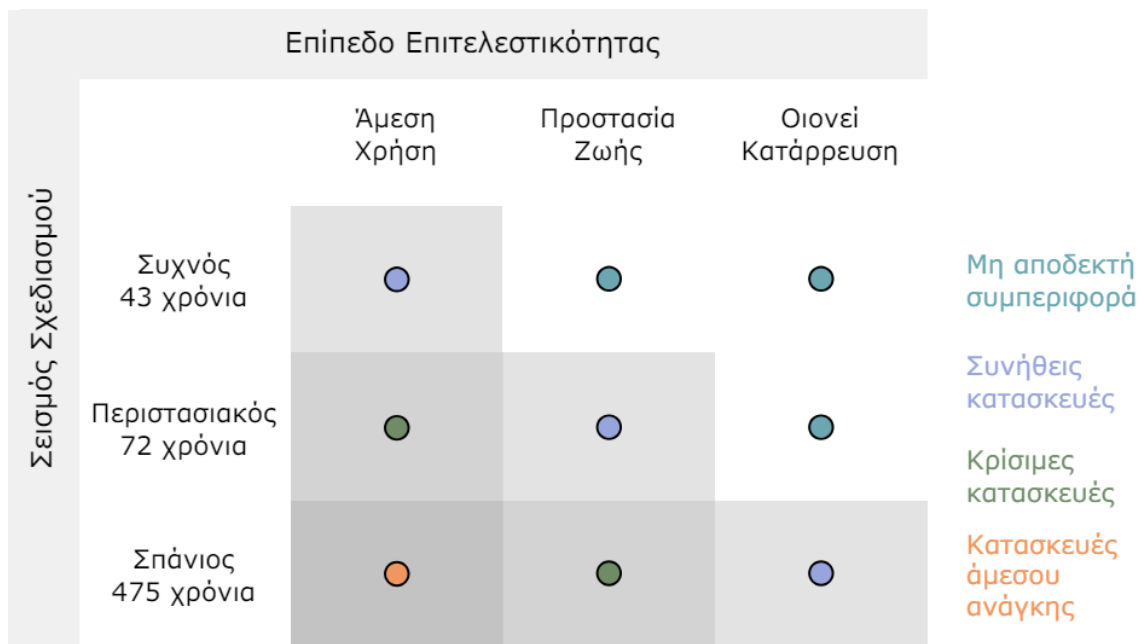


Σχήμα 12: Η επιθυμητή συμπεριφορά των κατασκευών υπό την επίδραση σεισμών διαφορετικής έντασης

Για την εξυπηρέτηση των ευρύτερων κοινωνικό-οικονομικών αναγκών, θεσπίζονται διάφορες «στάθμες επιτελεστικότητας» (στοχευόμενες συμπεριφορές) υπό δεδομένους αντίστοιχους σεισμούς σχεδιασμού. Ανάλογα με το επίπεδο του σεισμού και τη σημαντικότητα του κτηρίου ορίζεται και το αποδεκτό επίπεδο βλάβης. Παραδείγματος χάριν, στην περίπτωση σχεδιασμού δύο πανομοιότυπων κτιρίων όπου το ένα πρόκειται να στεγάζει κάποια υπηρεσία ζωτικής σημασίας (π.χ. νοσοκομείο), ενώ το δεύτερο είναι μικρότερης σπουδαιότητας κτίριο (π.χ. αποθήκη) οι στόχοι σχεδιασμού θα είναι διαφορετικοί. Το πρώτο κτήριο απαιτείται να παραμείνει σε πλήρη λειτουργία ακόμα και υπό τη δράση ενός ισχυρού σεισμού, εφόσον είναι ζωτικής σημασίας για το κοινωνικό σύνολο, ενώ για το δεύτερο δεν υπάρχει αντίστοιχη απαίτηση, καθώς θα οδηγούσε σε αντιοικονομική λύση.

Στους σύγχρονους κανονισμούς η επιτελεστικότητα εκφράζεται σε όρους διακριτών σταθμών επιτελεστικότητας ανάλογα με το βαθμό βλάβης του φέροντος οργανισμού. Συγκεκριμένα στον Κανονισμό Επεμβάσεων (ΚΑΝ.ΕΠΕ.) ορίζονται οι εξής στάθμες επιτελεστικότητας [Ο.Α.Σ.Π. (2022)]:

- Περιορισμένες βλάβες (Α): Ο φέρων οργανισμός του κτιρίου έχει υποστεί μόνο ελαφριές βλάβες, με τα δομικά στοιχεία να μην έχουν διαρρεύσει σε σημαντικό βαθμό και να διατηρούν την αντοχή και δυσκαμψία τους. Οι μόνιμες σχετικές μετακινήσεις ορόφων είναι αμελητέες.
- Σημαντικές βλάβες (Β): Ο φέρων οργανισμός του κτιρίου έχει υποστεί σημαντικές



Σχήμα 13: Επιτρεπτά επίπεδα βλάβης ανάλογα με τη σπουδαιότητα της κατασκευής και την περίοδο επαναφοράς του σεισμού

και εκτεταμένες αλλά επισκευάσιμες βλάβες, ενώ τα δομικά στοιχεία διαθέτουν εναπομένονσα αντοχή και δυσκαμψία και είναι σε θέση να παραλάβουν τα προβλεπόμενα κατακόρυφα φορτία. Οι μόνιμες σχετικές μετακινήσεις ορόφων είναι μετρίου μεγέθους. Ο φέρων οργανισμός μπορεί να αντέξει μετασεισμικούς μέτριας έντασης

- Οιονεί κατάρρευση (Γ): Ο φέρων οργανισμός του κτιρίου έχει υποστεί εκτεταμένες και σοβαρές ή βαριές (μη επισκευάσιμες κατά πλειονότητα) βλάβες. Οι μόνιμες σχετικές μετακινήσεις ορόφων είναι μεγάλες. Ο φέρων οργανισμός έχει ακόμη την ικανότητα να φέρει τα προβλεπόμενα κατακόρυφα φορτία (κατά, και για ένα διάστημα μετά, τον σεισμό), χωρίς πάντως να διαθέτει άλλο ουσιαστικό περιθώριο ασφαλείας έναντι ολικής ή μερικής κατάρρευσης, ακόμη και για μετασεισμικούς μέτριας έντασης.

Πιθανότητα υπέρβασης σεισμικής δράσης εντός του συμβατικού χρόνου ζωής των 50 ετών	Στάθμη επιτελεστικότητας φέροντος οργανισμού		
	Άμεση Χρήση μετά το σεισμό	Προστασία ζωής	Αποφυγή οιονεί κατάρρευσης
10%	A1	B1	Γ1
50%	A2	B2	Γ2

Πίνακας 4.2: Στόχοι αποτίμησης ή Ανασχεδιασμού (στάθμες επιτελεστικότητας) ΚΑΝ.ΕΠΕ.

Η επίτευξη ενός στόχου σχεδιασμού καθορίζεται μέσω των κριτηρίων επιτελεστικότητας της αντίστοιχης στάθμης σχεδιασμού. Δηλαδή, γίνεται σύγκριση του μεγέθους των βλαβών που

αναπτύσσονται στην κατασκευή λόγω της εξεταζόμενης σεισμικής διέγερσης σε σχέση με το αποδεκτό όριο των βλαβών για την επιλεγμένη στάθμη επιτελεστικότητας της κατασκευής. Σε περίπτωση που οι αναπτυσσόμενες βλάβες είναι μεγαλύτερες από τις επιτρεπτές ο στόχος σχεδιασμού δεν ικανοποιείται και τότε θα πρέπει να γίνει ανασχεδιασμός ή ενίσχυση του φορέα.

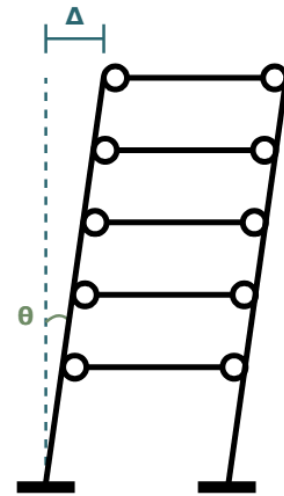
Είναι πιθανό ένα ή περισσότερα μέλη της κατασκευής να μην πληροί τα κριτήρια επιτελεστικότητας της στάθμης για την οποία σχεδιάζεται ή αποτιμάται μία κατασκευή. Για παράδειγμα, αυτό συμβαίνει στην περίπτωση που ένα ή περισσότερα από τα στοιχεία της κατασκευής ξεπερνούν την επιτρεπόμενη παραμόρφωση του επιπέδου επιτελεστικότητας της στάθμης για την οποία ελέγχεται ο σχεδιασμός της κατασκευής. Στην περίπτωση αυτή ο στόχος σχεδιασμού δεν ικανοποιείται. Σύμφωνα με αυτή την αρχή, η υπέρβαση των ορίων του σχεδιασμού ακόμα και σε ένα μόνο μέλος του φορέα συνεπάγεται την μη εκπλήρωση του στόχου σχεδιασμού ολόκληρου του φορέα. Στην πραγματικότητα όμως, η υπέρβαση των επιτρεπόμενων ορίων σε ένα μόνο μέλος (ή και σε περισσότερα) δε σημαίνει απαραίτητα την αστοχία του φορέα ως σύνολο. Η απαίτηση να πληρούν όλα τα μέλη τα κριτήρια επιτελεστικότητας της στάθμης σχεδιασμού της κατασκευής οδηγεί σε αντιοικονομικό σχεδιασμό. Για το λόγο αυτό, οι κανονισμοί παρέχουν υπό προϋποθέσεις τη δυνατότητα διαχωρισμού των μελών των φορέων σε πρωτεύοντα και δευτερεύοντα σεισμικά μέλη. Τα δευτερεύοντα μέλη, σε αντίθεση με τα πρωτεύοντα, αντιμετωπίζονται με πιο ευνοϊκούς όρους και επιτρέπεται να αναπτύξουν μεγαλύτερες ανελαστικές παραμορφώσεις [Ο.Α.Σ.Π. (2022)], αφού δεν είναι καθοριστικά για την επίτευξη του στόχου σχεδιασμού του φορέα.

Ο σχεδιασμός με βάση την επιτελεστικότητα γίνεται με τις μεθόδους της μη γραμμικής ανάλυσης. Η ανελαστική ανάλυση μπορεί να είναι είτε στατική (Pushover), είτε δυναμική (ολοκλήρωση χρονιστορίας). Στην παρούσα εργασία θα γίνει η χρήση της στατικής ανελαστικής ανάλυσης, καθώς απαιτεί απλούστερους υπολογισμούς και είναι η πλέον χρησιμοποιούμενη μέθοδος [Τομπουλίδης (2018)].

### 4.3 Στατική ανελαστική ανάλυση (Pushover)

Η στατική ανελαστική ανάλυση (Pushover Analysis) είναι μία στατική διαδικασία που χρησιμοποιεί μια απλοποιημένη μη γραμμική τεχνική για την εκτίμηση των παραμορφώσεων μίας κατασκευής υπό την επίδραση σεισμικών φορτίων. Ο όρος «μη γραμμική» αναφέρεται στις σχέσεις τάσεων-παραμορφώσεων ( $\sigma$ - $\epsilon$ ) των υλικών των διατομών. Κύριος στόχος της ανελαστικής στατικής ανάλυσης είναι η εκτίμηση του μεγέθους των ανελαστικών παραμορφώσεων που αναπτύσσονται στα δομικά στοιχεία μίας κατασκευής κατά τη σεισμική δράση για την οποία γίνεται η αποτίμηση ή ο ανασχεδιασμός της.

Οι κατασκευές κατά τη διάρκεια των σεισμών παραμορφώνονται και ορισμένα από τα μέλη τους αστοχούν ή διαρρέουν με αποτέλεσμα το φορτίο τους να μεταβιβάζεται στα υπόλοιπα μέλη. Η στατική ανελαστική ανάλυση προσπαθεί να προσομοιώσει την ιδιότητα της κατασκευής να ανακατανέμει τα φορτία που της ασκούνται κατά τη διάρκεια των σεισμικών φαινομένων. Κατά την ανάλυση εφαρμόζεται στην κατασκευή ένα σταδιακά προσαυξανόμενο οριζόντιο φορτίο. Σκοπός είναι να ανιχνευτούν τα αδύναμα σημεία του φορέα, δηλαδή οι κρίσιμες διατομές στις οποίες παρατηρείται υπέρβαση του ορίου διαρροής των υλικών (πλαστικοποίηση). Σε κάθε βήμα της ανάλυσης το φορτίο αυξάνεται και το μοντέλο της κατασκευής ενημερώνεται σχετικά με τις αστοχίες (πλαστικές αρθρώσεις) που αυτό επιφέρει στην κατασκευή. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται μέχρι να διαρρεύσει το σύνολο των μελών της κατασκευής ή μέχρι να επιτευχθεί κάποια μετακίνηση στόχος του κόμβου ελέγχου της κατασκευής (κέντρο βάρους ανώτατου ορόφου).

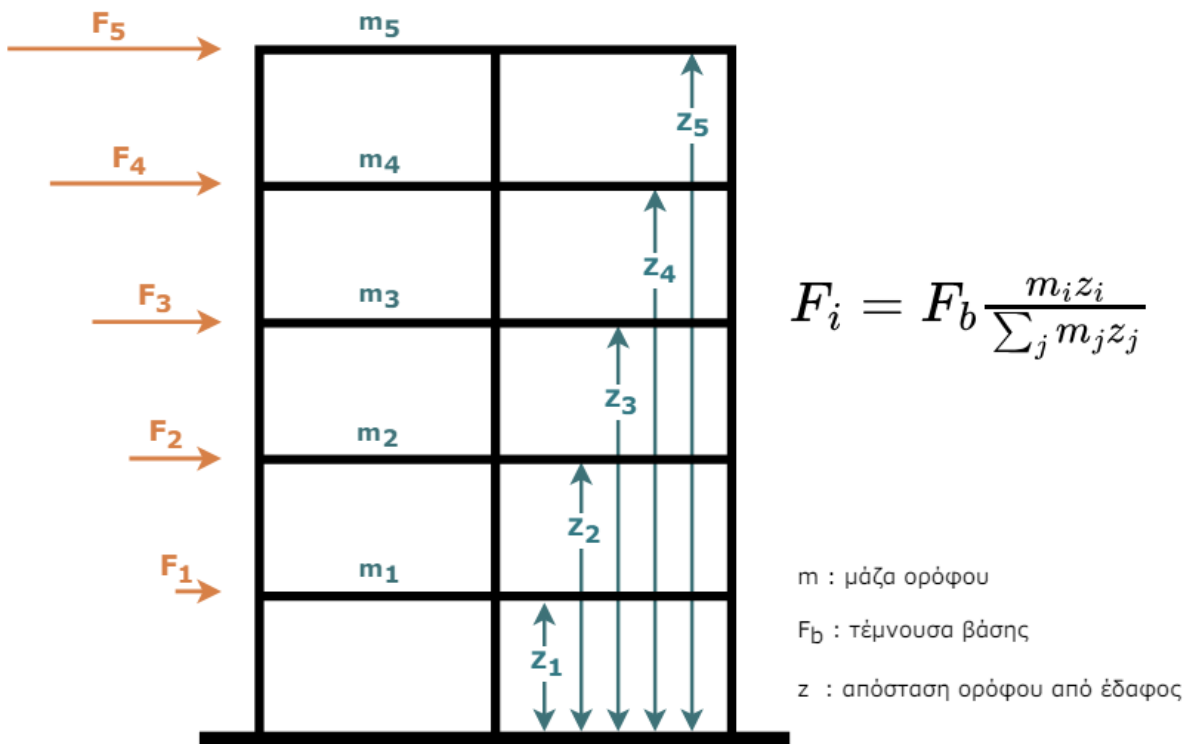


Σχήμα 14: Στοχευόμενη μετακίνηση

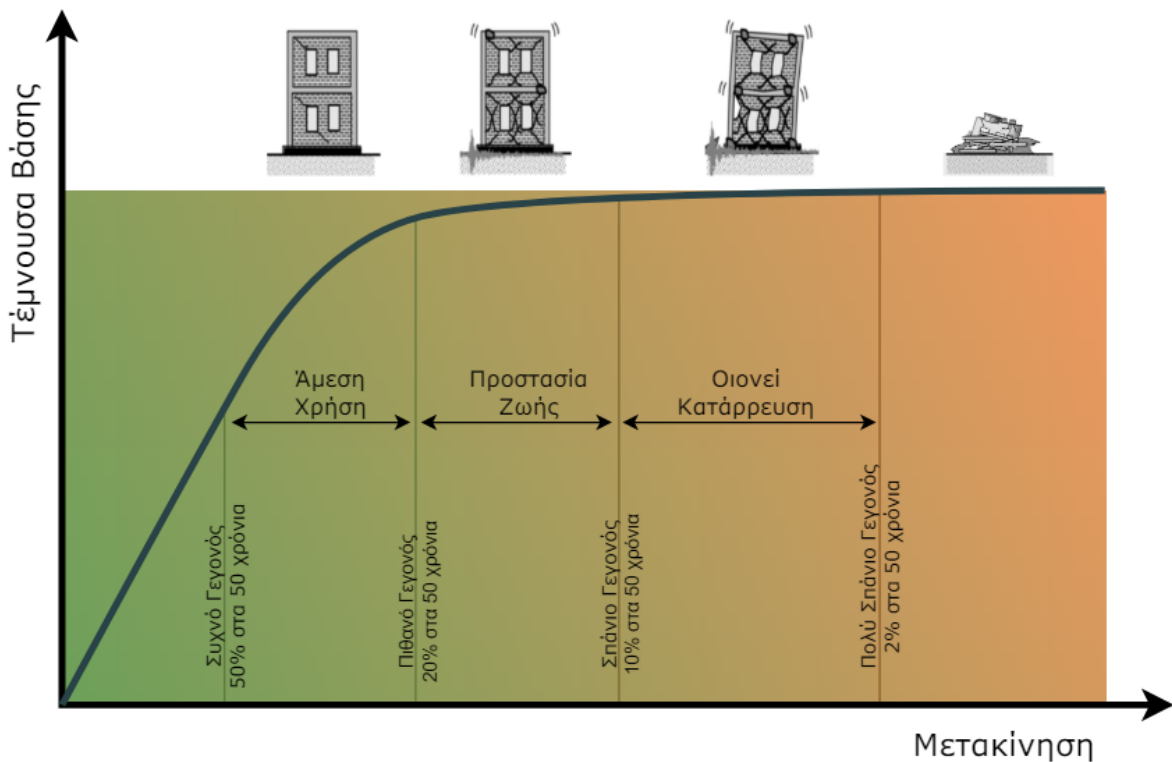
Η ανάλυση γίνεται υπό την δράση σταθερών φορτίων βαρύτητας και μονοτονικά αυξανόμενου οριζόντιου φορτίου. Το οριζόντιο φορτίο έχει συγκεκριμένη κατανομή καθ' ύψος της κατασκευής και ασκείται στο κέντρο μάζας κάθε στάθμης της. Η κατανομή αυτή μπορεί να είναι τριγωνική (ή ιδιομορφική) ή ομοιόμορφη [Ο.Α.Σ.Π. (2022)]. Στην παρούσα εργασία ακολουθείται τριγωνική κατανομή του οριζόντιου σεισμικού φορτίου, η οποία ακολουθεί τη θεμελιώδη ιδιομορφή και φαίνεται στο σχήμα 15.

Το διάγραμμα που προκύπτει από το άθροισμα των οριζόντιων φορτίων (τέμνουσα βάσης) και την μετακίνηση του κόμβου ελέγχου σε κάθε βήμα της ανάλυσης αποτελεί την καμπύλη ικανότητας της κατασκευής. Κάθε σημείο της καμπύλης ικανότητας της κατασκευής αντιστοιχεί σε έναν διαφορετικό βαθμό βλάβης για κάθε μέλος της κατασκευής. Ανάλογα με το βαθμό βλάβης και τη σημαντικότητα του κάθε μέλους μπορεί να προσδιοριστεί και ο βαθμός βλάβης της κατασκευής (Σχήμα 16) [Φραγκιαδάκης (2020)].

Στο σχήμα 17 παρουσιάζεται διαγραμματικά η πορεία ροής της στατικής ανελαστικής ανάλυσης.

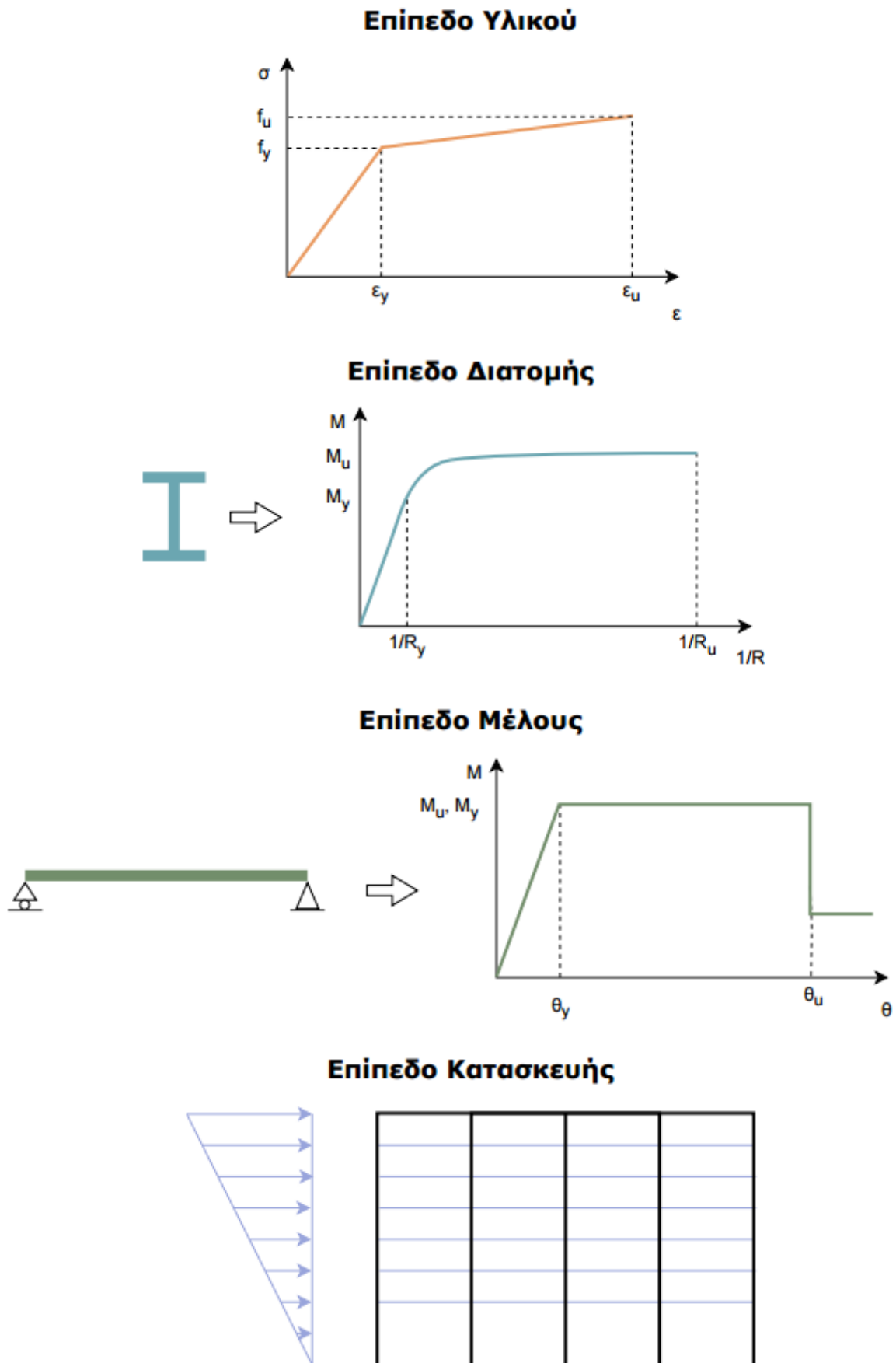


Σχήμα 15: Οριζόντια σεισμικά φορτία για άγνωστες τιμές των ιδιομορφών των ορόφων



Σχήμα 16: Καμπύλη ικανότητας της κατασκευής και βαθμός βλάβης στον οποίο αντιστοιχούν οι διάφορες θέσεις της





Σχήμα 17: Διαγραμματική ροή στατικής ανελαστικής ανάλυσης

# Κεφάλαιο 5

## Εξελικτικοί Αλγόριθμοι

### 5.1 Γενετικοί Αλγόριθμοι

Τα τελευταία έτη ο συνδυασμός της επιστήμης των υπολογιστών με άλλους κλάδους της επιστήμης έχει γεννήσει πολλές καινοτομίες σε διάφορα πεδία. Μία από τις καινοτομίες αυτές προέρχεται από το συνδυασμό της υπολογιστικής επιστήμης και της βιολογίας και αποτελείται από τους Γενετικούς Αλγορίθμους (Genetic Algorithms - GA). Οι Γενετικοί Αλγόριθμοι αποτελούν μία μέθοδο αναζήτησης βέλτιστων λύσεων εμπνευσμένη από τη θεωρία της Εξέλιξης των Ειδών (Evolution of Species) που αναπτύχθηκε στα μέσα του περασμένου αιώνα από τον Δαρβίνο. Έτσι, μιμούμενοι τη διαδικασία των φυσικών εξελικτικών διαδικασιών, είναι ευρέως διαδεδομένοι στην εύρεση καλών λύσεων σε προβλήματα βελτιστοποίησης και αναζήτησης [Παρούσης–Ορθοδόξου (2014)]. Η μετάλλαξη, ο ανασυνδυασμός (διασταύρωση) και η επιλογή αποτελούν τις κυριότερες λειτουργίες των Γενετικών Αλγορίθμων.

Ο Δαρβίνος μέσα από τη θεωρία του προσπαθεί να διερευνήσει το φαινόμενο της ζωής και της προέλευσής της και να εξηγήσει τις βασικές λειτουργίες της. Οι κύριες ιδέες της θεωρίας της Εξέλιξης των Ειδών που κέντρισαν το ενδιαφέρον του John Holland (1975), πρωτόπυρου των Γενετικών Αλγορίθμων, και τον ενέπνευσαν στην ανάπτυξη αλγορίθμων για την επίλυση δύσκολων προβλημάτων για υπολογιστές είναι οι ακόλουθες [Παρούσης–Ορθοδόξου (2014)]:

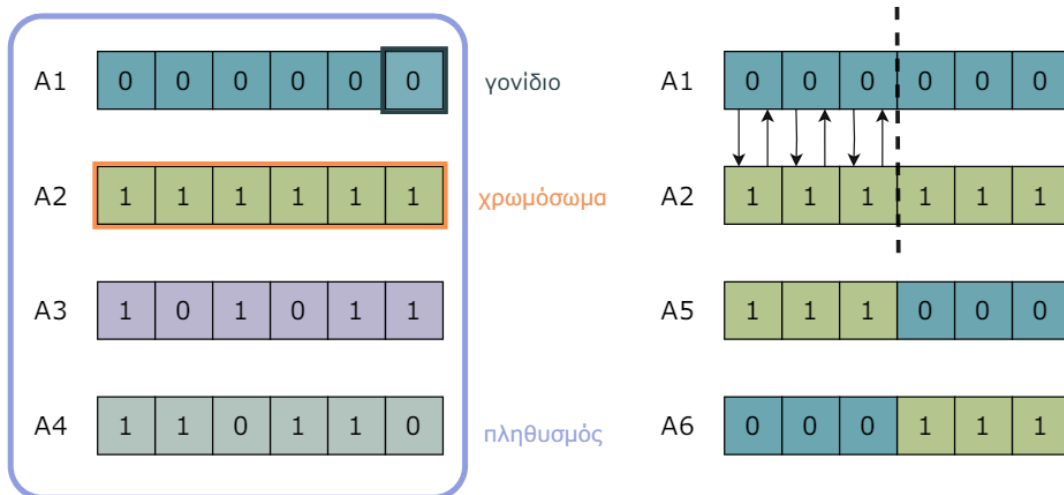
- Οι ζωντανοί οργανισμοί κάθε είδους δεν διαχωρίζονται σε ανώτερους και κατώτερους σύμφωνα με κάποια αντικειμενική βάση. Ανάλογα με το πλήθος των απογόνων κάθε ατόμου τα χαρακτηριστικά του μεταβιβάζονται περισσότερο ή λιγότερο στην επόμενη γενιά. Ανάλογα με την προσαρμογή τους στις συνθήκες του περιβάλλοντος οι οργανισμοί κατορθώνουν να επιβιώσουν και να πολλαπλασιαστούν. Έτσι, ανάλογα με τις συνθήκες διαβίωσης, αλλάζουν και τα χαρακτηριστικά των οργανισμών, ώστε να καταφέρνουν να επιβιώνουν.

- Οι αλλαγές των οργανισμών προκύπτουν από αλλαγές στα χρωμοσώματά (chromosomes) τους. Τα χρωμοσώματα αποτελούνται από τα γονίδια (genes) τα οποία περιέχουν κωδικοποιημένο το σύνολο της γενετικής πληροφορίας που ονομάζεται γονότυπος (genotype). Για τη δημιουργία ενός νέου οργανισμού γίνεται αποκωδικοποίηση των χρωμοσωμάτων και το σύνολο των ορατών χαρακτηριστικών και της συμπεριφοράς του, τα οποία καθορίζονται από τις πληροφορίες των γονιδίων, ονομάζεται φαινότυπος (phenotype).
- Βασικές λειτουργίες της εξέλιξης των ειδών αποτελούν η αναπαραγωγή και η μετάλλαξη (mutation). Η μετάλλαξη είναι η αλλαγή της δομής των χρωμοσωμάτων με τυχαίο τρόπο και έχει ως άμεσο αποτέλεσμα την αλλαγή κάποιου χαρακτηριστικού των οργανισμών. Η μετάλλαξη μπορεί να προκαλέσει βελτίωση ή υποβάθμιση των οργανισμών και συνήθως προέρχεται από λανθασμένη αντιγραφή των βιολογικών μορίων ή από εξωγενείς παράγοντες (π.χ. ακτινοβολία).
- Μέσα από την αναπαραγωγή δημιουργείται ένας νέος οργανισμός. Τα χρωμοσώματα αυτού του οργανισμού αποτελούνται από τα γονίδια των γονιών του. Μισά από τα γονίδια προέρχονται από τον ένα γονέα και μισά από τον άλλο, έτσι για κάθε χαρακτηριστικό του ο νέος οργανισμός έχει ένα γονίδιο από κάθε γονέα. Τα γονίδια που επηρεάζουν συγκεκριμένα χαρακτηριστικά γνωρίσματα του ατόμου βρίσκονται και σε συγκεκριμένες θέσεις του χρωματοσώματος που λέγονται τόποι (loci). Ορισμένες φορές τα γονίδια αυτά συμφωνούν μεταξύ τους για το χαρακτηριστικό που θα μεταβιβάσουν στον απόγονο, ενώ άλλοτε διαφωνούν και κυριαρχεί η τιμή του ενός γονιδίου, ενώ η άλλη αγνοείται, όμως μπορεί να μεταβιβαστεί σε επόμενες γενιές. Τα γονίδια που είναι υπεύθυνα για κάποιο συγκεκριμένο χαρακτηριστικό καλούνται αλληλόμορφα (alleles), το γονίδιο που καθορίζει το χαρακτηριστικό που επικρατεί ονομάζεται επικρατές (dominant) και το άλλο υπολειπόμενο (recessive).

Σε αντιστοιχία με τους έμβιους οργανισμούς στους Γενετικούς Αλγόριθμους αναφερόμαστε στα άτομα που συγκροτούν ένα πληθυσμό. Συνήθως, τα άτομα στους γενετικούς αλγορίθμους αποτελούνται από ένα μόνο χρωμόσωμα και τα στοιχεία που αποτελούν το χρωμόσωμα αυτό είναι διατεταγμένα σε μία γραμμική ακολουθία [Τριανταφύλλου (2006)]. Κάθε γονότυπος αναπαριστά μία πιθανή λύση σε κάποιο πρόβλημα. Ο φαινότυπος, δηλαδή το μεταφρασμένο περιεχόμενο ενός χρωμοσώματος, καθορίζεται από το χρήστη σύμφωνα με τις ανάγκες και τις απαιτήσεις του. Η διαδικασία της εξέλιξης ενός πληθυσμού χρωμοσωμάτων αντιστοιχεί σε μία εκτενή αναζήτηση πιθανής λύσης μέσα σε ένα χώρο. Απαραίτητη προϋπόθεση για την εύρεση λύσης είναι η καλή εξερεύνηση όλου του χώρου και η εξισορρόπηση της εκμετάλλευσης και της διατήρησης των καλύτερων λύσεων. Σε κάθε βήμα της εξέλιξης οι σχετικά καλές λύσεις αναπαράγονται, ενώ οι σχετικά κακές αφαιρούνται από τον πληθυσμό. Ο διαχωρισμός και η αξιολόγηση των λύσεων που εντοπίζονται, γίνεται με

την βοήθεια μιας συνάρτησης ικανότητας (fitness function), η οποία παίζει το ρόλο του περιβάλλοντος μέσα στο οποίο εξελίσσεται ο πληθυσμός [Παρούσης–Ορθοδόξου (2014)].

Με λίγα λόγια ο αλγόριθμος ξεκινάει με ένα σύνολο λύσεων που συνιστούν τον πληθυσμό και στη συνέχεια με τη βοήθεια του υπολογιστή εκτελείται μία σειρά τυχαίων ανασυνδυασμών και μεταλλάξεων. Οι πιο ικανές λύσεις συνεχίζουν να εξελίσσονται και να ανασυνδυάζονται τυχαία μέχρι να επιβιώσουν οι βέλτιστες. Για να αναλύσουμε τη δομή ε-



Σχήμα 18: Οι λειτουργίες των γενετικών αλγορίθμων

νός απλού γενετικού αλγορίθμου λαμβάνουμε υπόψη ότι σε κάθε επανάληψη  $t$  ο αλγόριθμος διατηρεί ένα πληθυσμό από πιθανές λύσεις, οι οποίες αναπαριστώνται ως:

$$P(t) = \{x_1^t, x_2^t, \dots, x_n^t\} \quad 5.1.1$$

Κάθε λύση  $x_i^t$  αξιολογείται με βάση τη συνάρτηση ικανότητας και επιστρέφεται ένα μέτρο καταλληλότητας και ορθότητας της. Κατόπιν της ολοκλήρωσης της αποτίμησης όλων των στοιχείων του πληθυσμού, δημιουργείται ένας νέος πληθυσμός (επαναληπτική εκτέλεση  $t + 1$ ) που προκύπτει από την επιλογή των πιο κατάλληλων στοιχείων του πληθυσμού της προηγούμενης γενιάς. Κάποια στοιχεία του πληθυσμού υφίστανται αλλαγές μέσω της διαδικασίας της διασταύρωσης και της μετάλλαξης, σχηματίζοντας την επόμενη γενιά πιθανών λύσεων [Τριανταφύλλου (2006)].

Η επιλογή, η διασταύρωση και η μετάλλαξη αποτελούν τους τελεστές των Γενετικών Αλγορίθμων. Η επιλογή είναι ο τελεστής ο οποίος επιλέγει χρωμοσώματα στον πληθυσμό προς αναπαραγωγή. Όσο περισσότερο προσαρμόζει τα χρωμοσώματα (fitter), τόσο είναι πιο πιθανό να επιλεγεί προς αναπαραγωγή περισσότερες φορές. Η διασταύρωση (ή ανασυνδυασμός) επιλέγει τυχαία έναν τόπο (θέση) και ανταλλάσσει τις υπό-ακολουθίες πριν και

μετά από αυτόν τον τόπο μεταξύ δύο χρωμοσωμάτων για να παραγάγει δύο απογόνους. Για παράδειγμα οι ακολουθίες 1 0 0 0 1 0 0 και 1 1 1 1 1 1 1 μπορούν να διασταυρωθούν μετά την τρίτη θέση κάθε μίας και να δώσουν τους δύο απογόνους: 1 0 0 1 1 1 1 και 1 1 1 0 0 1 0 0. Ο τελεστής διασταύρωσης μιμείται χονδρικά το βιολογικό ανασυνδυασμό μεταξύ δύο απλοειδών (μονού χρωμοσώματος) οργανισμών. Ο τελευταίος τελεστής, η μετάλλαξη, αλλάζει τυχαία μερικά από τα ψηφία ενός χρωμοσώματος αφού εφαρμοστεί η διασταύρωση. Για παράδειγμα η ακολουθία 0 0 0 0 1 0 0 θα μπορούσε να μεταλλαχθεί στη δεύτερη θέση οπότε το αποτέλεσμα θα ήταν 0 1 0 0 0 1 0 0. Η μετάλλαξη μπορεί να λάβει χώρα σε κάθε θέση του χρωμοσώματος με κάποια πιθανότητα, που είναι συνήθως πολύ μικρή (λ.χ. 0.001) [Τριανταφύλλου (2006)].

Ο εξελικτικός κύκλος επαναλαμβάνεται μέχρις ότου φτάσουμε σε κάποιο επιθυμητό όριο (κριτήριο) τερματισμού. Το όριο αυτό μπορεί να είναι ο αριθμός των εξελικτικών κύκλων (υπολογιστικών τρεξιμάτων) ή το πλήθος των μεταβολών των ατόμων ανάμεσα στις διάφορες γενιές, ή τέλος μια προκαθορισμένη τιμή της συνάρτησης προσαρμογής. Περισσότερα όσον αφορά στην ανατομία ενός γενετικού αλγορίθμου βρίσκονται στην επόμενη παράγραφο [Παρούσης–Ορθοδόξου (2014)].

Οι Γενετικοί Αλγόριθμοι αποτελούν μια εντυπωσιακή και πρωτότυπη μεταφορά των μεθόδων της φύσης στα τεχνητά περιβάλλοντα και σε αντίθεση με τις περισσότερες μεθόδους αναζήτησης διατηρούν έναν πληθυσμό πιθανών λύσεων πάνω στον οποίο πειραματίζονται, δεν επεξεργάζονται μόνο ένα σημείο του χώρου αναζήτησης [Τριανταφύλλου (2006)].

## 5.2 Εισαγωγή στους Εξελικτικούς Αλγορίθμους

Οι Εξελικτικοί Αλγόριθμοι (Evolutionary Algorithms - EA) αποτελούν την ευρύτερη κατηγορία στην οποία ανήκουν οι Γενετικοί Αλγόριθμοι. Οι εξελικτικοί αλγόριθμοι χρησιμοποιούν μηχανισμούς εμπνευσμένους από την βιολογία και συνθέτονται από τους κανόνες της φυσικής επιλογής και της γενετικής. Τέτοιοι μηχανισμοί είναι η αναπαραγωγή, η μετάλλαξη (mutation), ο ανασυνδυασμός (recombination) και η επιλογή (selection). Ακολουθώντας το παράδειγμα της φύσης, οι Εξελικτικοί Αλγόριθμοι στοχεύουν στην αντιμετώπιση σύνθετων προβλημάτων, όπως είναι τα προβλήματα αναζήτησης λύσης και βελτιστοποίησης.

Οι εξελικτικοί αλγόριθμοι στην προσπάθεια εύρεσης λύσης σε κάποιο πρόβλημα χειρίζονται ένα σύνολο πιθανών λύσεων τις οποίες αξιολογούν μέχρι την εύρεση της βέλτιστης. Χάρη στη διερεύνηση ενός πλήθους πιθανών λύσεων σε κάθε επανάληψη είναι εφικτή η εύρεση ολικού ακροτάτου. Το σύνολο των πιθανών αυτών λύσεων αναπαριστά έναν πληθυσμό ατόμων (population). Σύμφωνα με το παράδειγμα της φύσης, η πιθανότητα επιβίωσης ενός

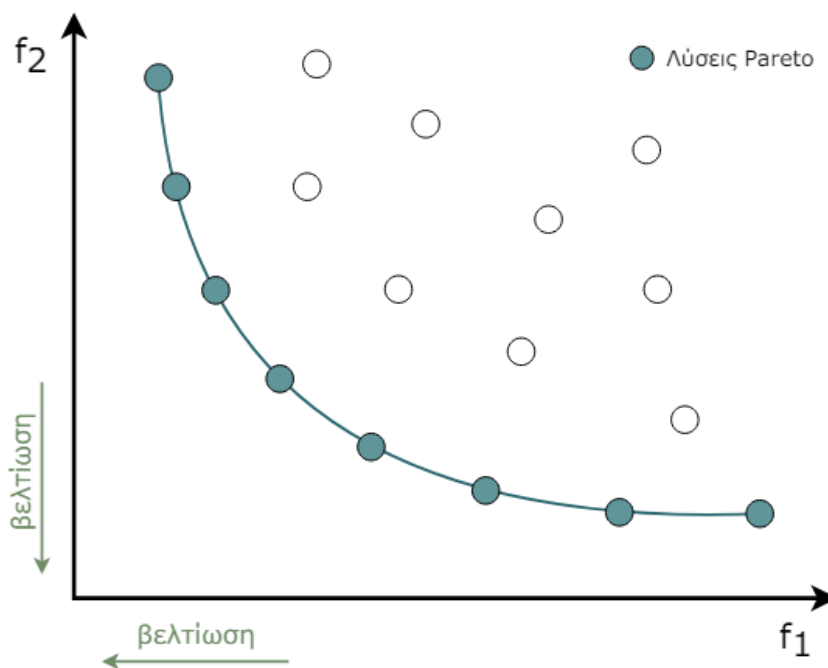
ατόμου του πληθυσμού εξαρτάται από το βαθμό προσαρμογής του στο περιβάλλον, δηλαδή στο πρόβλημα που επίκειται επίλυσης. Θεμελιώδης επιδίωξη των εξελικτικών αλγορίθμων είναι η μεγιστοποίηση της προσαρμογής του πληθυσμού του στο περιβάλλον ή αλλιώς της ευρωστίας (robustness) του συστήματος. Μία βέλτιστη λύση έχει μεγάλη ευρωστία όταν δεν είναι ευαίσθητη σε μικρές παραλλαγές των μεταβλητών σχεδιασμού και σε μικρές διακυμάνσεις των περιβαλλοντικών παραμέτρων. Συμπερασματικά, οι εξελικτικοί αλγόριθμοι επιδιώκουν ταυτόχρονα την ικανότητα επίλυσης συγκεκριμένων προβλημάτων και την επιβίωση της λύσης σε πολλά διαφορετικά περιβάλλοντα [Παρούσης–Ορθοδόξου (2014)].

Ο πληθυσμός των εξελικτικών αλγορίθμων εξελίσσεται με βάση ορισμένους κανόνες επιλογής (selection rules) και μηχανισμούς (operations), όπως αυτοί που αναφέρθηκαν παραπάνω. Κάθε άτομο του πληθυσμού αναπαριστά ένα σημείο στο χώρο των πιθανών λύσεων ενός προβλήματος. Το περιβάλλον του προβλήματος κωδικοποιείται σύμφωνα με κάποια συνάρτηση ικανότητας (fitness function) και κάθε άτομο διαθέτει μία ικανότητα (fitness) στο συγκεκριμένο περιβάλλον, η οποία του αντιστοιχείται σύμφωνα με κάποιο μέτρο. Κατά τη διαδικασία της επιλογής ο αλγόριθμος επιλέγει άτομα υψηλής ποιότητας σύμφωνα με τη διαθέσιμη πληροφορία. Η διαδικασία του ανασχεδιασμού και της μετάλλαξης αλλάζουν τη δομή των ατόμων και επιτρέπουν την περεταίρω διερεύνηση του χώρου. Αναλυτικότερα, ο ανασυνδυασμός επιτρέπει τη μίξη των χαρακτηριστικών που μεταφέρουν τα αρχικά άτομα στα επόμενα (όπως οι γονείς στους απογόνους τους), ενώ η μετάλλαξη εισάγει νέα στοιχεία στον πληθυσμό. Μέσω των παραπάνω μηχανισμών ο πληθυσμός εξελίσσεται προς διαδοχικά ικανοποιητικότερες περιοχές του χώρου αναζήτησης [Παρούσης–Ορθοδόξου (2014)]. Σύμφωνα με την ικανότητα που αποδίδει το περιβάλλον στα νέα σημεία αναζήτησης η διαδικασία της επιλογής ευνοεί τα ικανότερα άτομα του πληθυσμού να αναπαράγονται πιο συχνά από τα λιγότερο ικανά. Ο πληθυσμός εξελίσσεται μέχρι να βρεθεί μέσω ανασυνδυασμών, μεταλλάξεων και φυσικών επιλογών η πλέον ικανοποιητική λύση ενός προβλήματος.

Οι εξελικτικοί αλγόριθμοι κερδίζουν όλο και περισσότερο έδαφος στην επίλυση των προβλημάτων των μηχανικών αποτελώντας μία εφαρμογή των μεθόδων της φύσης σε τεχνητά προβλήματα. Τα προβλήματα του πολιτικού μηχανικού είναι πολυδιάστατα με ποικίλους τύπους μεταβλητών και πολλά σενάρια βελτιστοποίησης με πολλαπλούς περιορισμούς [Adam Slowik (2020)]. Για το λόγο αυτό είναι δύσκολο να βρεθεί μία απόλυτα βέλτιστη ομάδα παραμέτρων που να ικανοποιεί την αντικειμενική συνάρτηση. Από τις πιο κοινές προσεγγιστικές μεθόδους βελτιστοποίησης τέτοιου είδους προβλημάτων είναι μέσω των Γενετικών Αλγορίθμων (Genetic Algorithms).

### 5.3 Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-II (NSGA-II)

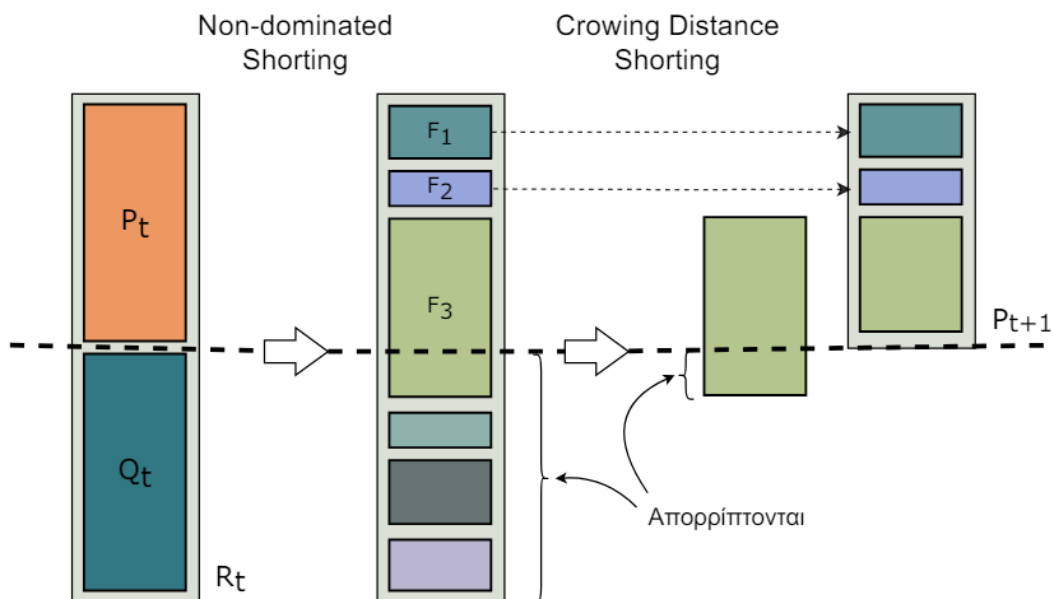
Ο Non-dominated Sorting Algorithm-II (NAGA-II) είναι ένας γενετικός αλγόριθμος που χρησιμοποιείται πολύ συχνά σε προβλήματα βελτιστοποίησης πολλαπλών κριτηρίων. Στόχος της διαδικασίας βελτιστοποίησης πολλαπλών κριτηρίων είναι η εύρεση λύσεων Pareto, δηλαδή λύσεων για τις οποίες δεν μπορεί να υπάρξει βελτιστοποίηση κάποιου κριτηρίου χωρίς να επηρεαστεί αρνητικά κάποιο άλλο [Rahmani (2014)]. Στο διάγραμμα του σχήματος 19 φαίνεται η απεικόνιση τέτοιων λύσεων όταν ζητούμενα της βελτιστοποίησης είναι ταυτόχρονα η μείωση του κριτηρίου  $X$  και του κριτηρίου  $Y$ .



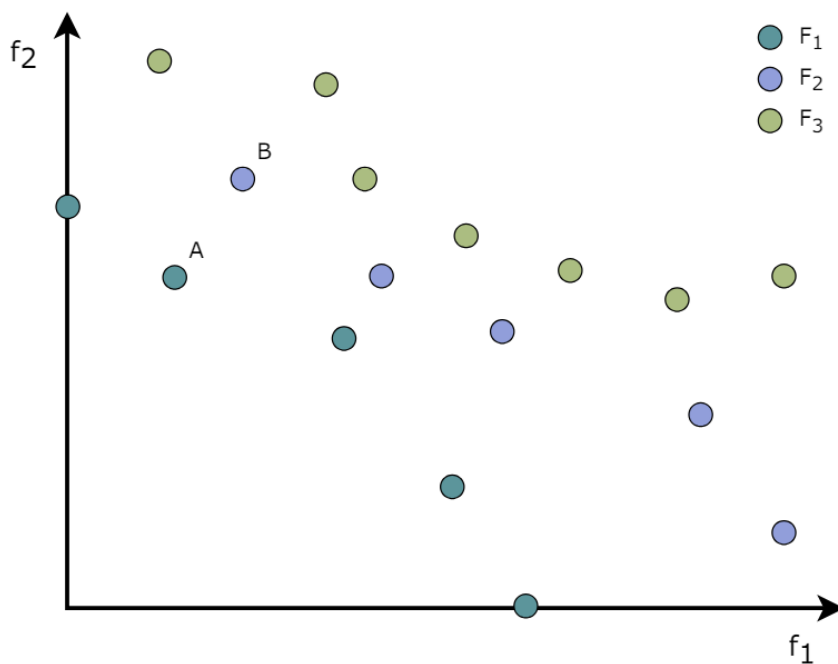
Σχήμα 19: Γραφική απεικόνιση των λύσεων Pareto

Η βασική επαναληπτική διαδικασία του NSGA-II αρχίζει με τον ορισμό ενός πληθυσμού ( $P_t$ ) διαφορετικών ατόμων. Μέσα από τη διαδικασία της διασταύρωσης και της μετάλλαξης, των αποδοτικότερων ατόμων του πληθυσμού αυτού προκύπτει ένας νέος πληθυσμός ( $Q_t$ ) που έχει ίδιο μέγεθος με τον αρχικό. Το σύνολο των δύο πληθυσμών συγκροτεί έναν τελικό πληθυσμό ( $R_t$ ) με μέγεθος διπλάσιο του αρχικού πληθυσμού ( $P_t$ ). Κάθε άτομο του τελικού πληθυσμού ( $R_t$ ) αξιολογείται σύμφωνα με μία συνάρτηση ικανότητας. Τα πιο ικανά άτομα συνθέτουν έναν νέο πληθυσμό ( $P_{t+1}$ ) με πλήθος ατόμων ίσο με τον αρχικό ( $P_t$ ) και η διαδικασία επαναλαμβάνεται για ένα συγκεκριμένο αριθμό επαναλήψεων ή έως ότου επιτευχθεί ο στόχος της βελτιστοποίησης.

Το πλήθος των ατόμων του πληθυσμού στο τέλος κάθε επανάληψης ( $P_{t+i}$ ) θα πρέπει να είναι ίσο με το πλήθος του αρχικού ( $P_t$ ). Όμως, υπάρχουν φορές τις οποίες εξίσου ικανά



Σχήμα 20: Διάγραμμα ροής του αλγόριθμου NSGA-II



Η λύση  $A(x_1, y_1)$  υπερταίρει της  $B(x_2, y_2)$  όταν :

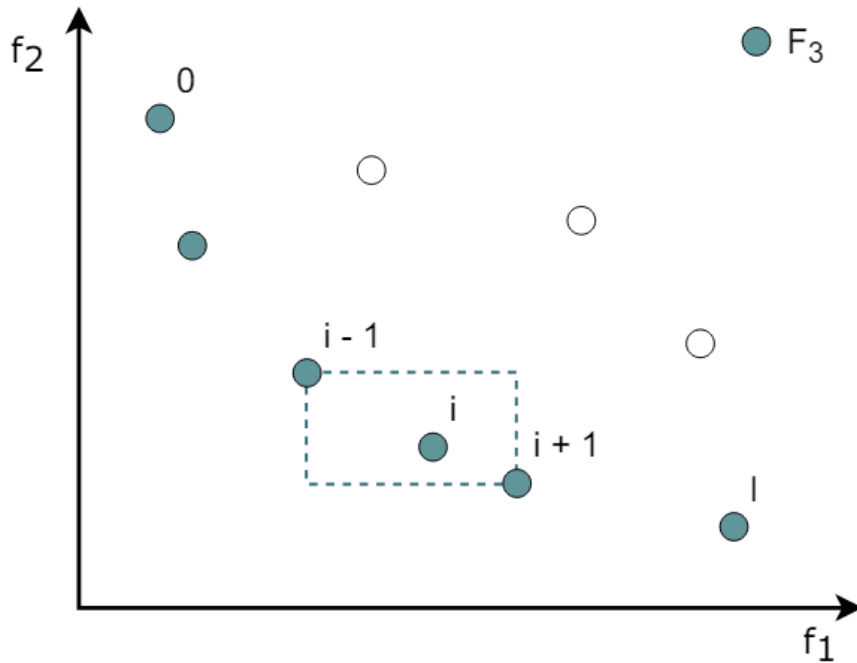
$$\{x_1 \leq x_2 \text{ και } y_1 \leq y_2\} \text{ και } \{x_1 < x_2 \text{ ή } y_1 < y_2\}$$

Σχήμα 21: Βασική διαδικασία διαλογής πληθυσμού

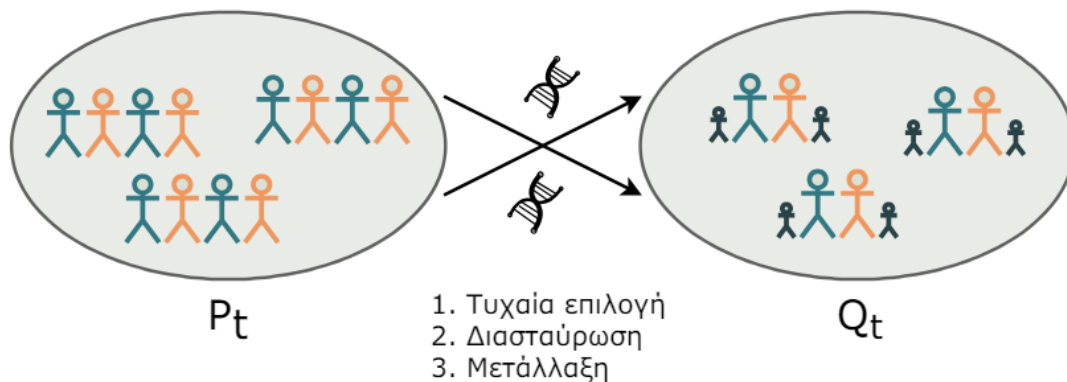
άτομα διεκδικούν μία θέση στον τελικό πληθυσμό κάποιας επανάληψης. Η επιλογή των ατόμων που δεν θα απορριφθούν και θα επιλεγθούν για τον τελικό πληθυσμό γίνεται μέσω μιας διαδικασίας διαλογής που ονομάζεται Crowding Distance Sorting. Η διαδικασία αυτή έχει στόχο τη διατήρηση της εξάπλωσης του πληθυσμού για την αποφυγή εύρεσης τοπικών ακροτάτων ή αλλιώς τη διατήρηση της ποικιλομορφίας στον πληθυσμό. Για να επιτευχθεί ο



σκοπός αυτός επιλέγονται οι λύσεις με τη μέγιστη μέση απόσταση από τις γειτονικές τους λύσεις (crowding distance-vector). Οι ακραίες λύσεις πρέπει να κρατιούνται σε κάθε γενιά και για το λόγο αυτό μέση απόσταση από τις γειτονικές τους θεωρείται άπειρη.

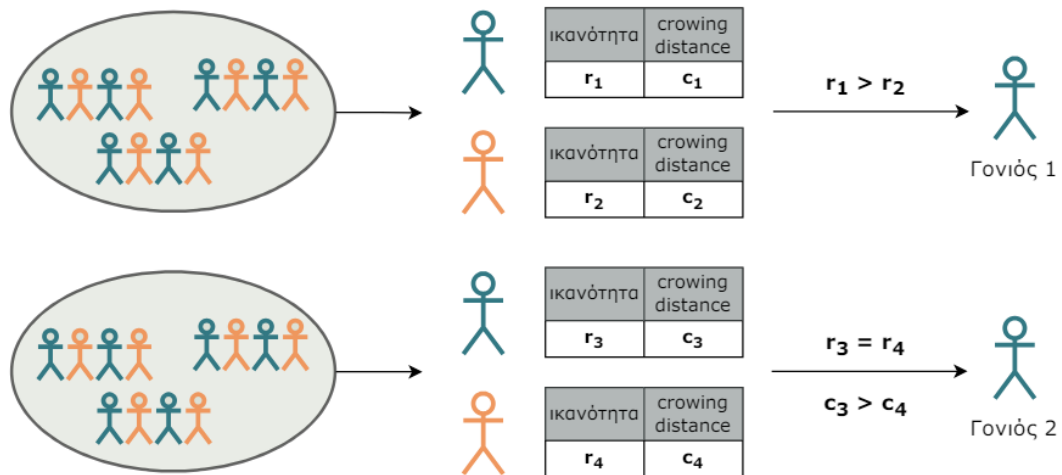


Σχήμα 22: Διαλογή Crowding Distance



Σχήμα 23: Δημιουργία του πληθυσμού  $Q_t$

Όπως έχει ήδη αναφερθεί ο NSGA-II είναι ο αλγόριθμος που χρησιμοποιείται από την τρέχουσα έκδοση του Optimo, που αποτελεί το εργαλείο βελτιστοποίησης πολλαπλών κριτηρίων του Dynamo.



Σχήμα 24: Επιλογή γονέων για τη δημιουργία απογόνων



# Κεφάλαιο 6

## Περιγραφή της εργασίας

### 6.1 Διάγραμμα ροής της εργασίας

Η πορεία ροής της εργασίας παρουσιάζεται διαγραμματικά στο σχήμα 25.

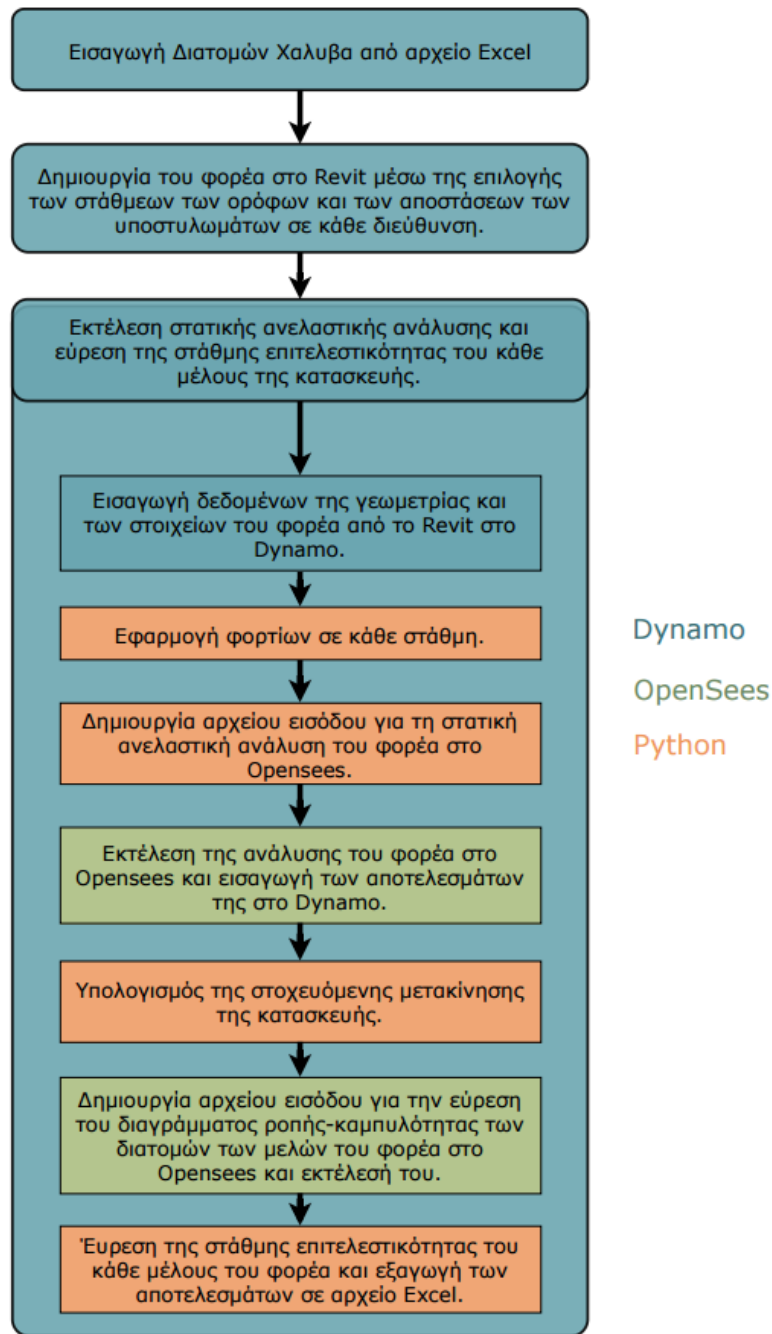
### 6.2 Περιγραφή της ροής της εργασίας

#### **Εισαγωγή διατομών χάλυβα από αρχείο Excel**

Σε αυτό το βήμα της εργασίας ο χρήστης επιλέγει το αρχείο Excel από το οποίο επιθυμεί να εισάγει στο Revit τις διατομές χάλυβα που θα εφαρμόσει στα μέλη της κατασκευής. Το αρχείο Excel θα πρέπει να ακολουθεί συγκεκριμένη δομή και μετρικό σύστημα, ώστε να είναι αναγνώσιμο και να υπάρχει ορθότητα στα αποτελέσματα της ανάλυσης (σχήμα ). Ο κώδικας δημιουργεί αντίγραφα ενός τύπου διατομής χάλυβα των οικογενειών του Revit για τα υποστυλώματα (structural column type) και για τις δοκούς (structural framing type). Ο τύπος των διατομών που αντιγράφονται - μία διατομή για τα υποστυλώματα και μία για τις δοκούς - για τη δημιουργία των νέων επιλέγεται εκ των προτέρων από το χρήστη και φορτώνεται (Load Family) στο περιβάλλον του Revit (π.χ. w10x33 και w12x26). Η εισαγωγή του αρχείου γίνεται μέσω παραθύρου γραφικής διεπαφής χρήστη και ο κώδικας μπορεί να εκτελεστεί μέσω του Dynamo Player, χωρίς δηλαδή να γίνει το άνοιγμα του αρχείου στο περιβάλλον γραφικού προγραμματισμού του Dynamo. Στο σχήμα φαίνεται ο κώδικας γραφικού προγραμματισμού που εκτελεί τα παραπάνω.

#### **Δημιουργία του παραμετρικού φορέα στο Revit**

Η δημιουργία του φορέα στο Revit γίνεται αυτόματα από το Dynamo επιλέγοντας τις βασικές παραμέτρους της κατασκευής. Οι παράμετροι αυτοί είναι οι στάθμες των ορόφων και οι αποστάσεις των υποστυλωμάτων σε κάθε διεύθυνση. Αρχικά εφαρμόζεται σε όλα τα στοιχεία κάθε οικογένειας του Revit μία συγκεκριμένη διατομή από αυτές που είναι φορ-



Σχήμα 25: Διάγραμμα ροής της βασικής διαδικασίας της παρούσας εργασίας

τωμένες στο Revit. Στη συνέχεια ο χρήστης μπορεί να επιλέξει συγκεκριμένη διατομή για κάθε μέλος του φορέα μέσα από το περιβάλλον του Revit. Η επιλογή των παραμέτρων του σχεδιασμού πραγματοποιείται μέσω γραφικού περιβάλλοντος χρήστη, συνεπώς είναι δυνατή η διαδικασία να υλοποιηθεί μέσω του Dynamo Player.

Εκτέλεση στατικής ανελαστικής ανάλυσης και εύρεση της στάθμης επιτελεστικότητας κάθε μέλους του φορέα.

- Εισαγωγή δεδομένων της γεωμετρίας και των στοιχείων του φορέα

από το Revit.

Τα δεδομένα των διατομών και της γεωμετρίας του φορέα συλλέγονται μέσω κατάλληλων κόμβων του Dynamo από το μοντέλο του Revit.

- **Εφαρμογή κατανεμημένων φορτίων σε κάθε στάθμη του φορέα.**

Τα φορτία της κατασκευής πέραν του ιδίου βάρους εφαρμόζονται ως κατανεμημένα φορτία επί των πλακών. Οι ζώνες επιρροής των φορτίων θεωρούνται τριγωνικές και πραγματοποιείται «ομοιομορφοποίηση» τους για να βρεθεί το γραμμικό ομοιόμορφα κατανεμημένο φορτίο που αναλαμβάνει τελικά κάθε δοκός.

- **Δημιουργία αρχείου εισόδου για την στατική ανελαστική ανάλυση του φορέα στο OpenSees.**

Σε αυτό το βήμα της ανάλυσης δημιουργούνται κατάλληλα αρχεία εισόδου σε γλώσσα προγραμματισμού TCL για την δημιουργία του φορέα και την εκτέλεση της στατικής ανελαστικής ανάλυσης του στο Openses. Τα αρχεία αυτά αποθηκεύονται σε ένα φάκελο που επιλέγει ο χρήστης μέσω ενός παραθύρου διεπαφής.

- **Εκτέλεση της ανάλυσης του φορέα στο OpenSees και εισαγωγή των αποτελεσμάτων.**

Για την εκτέλεση της ανάλυσης του φορέα στο Openses δημιουργείται ένα Αρχείο Δέσμης (Batch File), το οποίο καλείται από τον κώδικα του Dynamo και εκτελεί τα αρχεία εισόδου που αποθηκεύτηκαν στο προηγούμενο βήμα. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης αποθηκεύονται σε έναν φάκελο εντός του φακέλου που έχει επιλέξει ο χρήστης. Τα αποτελέσματα εισάγονται στο Dynamo μέσω αρχείων Python που διαβάζουν τα αρχεία εξόδου του Openses και ταξινομούν το περιεχόμενό τους. Συγκεκριμένα στα αρχεία εξόδου αυτά αποθηκεύεται η τέμνουσα βάσης των κόμβων της στάθμης του εδάφους, η μετακίνηση της οροφής του κτηρίου και οι γωνίες στροφής χορδής και τα εντατικά μεγέθη στα άκρα των μελών της κατασκευής για κάθε βήμα της ανάλυσης.

- **Υπολογισμός της στοχευόμενης μετακίνησης του φορέα.**

Η στοχευόμενη μετακίνηση του φορέα υπολογίζεται σύμφωνα με τη μέθοδο των συντελεστών μετακίνησης και δίνεται από τη σχέση:

$$\delta_t = C_0 \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot C_3 \cdot S_e \cdot \frac{T_e}{4 \cdot \pi^2} \cdot g \quad 6.2.1$$

όπου

$S_e$  : επιτάχυνση ελαστικού φάσματος για  $T = T_e$

$T_e$  : περίοδος θεμελιώδους ιδιομορφής

$C_0$  : ποσοστό συμμετοχής 1ης ιδιομορφής

$C_0 = 1.0, 1.2, 1.3, 1.4, 1.5$  για αριθμό ορόφων = 1, 2, 3, 4, 5 και  $> 10$  αντίστοιχα

$C_1$  : λόγος ανελαστικής πρὸς ελαστική μετακίνηση

$$C_1 = 1 \text{ για } T \geq T_c$$

$$C_1 = \frac{1+(R-1) \cdot \frac{T_c}{T}}{R} \quad R = \frac{\Phi_e/g}{V_y/W} \cdot C_m, \text{ για } T < T_c$$

$C_2$  : υστερητική συμπεριφορά

$$C_2 = 1.0, \text{ για άμεση χρήση μετά το σεισμό}$$

$C_3$  : φαινόμενα P-Δ

$$C_3 = 1.0, \text{ για συνήθη κτήρια}$$

Η διγραμμικοποίηση της καμπύλης ικανότητας της κατασκευής γίνεται σύμφωνα με τις διατάξεις του Ευρωκώδικα 8.

- **Δημιουργία αρχείου εισόδου για την εύρεση του διαγράμματος ροπής-καμπυλότητας των διατομών στο OpenSees.**

Στη συνέχεια δημιουργούνται αρχεία εισόδου για το OpenSees που περιλαμβάνουν τα χαρακτηριστικά των διατομών των μελών της κατασκευής για τον υπολογισμό των διαγραμμάτων ροπών-καμπυλοτήτων τους. Τα αρχεία αυτά εκτελούνται με αντίστοιχο τρόπο με τα αρχεία της στατικής ανάλυσης του φορέα στο OpenSees μέσω του Dynamo.

- **Εύρεση της στάθμης επιτελεστικότητας των διατομών του φορέα και εξαγωγή των αποτελεσμάτων σε αρχείο Excel.**

Από τα αποτελέσματα της ανάλυσης υπολογίζεται το βήμα της ανάλυσης στο οποίο επιτυγχάνεται η στοχευόμενη μετατόπιση, ώστε τελικά να βρεθεί η στάθμη επιτελεστικότητας των διατομών των μελών της κατασκευής για το συγκεκριμένο βήμα. Για τον υπολογισμό της στάθμης επιτελεστικότητας των διατομών γίνεται χρήση του ΚΑΝ.ΕΠΕ. και του παραρτήματος του μέρους 3 του Ευρωκώδικα 8 σχετικά με τις σύμμικτες και τις μεταλλικές κατασκευές (ANNEX B). Η επιτρεπόμενη στροφή χορδής των διατομών σε κάθε στάθμη επιτελεστικότητας έχει ληφθεί σύμφωνα με τις τιμές του πίνακα που ακολουθεί.

Η γωνία στροφής χορδής στην διαρροή λήφθηκε σύμφωνα με τη σχέση :

$$\theta_y = \left(\frac{1}{r}\right)_y \cdot \frac{L_v}{3} \tag{6.2.2}$$

όπου,  $L_v$  είναι το διατμητικό μήκος των στοιχείων το οποίο λαμβάνεται ίσο με:

Κατηγορία Διατομής	Στάθμη Επιτελεστικότητας		
	ΑΧ	ΠΖ	ΟΚ
1	$1.0 \cdot \theta_y$	$6.0 \cdot \theta_y$	$8.0 \cdot \theta_y$
2	$0.25 \cdot \theta_y$	$2.0 \cdot \theta_y$	$3.0 \cdot \theta_y$

Πίνακας 6.1: Όριο γωνίας στροφής χορδής της διατομής για κάθε στάθμη επιτελεστικότητας

$$L_v = \frac{L}{2}, \text{ για αμφίπακτα μέλη}$$

$$L_v = L, \text{ για αμφιαρθρωτά μέλη}$$

Τα αποτελέσματα της στάθμης επιτελεστικότητας κάθε μέλους της κατασκευής αποθηκεύεται σε ένα αρχείο Excel εντός του φακέλου που έχει επιλέξει ο χρήστης σε προηγούμενο βήμα. Στο αρχείο τυπώνονται τα αποτελέσματα καταταγμένα σε στήλες που περιέχουν τον αριθμό ταυτότητας των στοιχείων του Revit (element ID) και την στάθμη επιτελεστικότητας στην οποία βρίσκονται σύμφωνα με την ανάλυση για κάθε επιτάχυνση εδάφους.

## 6.3 Περιγραφή της διαδικασίας βελτιστοποίησης της εργασίας

Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάστηκαν δύο διαδικασίες βελτιστοποίησης των αποτελεσμάτων της. Στόχος και των δύο διαδικασιών βελτιστοποίησης είναι η ταυτόχρονη ελαχιστοποίηση του αριθμού των μελών της κατασκευής και της επιτυγχόμενης στάθμης επιτελεστικότητας στην οποία βρίσκονται ύστερα από τη δράση του σεισμού σχεδιασμού της. Η διαδικασία της ανάλυσης παραμένει όπως περιγράφηκε στην προηγούμενη παράγραφο. Στην περίπτωση της βελτιστοποίησης η διαδικασία εκτελείται για κάθε ζεύγος ατόμων του πληθυσμού και για τον απαιτούμενο αριθμό επαναλήψεων μέχρι να βρεθεί η βέλτιστη λύση. Τα κριτήρια της βελτιστοποίησης διαφοροποιούνται σε κάθε διαδικασία. Στην πρώτη περίπτωση κριτήριο του στόχου βελτιστοποίησης αποτελεί η απόσταση μεταξύ των υποστυλωμάτων της κατασκευής στην κάθε διεύθυνση, ενώ στη δεύτερη ο αριθμός τους. Η διαδικασία βελτιστοποίησης εκτελείται από το Dynamo και ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης που χρησιμοποιείται, όπως ήδη αναφέρθηκε, είναι ο NSGA-II.

### 6.3.1 Βελτιστοποίηση των αποστάσεων των υποστυλωμάτων σε κάθε διεύθυνση

Στη διαδικασία βελτιστοποίησης των αποστάσεων των υποστυλωμάτων σε κάθε διεύθυνση της κατασκευής αρχικά επιλέγεται το πλήθος των ατόμων του πληθυσμού, καθώς και το



ανώτατο και το κατώτατο όριο τους. Το ανώτατο και το κατώτατο όριο των ατόμων του πληθυσμού στην περίπτωση αυτή χαρακτηρίζει τη μέγιστη και την ελάχιστη απόσταση που μπορούν να έχουν μεταξύ τους τα υποστυλώματα της κάθε διεύθυνσης του φορέα. Η απόσταση των υποστυλωμάτων στη συνέχεια στρογγυλοποιείται στο πρώτο δεκαδικό ψηφίο και το μήκος της κάθε διεύθυνσης της κατασκευής διαιρείται με την αντίστοιχη απόσταση των υποστυλωμάτων ώστε να βρεθούν οι συντεταγμένες του κάθε υποστυλώματος και να εκτελεστεί η ανάλυση. Η θέση του πρώτου και του τελευταίου υποστυλώματος της κάθε διεύθυνσης παραμένει σταθερή και ίδια με την αρχική θέση των υποστυλωμάτων της κατασκευής πριν την εκτέλεση της βελτιστοποίησης. Κατά τη διαδικασία της βελτιστοποίησης δεν πραγματοποιείται κάποια αλλαγή στις διατομές των μελών του φορέα, αλλά μπορούν να επιλεγούν εξ αρχής οι διατομές των υποστυλωμάτων και των δοκών για τις οποίες θα εκτελεσθεί η διαδικασία. Η στάθμη επιτελεστικότητας στην οποία βρίσκεται το κάθε μέλος της κατασκευής σύμφωνα με την ανάλυση κωδικοποιείται με έναν αριθμό (AX=1, ΠZ=2, OK=3), έτσι ώστε το άθροισμα των αριθμών αυτών και του πλήθους των μελών της κατασκευής να αποτελεί το αποτέλεσμα της κάθε πιθανής λύσης. Στο τέλος της βελτιστοποίησης σχεδιάζεται αυτοματοποιημένα η προσομοίωση της βέλτιστης λύσης της κατασκευής στο περιβάλλον του Revit.

Η μορφή της αντικειμενικής συνάρτησης της διαδικασίας βελτιστοποίησης είναι η ακόλουθη:

$$w_1 \cdot N_{Column} + w_2 \cdot N_{Col,LimitState} + w_3 \cdot N_{BeamX,LimitState} + w_4 \cdot N_{BeamY,LimitState} \quad 6.3.1$$

όπου,

$N_{Column}$ : ο συνολικός αριθμός των υποστυλωμάτων της κατασκευής

$N_{Col,LimitState}$ : το άθροισμα των αριθμών στους οποίους κωδικοποιείται η στάθμη επιτελεστικότητας των υποστυλωμάτων της κατασκευής

$N_{BeamX,LimitState}$ : το άθροισμα των αριθμών στους οποίους κωδικοποιείται η στάθμη επιτελεστικότητας των δοκών στην διεύθυνση X της κατασκευής

$N_{BeamY,LimitState}$ : το άθροισμα των αριθμών στους οποίους κωδικοποιείται η στάθμη επιτελεστικότητας των δοκών στην διεύθυνση Y της κατασκευής

### 6.3.2 Βελτιστοποίηση του αριθμού των υποστυλωμάτων σε κάθε διεύθυνση

Η διαδικασία βελτιστοποίησης του αριθμού των υποστυλωμάτων της κάθε διεύθυνσης είναι αντίστοιχη της διαδικασίας βελτιστοποίησης των αποστάσεων τους. Στην περίπτωση αυτή

τα άτομα του πληθυσμού αντιπροσωπεύουν τον αριθμό των υποστυλωμάτων της κάθε διεύθυνσης και τα όρια των τιμών τους λαμβάνονται έτσι ώστε να περιορίζουν σε ένα λογικό εύρος το πλήθος τους. Το μέγεθος του πληθυσμού και ο αριθμός των επαναλήψεων της διαδικασίας επιλέγονται ανάλογα με της απαιτήσεις του προβλήματος. Μετά την εύρεση της βέλτιστης λύσης δημιουργείται το προσομοίωμα της στο περιβάλλον του Revit.



# Κεφάλαιο 7

## Παραδείγματα εφαρμογών της εργασίας

Στο πλαίσιο της κατανόησης της ροής της εργασίας και της παρακολούθησης των αποτελεσμάτων της επιλέχθηκε να παρουσιαστούν αναλυτικά δύο εφαρμογές της μεθόδου ανάλυσης και βελτιστοποίησης της εργασίας για δύο διαφορετικά κτίρια. Για κάθε μία από τις εφαρμογές αυτές θα παρουσιαστούν αναλυτικά τα βήματα και τα αποτελέσματα της εργασίας μέσα από στιγμιότυπα οθόνης.

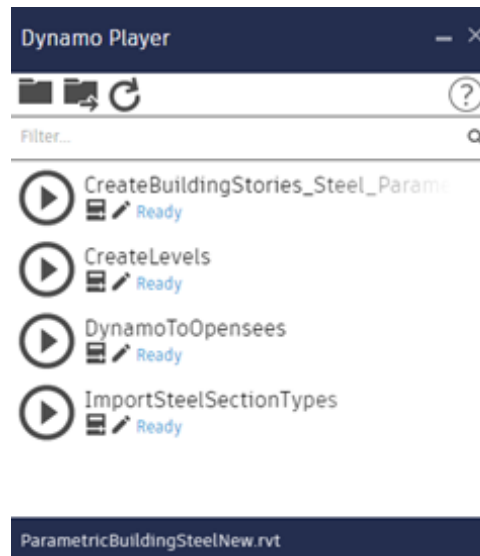
### 7.1 1η Εφαρμογή

Η πρώτη εφαρμογή αφορά την ανάλυση ενός τριώροφου κανονικού κτηρίου. Το ύψος των ορόφων της κατασκευής είναι σταθερό και ίσο με τρία μέτρα. Οι αποστάσεις μεταξύ των υποστυλωμάτων είναι 2 και 4 μέτρα στη μία διεύθυνση και 3, 5 και 2 μέτρα στην άλλη. Οι διατομές που έχουν επιλεγεί στη συγκεκριμένη ανάλυση είναι HEA360 για τα υποστυλώματα και HEA500 για τις δοκούς.

Η παραμετρική προσομοίωση και η ανάλυση της κατασκευής θα εκτελεστεί μέσω του Dynamo Player το παράθυρο του οποίου παρουσιάζεται στο σχήμα 26. Αρχικά, μέσα από την εκτέλεση του αρχείου ImportSteelSectionTypes θα γίνει η εισαγωγή των διατομών του χάλυβα από το αρχείο Excel που θα επιλεγεί στο περιβάλλον του Revit. Το παράθυρο επιλογής του αρχείου Excel και η δομή του φαίνονται στα σχήματα 27 και 28 αντίστοιχα.

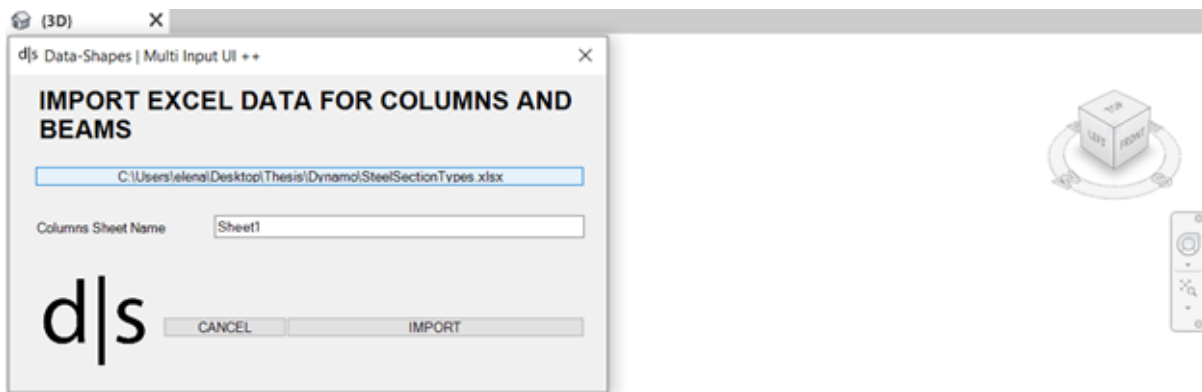
Στη συνέχεια, εκτελούνται διαδοχικά τα αρχεία CreateLevels (σχήμα 29) και CreateBuildingStories (σχήμα 30), ώστε να επιλεγούν οι στάθμες των ορόφων της κατασκευής και οι αποστάσεις των υποστυλωμάτων σε κάθε διεύθυνση και να δημιουργηθεί το παραμετρικό προσομοίωμα της κατασκευής στο περιβάλλον του Revit.

Τέλος, εκτελείται η στατική ανελαστική ανάλυση της κατασκευής και εξάγονται τα αποτελέσματα των στάθμεων επιτελεστικότητας για κάθε μέλος της μέσα από τη υλοποίηση του αρχείου DynamoToOpensees. Συγκεκριμένα, για την ανάλυση έχει ληφθεί κινητό φορτίο ορόφων ίσο με  $2.50 \text{ kN/m}^2$  και πρόσθετο μόνιμο  $1.00 \text{ kN/m}^2$ . Η κατηγορία σπουδαιότητας του κτιρίου έχει ληφθεί ίση με II ( $\gamma = 1.00$ ) και η κατηγορία του εδάφους B ( $T_b = 0.15$ ,  $T_c = 0.50$ ,  $T_d = 2.50$ ,  $S = 1.20$ ). Το αρχείο Excel των αποτελεσμάτων της ανάλυσης παρουσιάζεται στο σχήμα 34.



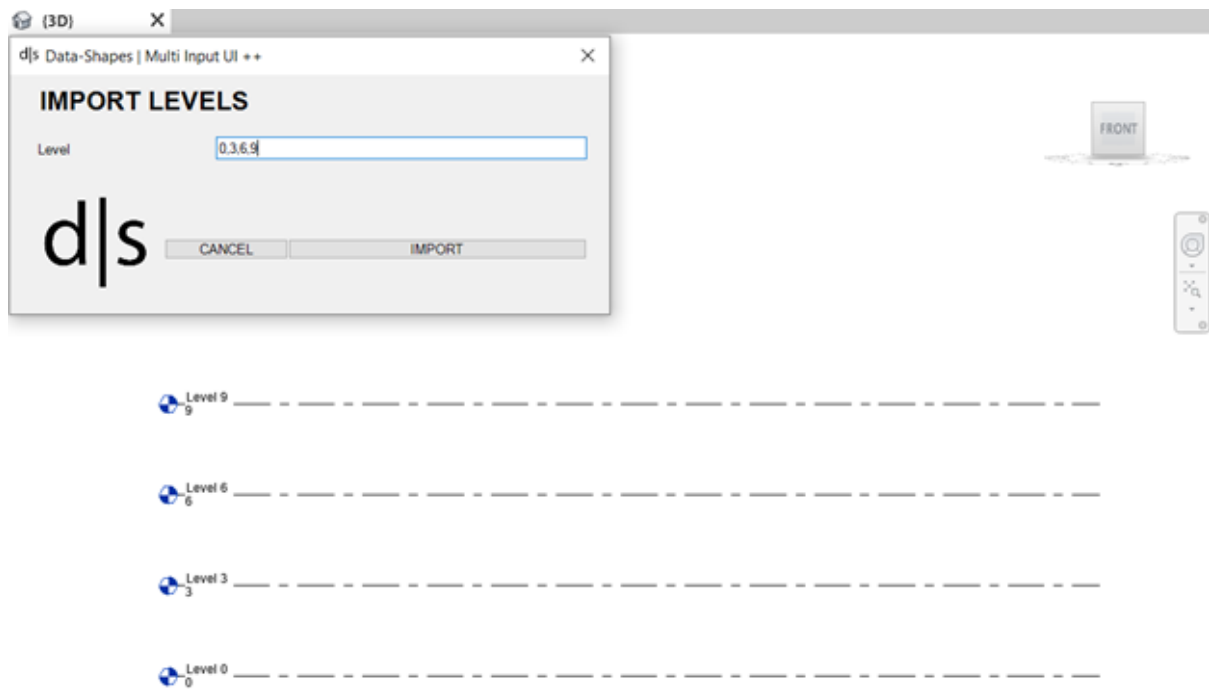
Σχήμα 26: Το παράθυρο διεπαφής χρήστη του Dynamo Player

Για το κτίριο του παραδείγματος αυτού θα εφαρμοστούν επίσης οι διαδικασίες βελτιστοποίησης των αποστάσεων των υποστυλωμάτων και του αριθμού τους. Για τη διαδικασία βελτιστοποίησης των αποστάσεων των υποστυλωμάτων επιλέγεται αριθμός ατόμων πληθυσμού ίσος με 10, κατώτατο όριο της απόστασης ίσο με  $2\text{m}$  και ανώτατο  $5\text{m}$ . Υπάρχει σύγκλιση της λύσης ύστερα από 10 επαναλήψεις και ο βέλτιστος αριθμός των αποστάσεων βρέθηκε να είναι ίσος με  $1.5\text{m}$  παράλληλα με τη μικρή διάσταση του κτηρίου και  $2.5\text{m}$  παράλληλα με τη μεγάλη. Η διαδικασία βελτιστοποίησης του αριθμού των υποστυλωμάτων της κάθε διεύθυνσης εκτελέστηκε για πληθυσμό ίσο με 10 άτομα, ελάχιστο αριθμό υποστυλωμάτων ανά διεύθυνση ίσο με 2 και μέγιστο ίσο με 5 παράλληλα με τη μεγάλη διεύθυνση και 4 παράλληλα με τη μικρή. Υπήρξε σύγκλιση της λύσης ύστερα από 10 επαναλήψεις και ο βέλτιστος αριθμός υποστυλωμάτων των δύο διευθύνσεων βρέθηκε ίσος με 4 και 5 για τη μικρή και τη μεγάλη διάσταση του κτηρίου αντίστοιχα. Δηλαδή, οι αποστάσεις των υποστυλωμάτων για τη λύση της βελτιστοποίησης του αριθμού των υποστυλωμάτων είναι  $2.5$  και  $2$  μέτρα παράλληλα με τη μεγάλη και τη μικρή διάσταση του κτιρίου αντίστοιχα. Στην αντικειμενική συνάρτηση και των δύο διαδικασιών βελτιστοποίησης επιλέχθηκαν τα βάρη:

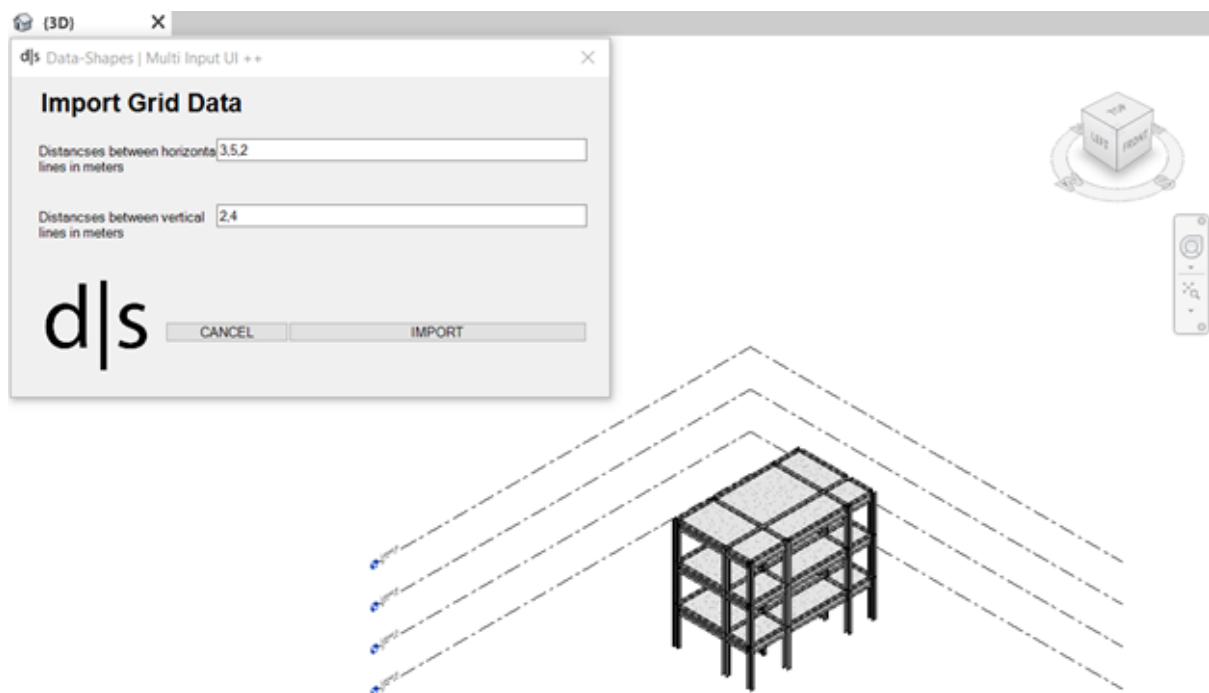


Σχήμα 27: Το παράθυρο διεπαφής χρήστη για την εισαγωγή των δεδομένων των διατομών του χάλυβα από το αρχείο Excel

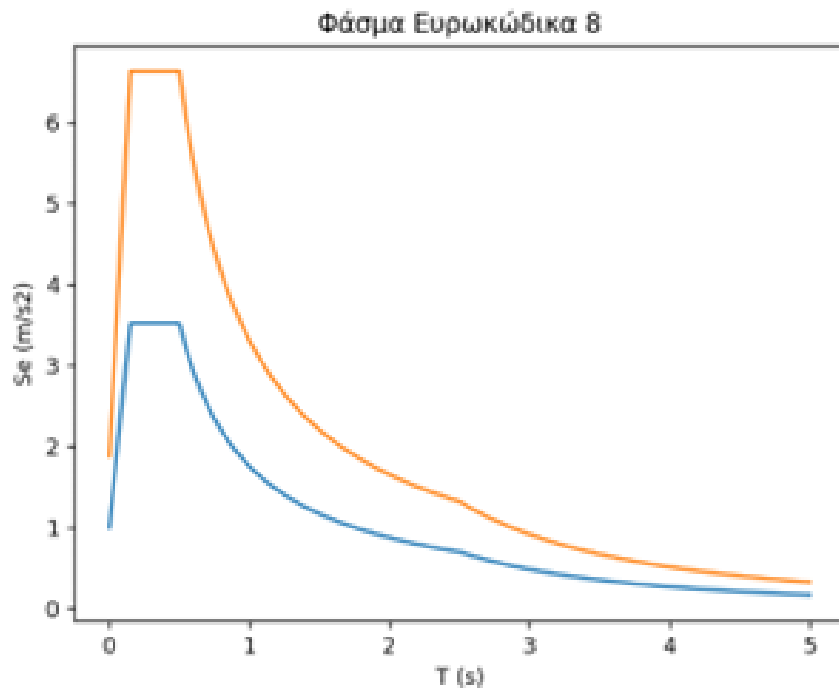
Profile	Depth h [mm]	Profile dimensions				Area properties				Inertia properties about major axes				Inertia properties about minor axes				Torsional & warping properties				Axial force & shear capacities			Shearling major axes		Shearling minor axes		Buckling		Section classification		
		h	b	t <sub>w</sub>	t <sub>f</sub>	Weight G [kg/m]	Area A [mm <sup>2</sup> ]	I <sub>y</sub> [mm <sup>4</sup> ]	I <sub>x</sub> [mm <sup>4</sup> ]	I <sub>y</sub> [mm <sup>4</sup> ]	I <sub>x</sub> [mm <sup>4</sup> ]	J <sub>t</sub> [mm <sup>4</sup> ]	I <sub>y</sub> [mm <sup>4</sup> ]	I <sub>x</sub> [mm <sup>4</sup> ]	I <sub>y</sub> [mm <sup>4</sup> ]	I <sub>x</sub> [mm <sup>4</sup> ]	F <sub>td</sub> [kN]	F <sub>td</sub> [kN]	V <sub>rd</sub> [kN]	V <sub>rd</sub> [kN]	V <sub>rd</sub> [kN]	V <sub>rd</sub> [kN]	V <sub>rd</sub> [kN]	V <sub>rd</sub> [kN]	V <sub>rd</sub> [kN]	V <sub>rd</sub> [kN]	V <sub>rd</sub> [kN]	V <sub>rd</sub> [kN]	V <sub>rd</sub> [kN]	V <sub>rd</sub> [kN]			
HEA100	100	46	3.8	6.2	5	6	3138	754	280	438	0.0004	32.4	2053	2327	0.0000	0.5	1.05	9.18	4.327	1.77	85.1	130.3	0.550	40.53	64.93	4.71	5.46	5.67	1.37	a	b	1	1
HEA100	100	95	4.1	5.7	7	8.1	5.4	932	500	627	1.71	40.7	34.2	38.41	0.002	2.4	5.799	9.840	10.53	2.92	342.1	264.8	242.6	68.89	95.07	0.84	9.28	1.36	2.25	a	b	1	1
HEA100	100	54	4.4	5.3	7	9.4	0.475	1227	627	986	3.99	49	62.76	67.73	0.2763	8.5	0.646	19.94	82.89	3.029	927	453.4	786.44	85.93	109.41	12.45	14.27	2.03	2.93	a	b	1	1
HEA100	100	73	4.7	6.9	7	12.9	0.593	1643	714	1007	5.42	57.4	77.32	88.34	0.4402	8.5	1.27	39.25	24.93	5.89	957	808.2	386.03	103.69	128.68	9.17	2.89	4.52	a	b	1	1	
HEA100	100	82	5	7.4	9	16.0	0.623	2000	966	1316	6.69	65.8	101.7	113.9	0.6097	8.4	1.66	58.1	35.3	7.06	1093	970	472.95	139.03	144.66	26.94	29.91	3.92	5.13	a	b	1	1
HEA100	100	91	5.3	8	9	18.9	0.648	2395	1227	1678	8.17	74.2	146.9	164.4	1.000	20.5	22.9	34.6	47.23	8.93	1122	982	562.76	82.95	107.85	34.39	28.9	5.21	6.13	a	b	1	1
HEA100	100	100	5.6	8.5	12	23.4	0.740	3040	1630	2190	11.43	82.6	194.9	229.6	1.424	22.4	28.47	44.63	58.46	12.22	1316	1043	669.38	100.95	120.45	41.69	31.49	6.49	8.49	a	b	1	1
HEA120	120	70	5.9	8.2	8	26.2	0.840	3327	2060	2824	27.72	96.1	252	285.4	2.049	24.9	37.25	58.03	69.62	15.22	2230	1074	704.25	126.47	174.61	58.22	47.07	6.75	10.66	a	b	1	1
HEA120	120	82	6.2	10.6	8	32.7	0.927	3952	2594	3762	36.92	101.7	334.9	388.6	2.836	36.9	47.21	72.82	97.4	20.99	2660	1284	1052.23	126.14	209.9	61.25	48.96	8.22	12.97	a	b	1	1
HEA120	120	95	6.6	10.2	8	36.1	1.041	4595	2274	2754	57.9	102.3	428.9	494	4.899	38.2	62.2	86.87	87.1	23.8	3469.9	17674	879.73	300.37	373.66	90.79	73.74	14.42	22.78	a	b	1	2
HEA120	120	106	7.1	10.7	8	42.2	1.18	5281	2660	3270	80.96	114.6	507.1	620.4	6.838	33.6	89.1	126.2	107.6	27.67	3243.6	1620	1244.96	348.44	438.52	101.93	87.66	16.52	25.43	a	b	1	2
HEA120	120	120	7.5	11.5	8	49.7	1.274	6281	3281	3680	107.7	127.1	713	864.3	9.881	35.5	103.5	151.7	129.9	36.79	3620.0	1540	1471.25	400	489.29	107.89	100.02	21.95	36.11	a	b	1	2
HEA120	120	130	8	12.7	10	57.1	1.363	7173	3814	4390	162.7	140.5	803.6	1099	16.43	37.9	122.8	189.1	170.6	46.36	3893.0	2070	3109.14	476.73	586.85	126.36	279.88	20.98	44.39	a	b	1	2
HEA120	120	140	8.6	13.5	21	66.3	1.487	8446	4289	4982	223.3	162.9	976	1207	21.88	38.5	146.4	229	204.1	58.62	4620.0	2790	4644.69	579.27	670.39	217.76	327.88	34.41	53.62	a	b	1	3
HEA120	120	150	9.4	14.8	21	77.6	1.626	9882	5009	5840	337.4	184.8	1160	1702	36.78	41.2	196.4	276.4	340.0	70.27	5093.0	3750	5222.29	689.18	792.74	262.43	389.52	40.48	64.88	a	b	1	3
HEA120	120	160	10.2	16	21	90.7	1.784	1052	5967	6403	482	204.9	1629	2104	26.42	43.1	224.2	326.9	388.2	88.68	6254.00	5290	7174.76	812.35	988.33	403.07	516.62	50.33	70.93	a	b	1	3
HEA120	120	170	10.1	17.2	24	106.6	1.917	12447	7224	7224	679.3	222.0	2441	3792	32.68	44.9	264.3	409.6	527	101.4	8480.00	6680	9944.76	901.6	1091.6	423.64	654.98	53.7	74.92	a	b	1	4
HEA120	120	180	11	18	24	122.4	2.028	13939	8379	8380	923.8	243	3989	5712	37.87	46.6	307.9	485.6	648	107.2	10470.00	8070	10853.63	1066.76	1264.20	473.27	625.41	57.37	84.13	a	b	1	4
HEA120	120	190	11	18	32	140.7	2.161	15714	9564	9566	1242	264.6	5276	8118	43.88	48.4	349.6	619	819.8	114.4	11600.00	9490	12898.98	1192.92	1399.08	511.9	730.07	61.29	93.67	a	b	1	4
HEA120	120	200	11	18	42	161.5	2.307	17684	10833	10836	1612	287.8	6819	10920	50.44	50.2	393.4	764	1062.9	122.2	12870.00	10980	14057.88	1319.25	1534.34	551.3	765.62	65.25	98.39	a	b	1	4
HEA120	120	210	11	18	54	184.7	2.465	19848	12264	12268	2088	312.4	8784	13800	57.86	52.1	438.2	926	1205.9	130.5	14130.00	12660	15320.94	1453.59	1689.59	591.5	790.87	69.22	104.44	a	b	1	4
HEA120	120	220	11	18	68	210.4	2.636	22206	13866	13870	2688	342.6	11364	17280	65.86	54.9	484.0	1100	1311.9	139.8	15480.00	14580	16650.00	1603.8	1830.0	632.0	800.0	73.0	111.0	a	b	1	4
HEA120	120	230	11	18	84	238.8	2.820	24768	15618	15622	3408	373.2	14256	21600	75.00	57.8	530.8	1290	1429.9	149.7	16950.00	16650	18045.00	1760.0	1980.0	670.0	830.0	77.0	117.0	a	b	1	4
HEA120	120	240	11	18	102	270.0	3.018	27522	17538	17542	4368	405.0	16440	27000	85.50	60.8	577.6	1490	1555.9	158.6	18480.00	18480	19500.00	1910.0	2070.0	710.0	860.0	81.0	123.0	a	b	1	4
HEA120	120	250	11	18	122	304.8	3.230	30480	19620	19624	5472	438.0	18900	33600	97.50	63.8	624.4	1700	1691.9	167.5	20100.00	20100	20700.00	2000.0	2160.0	750.0	890.0	85.0	129.0	a	b	1	4
HEA120	120	260	11	18	144	342.0	3.462	33642	21918	21922	6768	471.0	21540	40320	111.00	66.8	671.2	1920	1837.9	176.4	21810.00	21810	22320.00	2100.0	2250.0	790.0	930.0	89.0	135.0	a	b	1	4
HEA120	120	270	11	18	168	382.2	3.718	37018	24462	24466	8304	505.0	24360	49680	126.00	69.8	718.0	2160	1983.9	185.3	22620.00	22620	23040.00	2190.0	2340.0	830.0	970.0	93.0	141.0	a	b	1	4
HEA120	120	280	11	18	194	424.8	3.998	40704	27282	27286	10032	539.0	27420	60480	142.00	72.8	764.8	2400	2139.9	194.2	23530.00	23530	23880.00	2280.0	2430.0	870.0	1010.0	97.0	147.0	a	b	1	4
HEA120	120	290	11	18	222	469.8	4.298	44622	30378	30382	11952	574.0	30660	72960	159.00	75.8	811.8	2640	2295.9	203.1	24540.00	24540	24840.00	2370.0	2520.0	910.0	1050.0	101.0	153.0	a	b	1	4
HEA120	120	300	11	18	252	517.2	4.618	48870	33780	33784	14064	609.0	33900	87120	177.00	78.8	858.8	2880	2461.9	212.0	25650.00	25650	25910.00	2460.0	2610.0	950.0	1090.0	105.0	159.0	a	b	1	4
HEA120	120	310	11	18	284	567.0	4.958	53454	37494	37498	16368	644.0	36240	103680	196.00	81.8	905.8	3120	2637.9	220.9	26870.00	26870	27090.00	2550.0	2670.0	990.0	1130.0	109.0	165.0	a	b	1	4
HEA120	120	320	11	18	318	618.0	5.318	58374	41538	41542	18912	679.0	38680	121920	216.00	84.8	952.8	3360	2823.9	229.8	28200.00	28200	28370.00	2640.0	2730.0	1030.0	1170.0	113.0	171.0	a	b	1	4
HEA120	120	330	11	18	354	670.2	5.698	63642	46026	46030	21648	714.0	41220	142080	237.00	87.8	1000.8	3600	3019.9	238.7	29730.00	29730	29860.00	2730.0	2820.0	1070.0	1210.0	117.0	177.0	a	b	1	4
HEA120	120	340	11	18	392	724.2	6.098	69360	50964	50968	24576	749.0	43860	163680	258.00	90.8	1048.8	3840	3225.9	247.6	31370.00	31370	31480.00	2820.0	2910.0	1110.0	1250.0	121.0	183.0	a	b	1	4
HEA120	120	350	11	18	432	779.8	6.518	75534	56382	56386	28704	784.0	46600	187680	280.00	93.8	1096.8	4080	3441.9	256.5	32910.00	32910	33000.00	2910.0	2990.0	1150.0	1290.0	125.0	189.0	a	b	1	4
HEA120	120	360	11	18	474	836.8	6.958	82164	62316	62320	33408	819.0	49440	214080	303.00	96.8	1144.8	4320	3667.9	265.4	34560.00	34560	34630.00	2990.0	3070.0	1190.0	1330.0	129.0	195.0	a	b	1	4
HEA120	120	370	11	18	518	895.8																											



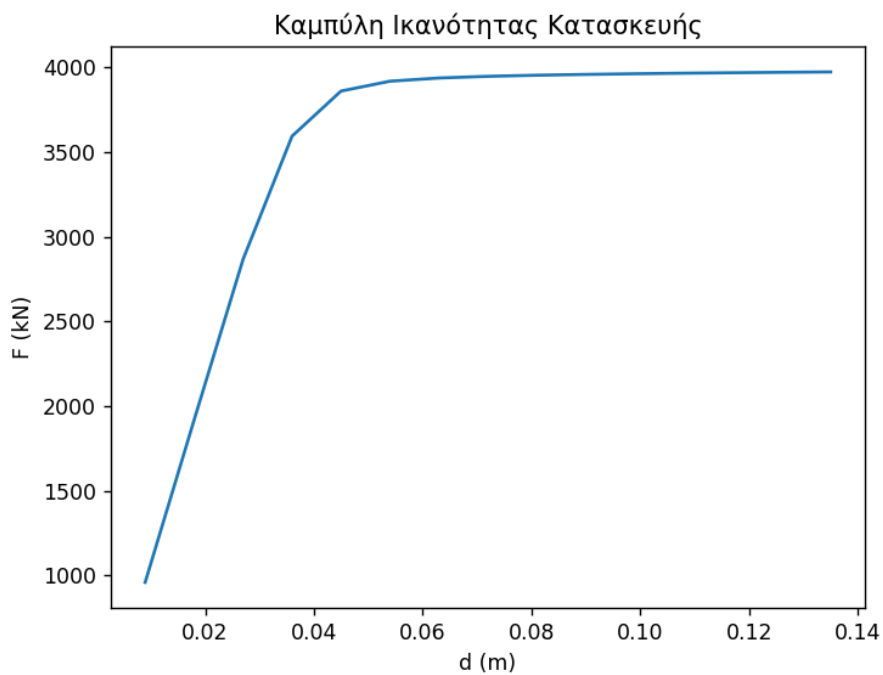
Σχήμα 29: Η εισαγωγή και αναπαράσταση των στάθμεων των ορόφων της κατασκευής.



Σχήμα 30: Εισαγωγή και αναπράσταση του τρισδιάστατου μοντέλου της κατασκευής της 1ης εφαρμογής

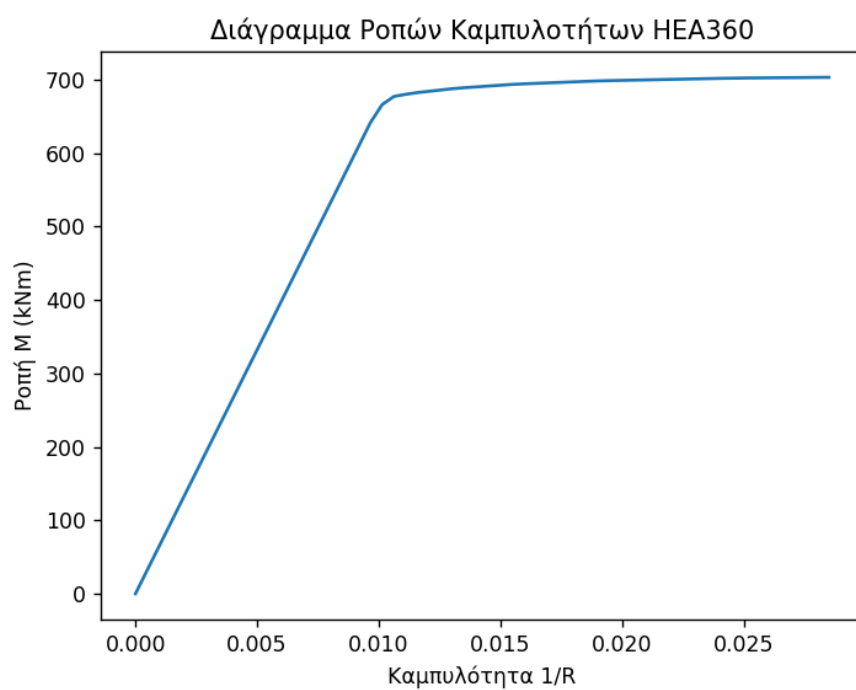


Σχήμα 31: Το φάσμα του Ευρωκώδικα 8 για κάθε επιτάχυνση εδάφους



Σχήμα 32: Η καμπύλη ικανότητας της κατασκευής





Σχήμα 33: Το διάγραμμα ροπής καμπυλότητας για τη διατομή ΗΕΑ360 που έχει επιλεγεί για τα υποστυλώματα της κατασκευής

	A	B	C	D
1	$a_g$	0.085g	0.16g	
2	Target Displacement	0.0122	0.0251	
3	ID	Limit State		
4	330046	AX	PZ	
5	330048	AX	PZ	
6	330050	AX	AX	
7	330052	AX	PZ	
8	330054	AX	PZ	
9	330056	AX	AX	
10	330058	AX	PZ	
11	330060	AX	PZ	
12	330062	AX	AX	
13	330064	AX	PZ	
14	330066	AX	PZ	
15	330068	AX	PZ	
16	330070	AX	PZ	
17	330072	AX	PZ	
18	330074	AX	PZ	
19	330076	AX	PZ	
20	330078	AX	PZ	
21	330080	AX	PZ	
22	330082	AX	PZ	
23	330084	AX	PZ	
24	330086	AX	AX	
25	330088	AX	PZ	
26	330090	AX	PZ	
27	330092	AX	PZ	
28	330094	AX	PZ	
29	330096	AX	PZ	
30	330098	AX	PZ	

Σχήμα 34: Τα αποτελέσματα των στάθμεων επιτελεστικότητας των υποστυλωμάτων της κατασκευής για κάθε επιτάχυνση εδάφους

### 7.1.1 Σύγκριση αποτελεσμάτων αρχικής λύσης και βελτιστοποιημένων λύσεων

Στα σχήματα που ακολουθούν θα γίνει η σύγκριση ορισμένων αποτελεσμάτων των αναλύσεων της κατασκευής της εφαρμογής 1 μεταξύ της αρχικής πρότασης σχεδιασμού και των προτάσεων που προέκυψαν από την εκτέλεση των διαδικασιών βελτιστοποίησης των αποστάσεων και των αριθμών των υποστυλωμάτων.

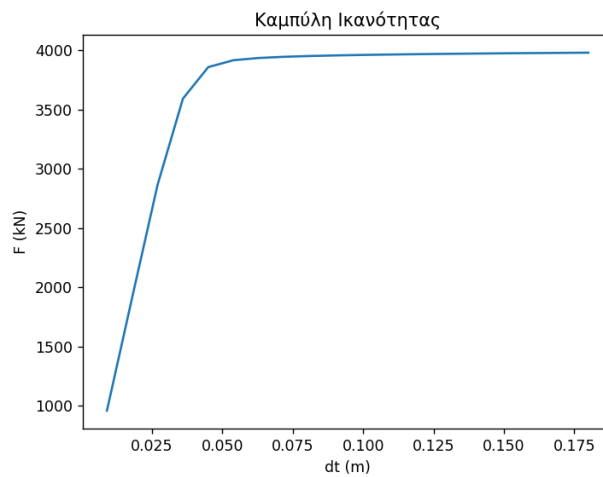
Στον πίνακα ;; παρουσιάζεται συνοπτικά ο συνολικός αριθμός των δοκών και των υποστυλωμάτων του φορέα για κάθε μία από τις προτεινόμενες λύσεις σύμφωνα με τη γεωμετρία τους, η οποία περιγράφηκε παραπάνω.

Μέρος των αρχείων Excel που εξήχθησαν από τη διαδικασία των αναλύσεων της κατασκευής εμφανίζονται στα σχήματα 38 και 38 για τα υποστυλώματα και τις δοκούς της κατασκευής για κάθε προτεινόμενη λύση. Από τα αποτελέσματα αυτά προκύπτουν ορισμένα συμπεράσματα σχετικά με τις προτάσεις του σχεδιασμού.

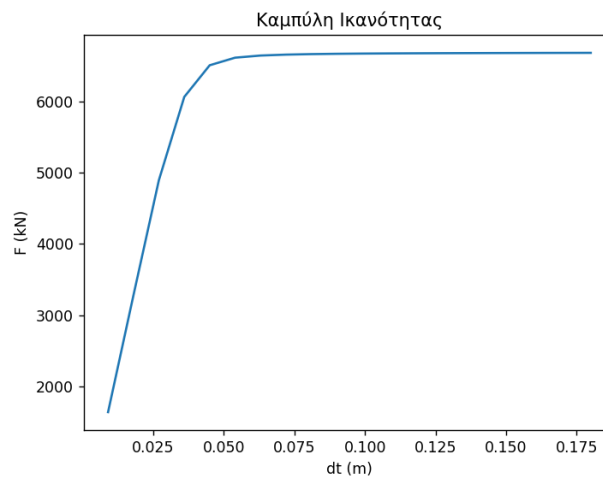
Αρχικά, συγκρίνεται η αρχική λύση με τη λύση που προτείνεται ύστερα από την εκτέλεση της διαδικασίας βελτιστοποίησης του αριθμού των υποστυλωμάτων της κατασκευής. Στη δεύτερη παρατηρείται μία μείωση της στοχευόμενης μετακίνησης της κατασκευής, η οποία συνοδεύεται από την αύξηση του αριθμού των μελών της και τη σημαντική μείωση του αριθμού των μελών που μεταβαίνουν στη στάθμη επιτελεστικότητας 'Προστασία Ζωής' κατά τη δράση σεισμού με πιθανότητα υπέρβασης 50% στα 70 χρόνια. Τα αποτελέσματα της λύσης που προκύπτει από τη βελτιστοποίηση του μήκους των αποστάσεων μεταξύ των υποστυλωμάτων συγκριτικά με εκείνα της αρχικής λύσης παρατηρείται μείωση της στοχευόμενης μετατόπισης του κτηρίου και σημαντική αύξηση του ποσοστού των υποστυλωμάτων της κατασκευής που παραμένουν στη στάθμη επιτελεστικότητας 'Άμεση Χρήση' κατά τη δράση του σεισμού σχεδιασμού με περίοδο επαναφοράς 10% στα 475 χρόνια. Ταυτόχρονα σημειώνεται αύξηση του αριθμού των υποστυλωμάτων της κατασκευής σε σχέση με την αρχική λύση.

Example 1	Column Number	Beam Number	Συχνός Σεισμός (a <sub>g</sub> =0.085)			Σπάνιος Σεισμός (a <sub>g</sub> =0.085)		
			Target Disp dt (m)	Columns AX	Beams AX	Target Disp dt (m)	Columns AX	Beams AX
As Build	36	27	0.012	100%	100%	0.0251	19.44%	77.78%
Optimize Column N	60 ↑	47 ↑	0.094 ↓	100%	100%	0.0197 ↓	46.67% ↑	91.67% ↑↑
Optimize Column D	75 ↑↑	75 ↑↑	0.085 ↓↓	100%	100%	0.018 ↓	46.67% ↑	46.67% ↓

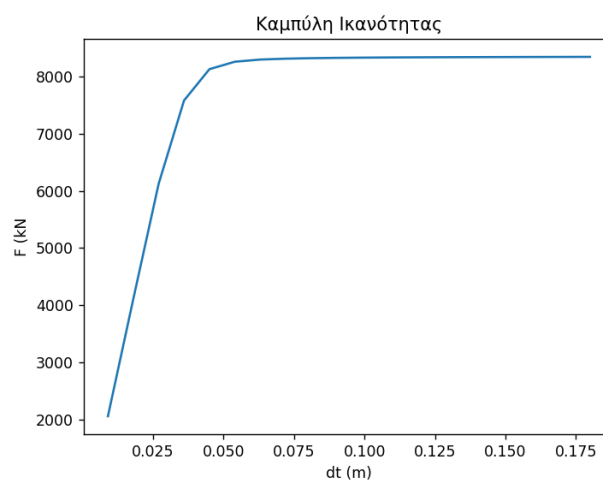
Σχήμα 35: Σύγκριση των αποτελεσμάτων κάθε λύσης συγκεντρωτικά



(i) Αρχική λύση



(ii) Βελτιστοποίηση αριθμού υποστυλωμάτων



(iii) Βελτιστοποίηση αποστάσεων υποστυλωμάτων

Σχήμα 36: Σύγκριση των καμπυλών ικανότητας της κατασκευής για την αρχική λύση της κατασκευής της εφαρμογής 1 και των βελτιστοποιημένων.

Αρχική Πρόταση			Βελτιστοποίηση αριθμού υποστυλωμάτων			Βελτιστοποίηση αποστάσεων υποστυλωμάτων		
ag	0.085g	0.16g	ag	0.085g	0.16g	ag	0.085g	0.16g
Target Disp	0.0122	0.0251	Target Disp	0.0094	0.0197	Target Disp	0.0085	0.018
ID	Limit State		ID	Limit State		ID	Limit State	
375562	AX	PZ	375975	AX	PZ	375079	AX	PZ
375564	AX	PZ	375977	AX	AX	375081	AX	AX
375566	AX	AX	375979	AX	AX	375083	AX	AX
375568	AX	PZ	375981	AX	PZ	375085	AX	PZ
375570	AX	PZ	375983	AX	AX	375087	AX	AX
375572	AX	AX	375985	AX	AX	375089	AX	AX
375574	AX	PZ	375987	AX	PZ	375091	AX	PZ
375576	AX	PZ	375989	AX	AX	375093	AX	AX
375578	AX	AX	375991	AX	AX	375095	AX	AX
375580	AX	PZ	375993	AX	PZ	375097	AX	PZ
375582	AX	PZ	375995	AX	AX	375099	AX	AX
375584	AX	PZ	375997	AX	AX	375101	AX	AX
375586	AX	PZ	375999	AX	PZ	375103	AX	PZ
375588	AX	PZ	376001	AX	PZ	375105	AX	AX
375590	AX	PZ	376003	AX	AX	375107	AX	AX
375592	AX	PZ	376005	AX	PZ	375109	AX	PZ
375594	AX	PZ	376007	AX	PZ	375111	AX	PZ
375596	AX	PZ	376009	AX	AX	375113	AX	AX
375598	AX	PZ	376011	AX	PZ	375115	AX	PZ
375600	AX	PZ	376013	AX	PZ	375117	AX	PZ
375602	AX	AX	376015	AX	AX	375119	AX	AX
375604	AX	PZ	376017	AX	PZ	375121	AX	PZ
375606	AX	PZ	376019	AX	PZ	375123	AX	PZ
375608	AX	PZ	376021	AX	AX	375125	AX	AX
375610	AX	PZ	376023	AX	PZ	375127	AX	PZ
375612	AX	PZ	376025	AX	PZ	375129	AX	PZ
375614	AX	PZ	376027	AX	AX	375131	AX	AX
375616	AX	PZ	376029	AX	PZ	375133	AX	PZ
375618	AX	PZ	376031	AX	PZ	375135	AX	PZ
375620	AX	AX	376033	AX	AX	375137	AX	AX
375622	AX	PZ	376035	AX	PZ	375139	AX	PZ
375624	AX	PZ	376037	AX	PZ	375141	AX	PZ

Σχήμα 37: Σύγκριση των αποτελεσμάτων κάθε λύσης της ανάλυσης για τα υποστυλώματα της κατασκευής της εφαρμογής 1

Αρχική Πρόταση			Βελτιστοποίηση αριθμού υποστυλωμάτων			Βελτιστοποίηση αποστάσεων υποστυλωμάτων		
ag	0.085g	0.16g	ag	0.085g	0.16g	ag	0.085g	0.16g
Target Disp	0.0122	0.0251	Target Disp	0.0094	0.0197	Target Disp	0.0085	0.018
ID	Limit State		ID	Limit State		ID	Limit State	
375460	AX	PZ	375789	AX	PZ	375079	AX	PZ
375462	AX	AX	375791	AX	AX	375081	AX	AX
375464	AX	AX	375793	AX	AX	375083	AX	AX
375466	AX	PZ	375795	AX	AX	375085	AX	PZ
375468	AX	AX	375797	AX	PZ	375087	AX	AX
375470	AX	AX	375799	AX	AX	375089	AX	AX
375472	AX	PZ	375801	AX	AX	375091	AX	PZ
375474	AX	AX	375803	AX	AX	375093	AX	AX
375476	AX	AX	375805	AX	PZ	375095	AX	AX
375478	AX	PZ	375807	AX	AX	375097	AX	PZ
375480	AX	AX	375809	AX	AX	375099	AX	AX
375482	AX	AX	375811	AX	AX	375101	AX	AX
375484	AX	PZ	375813	AX	PZ	375103	AX	PZ
375486	AX	AX	375815	AX	AX	375105	AX	AX
375488	AX	AX	375817	AX	AX	375107	AX	AX
375490	AX	PZ	375819	AX	AX	375109	AX	PZ
375492	AX	AX	375821	AX	AX	375111	AX	PZ
375494	AX	AX	375823	AX	AX	375113	AX	AX
375496	AX	AX	375825	AX	AX	375115	AX	PZ
375498	AX	AX	375827	AX	AX	375117	AX	PZ
375500	AX	AX	375829	AX	AX	375119	AX	AX
375502	AX	AX	375831	AX	AX	375121	AX	PZ
375504	AX	AX	375833	AX	AX	375123	AX	PZ
375506	AX	AX	375835	AX	AX	375125	AX	AX
375508	AX	AX	375837	AX	AX	375127	AX	PZ
375510	AX	AX	375839	AX	AX	375129	AX	PZ
375512	AX	AX	375841	AX	AX	375131	AX	AX
			375843	AX	AX	375133	AX	PZ
			375845	AX	AX	375135	AX	PZ
			375847	AX	AX	375137	AX	AX
			375849	AX	AX	375139	AX	PZ
			375851	AX	AX	375141	AX	PZ

Σχήμα 38: Σύγκριση των αποτελεσμάτων κάθε λύσης της ανάλυσης για τις δοκούς της κατασκευής της εφαρμογής 1 παράλληλα με τη διαύθυνση του σεισμού



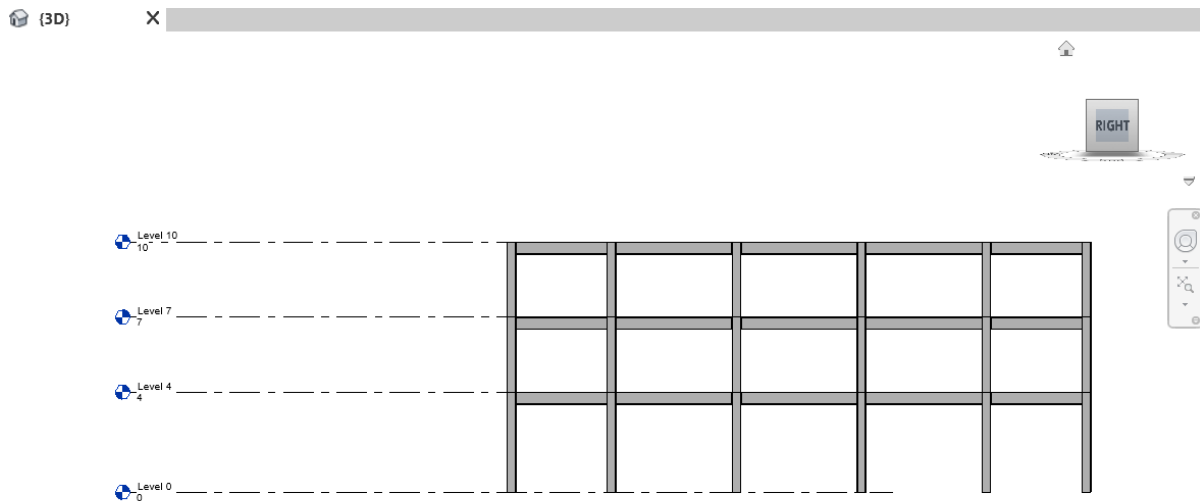
Σχήμα 39: Σύγκριση των ποσοστών των υποστυλωμάτων και των δοκών που βρίσκονται στις στάθμες ‘Άμεση Χρήση’ και ‘Προστασία Ζωής’ υπό τη δράση σεισμού με πιθανότητα υπέρβασης 10% στα 475 χρόνια για κάθε λύση του κτηρίου της εφαρμογής 1. Τα διαγράμματα 39i, 39ii, 39iii αναφέρονται στα υποστυλώματα, ενώ τα διαγράμματα 39iv, 39v, 39vi αναφέρονται στις δοκούς.

## 7.2 2η Εφαρμογή

Η εφαρμογή αυτή αφορά επίσης την ανάλυση ενός τριώροφου κανονικού κτηρίου, μόνο που στην περίπτωση αυτή οι στάθμες των ορόφων της κατασκευής είναι 4, 7 και 10 μέτρα. Οι αποστάσεις των υποστυλωμάτων κατα μήκος της μεγάλης διάστασης του κτηρίου είναι 5,4,4,5,3 και 5 μέτρα, ενώ της μικρής 4,5,3 και 3 μέτρα. Τα υποστυλώματα του έχουν πρότυπη διατομή χάλυβα HEA550 και των δοκών HEA500.

Αντίστοιχα με την πρώτη εφαρμογή η παραμετρική προσομοίωση και η ανάλυση της κατασκευής θα υλοποιηθούν μέσω του Dynamo Player. Το προσομοίωμα της κατασκευής στο περιβάλλον του Revit αναπαριστάται στα σχήματα 41 και 40.

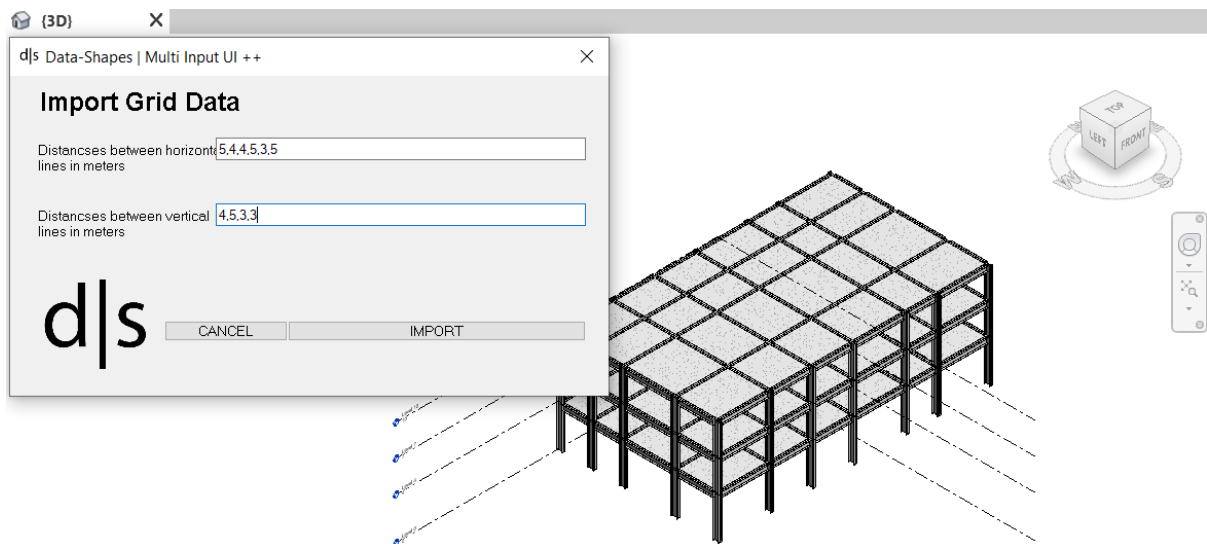
Για την ανάλυση έχει ληφθεί κινητό φορτίο ορόφων ίσο με  $2.50kN/m^2$  και πρόσθετο μόνιμο  $1.00kN/m^2$ . Η κατηγορία σπουδαιότητας του κτιρίου έχει ληφθεί ίση με II ( $\gamma = 1.00$ ) και η κατηγορία του εδάφους B ( $T_b = 0.15$ ,  $T_c = 0.50$ ,  $T_d = 2.50$ ,  $S = 1.20$ ). Η καμπύλη ικανότητας του κτηρίου παρουσιάζεται στο σχήμα 42 και στο σχήμα 43 φέινεται το διάγραμμα ροπών καμπυλωτήτων της διατομής των υποστυλωμάτων. Το αρχείο Excel των αποτελεσμάτων της ανάλυσης φαίνεται στο σχήμα 44.



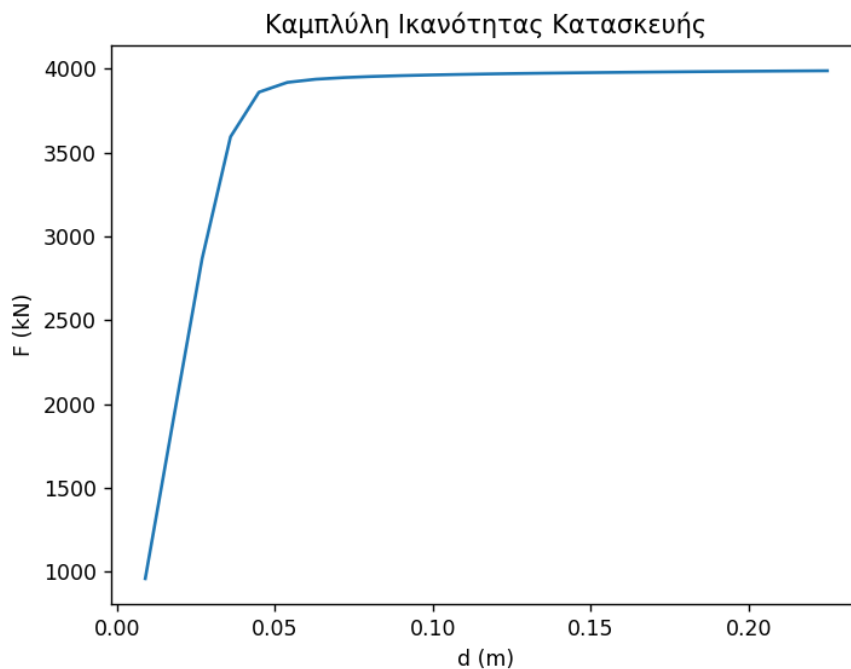
Σχήμα 40: Τρισδιάστατη αναπαράσταση του μοντέλου της 2ης εφαρμογής

Για το κτήριο εφαρμόστηκαν οι διαδικασίες βελτιστοποίησης των αποστάσεων και του αριθμού των υποστυλωμάτων. Για τη διαδικασία βελτιστοποίησης των αποστάσεων του κτηρίου στις δύο διευθύνσεις λήφθηκε πληθυσμός 10 ατόμων για 7 γενιές και ανώτατο και κατώτατο όριο απόστασης 2 και 5 μέτρα αντίστοιχα. Οι βέλτιστη απόσταση των υποστυλωμάτων βρέθηκε να είναι ίση με 5.2 μέτρα για τη μεγάλη διεύθυνση και 3.75 μέτρα για τη μικρή. Η



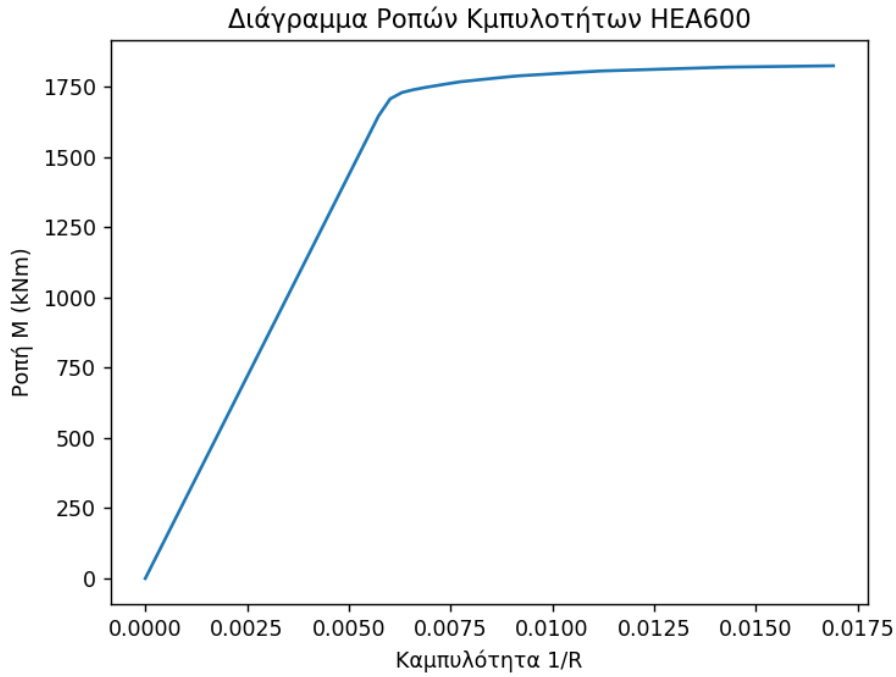


Σχήμα 41: Πλάγια όψη του μοντέλου της 2ης εφαρμογής



Σχήμα 42: Καμπύλη ικανότητας της κατασκευής

διαδικασία βελτιστοποίησης του αριθμού των υποστυλωμάτων των δύο διευθύνσεων εκτελέστηκε για αριθμό ατόμων του πληθυσμού ίσο με 10 και για 7 επαναλήψεις. Για τη μεγάλη διεύθυνση του κτηρίου τέθηκε ελάχιστος αριθμός υποστυλωμάτων ίσος με 5 και μέγιστος ίσος με 12, ενώ για τη μικρή 3 και 7 αντίστοιχα. Ο βέλτιστος αριθμός υποστυλωμάτων βρέθηκε να είναι 6 παράλληλα με τη μεγάλη πλευρά του κτηρίου και 5 παράλληλα με τη μικρή. Συνεπώς, οι αποστάσεις των υποστυλωμάτων στη λύση της βελτιστοποίησης του



Σχήμα 43: Καμπύλη ικανότητας της κατασκευής

αριθμού των υποστυλωμάτων είναι ίσες με 4.83 και 3.00 μέτρα παράλληλα με τη μεγάλη και τη μικρή διεύθυνση του κτιρίου αντίστοιχα. Στην αντικειμενική συνάρτηση και των δύο διαδικασιών βελτιστοποίησης επιλέχθηκαν τα βάρη:  $w_1 = 1$ ,  $w_2 = 100$ ,  $w_3 = 30$ , και  $w_4 = 30$ .

	A	B	C	D
1	Columns			
2	ag	0.085g	0.16g	
3	Target Displacement	0.0161	0.0323	
4	ID	Limit State		
5	385405	PZ	PZ	
6	385407	AX	AX	
7	385409	AX	AX	
8	385411	PZ	PZ	
9	385413	AX	AX	
10	385415	AX	AX	
11	385417	PZ	PZ	
12	385419	AX	AX	
13	385421	AX	AX	
14	385423	PZ	PZ	
15	385425	AX	AX	
16	385427	AX	AX	
17	385429	PZ	PZ	
18	385431	AX	AX	
19	385433	AX	AX	
20	385435	PZ	PZ	
21	385437	AX	AX	
22	385439	AX	AX	
23	385441	PZ	PZ	
24	385443	AX	AX	
25	385445	AX	AX	
26	385447	PZ	PZ	
27	385449	AX	AX	
28	385451	AX	AX	
29	385453	PZ	PZ	
30	385455	AX	AX	

Σχήμα 44: Καμπύλη ικανότητας της κατασκευής

### 7.2.1 Σύγκριση αποτελεσμάτων αρχικής λύσης και βελτιστοποιημένων λύσεων

Όπως και στην προηγούμενη ενότητα θα γίνει η σύγκριση ορισμένων αποτελεσμάτων των αναλύσεων της κατασκευής μεταξύ της αρχικής πρότασης σχεδιασμού και των προτάσεων που προέκυψαν από την εκτέλεση των διαδικασιών βελτιστοποίησης των αποστάσεων και του αριθμού των υποστυλωμάτων για την εφαρμογή 2.

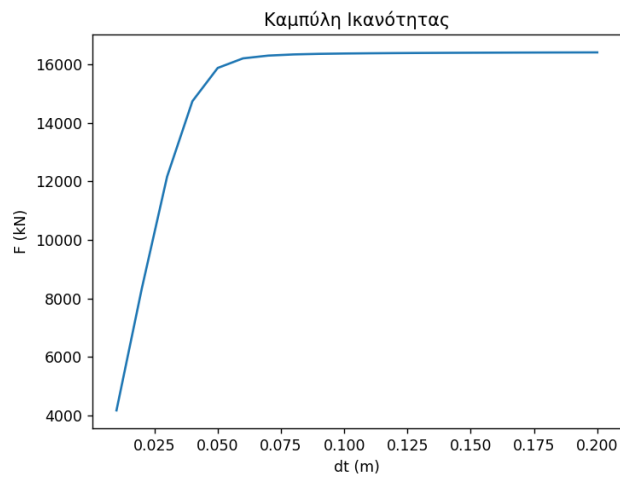
Στον πίνακα ;; παρουσιάζεται συνοπτικά ο συνολικός αριθμός των δοκών και των υποστυλωμάτων του φορέα για την αρχική λύση και τις βελτιστοποιημένες που προκύπτει από τη γεωμετρία των φορέων όπως περιγράφηκε παραπάνω.

Από τα αποτελέσματα των αρχείων Excel της διαδικασίας της ανάλυσης, μέρος των οποίων παρουσιάζεται στα σχήματα 47 και 48 για τα υποστυλώματα και τις δοκούς της κατασκευής για κάθε προτεινόμενη λύση, προκύπτουν ορισμένα συμπεράσματα σχετικά με τις προτάσεις του σχεδιασμού.

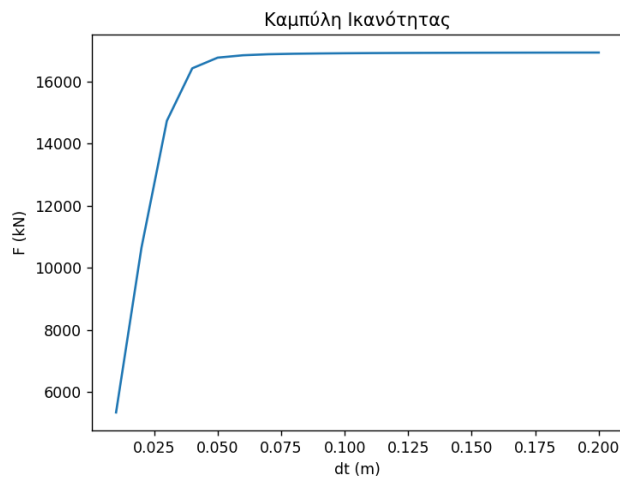
Αρχικά, συγκρίνοντας την αρχική λύση με τη λύση που προκύπτει από τη βελτιστοποίηση του αριθμού των υποστυλωμάτων παρατηρούμε μία αρκετά μικρή μείωση της στοχευόμενης μετατόπισης του κτηρίου και ταυτόχρονα μια αύξηση του αριθμού των δοκών που παραμένουν στη στάθμη επιτελεστικότητας ‘Άμεσης Χρήσης’ μετά το συχνό και το σπάνιο σεισμό χωρίς να αυξάνεται σημαντικά ο αριθμός των μελών της κατασκευής. Παράλληλα, συγκρίνοντας τα αποτελέσματα της ανάλυσης της αρχικής λύσης και της λύσης που προκύπτει από τη διαδικασία βελτιστοποίησης των αποστάσεων των υποστυλωμάτων βλέπουμε μία αμελητέα αύξηση της στοχευόμενης μετατόπισης της κατασκευής και μία μείωση των ποσοστών των μελών της κατασκευής που μεταβαίνουν στη στάθμη επιτελεστικότητας ‘Προστασίας Ζωής’ η οποία, όμως, συνοδεύεται από σημαντική μείωση του αριθμού των μελών της κατασκευής.

Example 1	Column Number	Beam Number	Συχνός Σεισμός ( $a_g=0.085$ )			Σπάνιος Σεισμός ( $a_g=0.085$ )		
			Target Disp dt (m)	Columns AX	Beams AX	Target Disp dt (m)	Columns AX	Beams AX
As Build	36	27	0.012	100%	100%	0.0251	19.44%	77.78%
Optimize Column N	60 ↑	47 ↑	0.094 ↓	100%	100%	0.0197 ↓	46.67% ↑	91.67% ↑↑
Optimize Column D	75 ↑↑	75 ↑↑	0.085 ↓↓	100%	100%	0.018 ↓	46.67% ↑	46.67% ↓

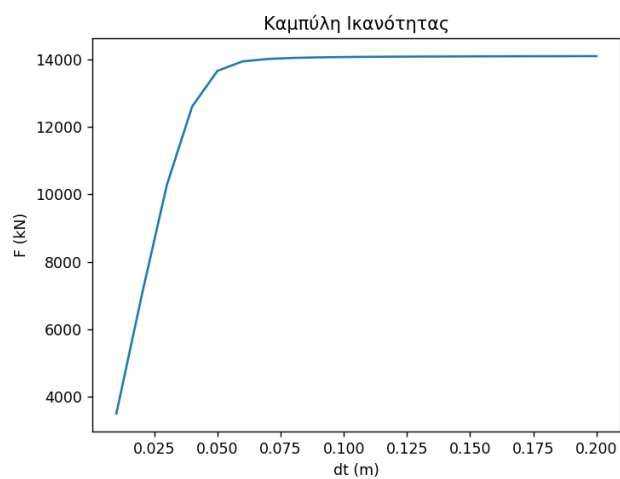
Σχήμα 45: Σύγκριση των αποτελεσμάτων κάθε λύσης συγκεντρωτικά



(i) Αρχική λύση



(ii) Βελτιστοποίηση αριθμού υποστυλωμάτων



(iii) Βελτιστοποίηση αποστάσεων υποστυλωμάτων

Σχήμα 46: Σύγκριση των καμπυλών ικανότητας της κατασκευής για την αρχική λύση της κατασκευής της εφαρμογής 1 και των βελτιστοποιημένων.

Αρχική Πρόταση			Βελτιστοποίηση αριθμού υποστυλωμάτων			Βελτιστοποίηση αποστάσεων υποστυλωμάτων		
ag	0.085g	0.16g	ag	0.085g	0.16g	ag	0.085g	0.16g
Target Displ	0.0161	0.0323	Target Displ	0.0138	0.028	Target Displ	0.0178	0.0353
ID	Limit State		ID	Limit State		ID	Limit State	
385405	PZ	PZ	438283	PZ	PZ	472337	PZ	PZ
385407	AX	AX	438285	AX	AX	472339	AX	AX
385409	AX	AX	438287	AX	AX	472341	AX	AX
385411	PZ	PZ	438289	PZ	PZ	472343	PZ	PZ
385413	AX	AX	438291	AX	AX	472345	AX	AX
385415	AX	AX	438293	AX	AX	472347	AX	AX
385417	PZ	PZ	438295	PZ	PZ	472349	PZ	PZ
385419	AX	AX	438297	AX	AX	472351	AX	AX
385421	AX	AX	438299	AX	AX	472353	AX	AX
385423	PZ	PZ	438301	PZ	PZ	472355	PZ	PZ
385425	AX	AX	438303	AX	AX	472357	AX	AX
385427	AX	AX	438305	AX	AX	472359	AX	AX
385429	PZ	PZ	438307	PZ	PZ	472361	PZ	PZ
385431	AX	AX	438309	AX	PZ	472363	AX	AX
385433	AX	AX	438311	AX	AX	472365	AX	AX
385435	PZ	PZ	438313	PZ	PZ	472367	PZ	PZ
385437	AX	AX	438315	AX	PZ	472369	AX	PZ
385439	AX	AX	438317	AX	AX	472371	AX	AX
385441	PZ	PZ	438319	PZ	PZ	472373	PZ	PZ
385443	AX	AX	438321	AX	PZ	472375	AX	PZ
385445	AX	AX	438323	AX	AX	472377	AX	AX
385447	PZ	PZ	438325	PZ	PZ	472379	PZ	PZ
385449	AX	AX	438327	AX	PZ	472381	AX	PZ
385451	AX	AX	438329	AX	AX	472383	AX	AX
385453	PZ	PZ	438331	PZ	PZ	472385	PZ	PZ
385455	AX	AX	438333	AX	PZ	472387	AX	PZ
385457	AX	AX	438335	AX	AX	472389	AX	AX
385459	PZ	PZ	438337	PZ	PZ	472391	PZ	PZ
385461	AX	AX	438339	AX	PZ	472393	AX	PZ
385463	AX	AX	438341	AX	AX	472395	AX	AX
385465	PZ	PZ	438343	PZ	PZ	472397	PZ	PZ
385467	AX	PZ	438345	AX	PZ	472399	AX	PZ
385469	AX	AX	438347	AX	AX	472401	AX	AX
385471	PZ	PZ	438349	PZ	PZ	472403	PZ	PZ
385473	AX	PZ	438351	AX	PZ	472405	AX	PZ
385475	AX	AX	438353	AX	AX	472407	AX	AX
385477	PZ	PZ	438355	PZ	PZ	472409	PZ	PZ
385479	AX	AX	438357	AX	PZ	472411	AX	PZ
385481	AX	AX	438359	AX	AX	472413	AX	AX
385483	PZ	PZ	438361	PZ	PZ	472415	PZ	PZ

Σχήμα 47: Σύγκριση των αποτελεσμάτων κάθε λύσης της ανάλυσης για τα υποστυλώματα της κατασκευής της εφαρμογής 2

Αρχική Πρόταση			Βελτιστοποίηση αριθμού υποστυλωμάτων			Βελτιστοποίηση αποστάσεων υποστυλωμάτων		
ag	0.085g	0.16g	ag	0.085g	0.16g	ag	0.085g	0.16g
Target Displ	0.0161	0.0323	Target Displ	0.0138	0.028	Target Displ	0.0178	0.0353
ID	Limit State		ID	Limit State		ID	Limit State	
385057	PZ	PZ	437929	AX	PZ	472043	PZ	PZ
385059	PZ	PZ	437931	AX	PZ	472045	PZ	PZ
385061	PZ	PZ	437933	AX	PZ	472047	PZ	PZ
385063	PZ	PZ	437935	AX	PZ	472049	PZ	PZ
385065	PZ	PZ	437937	AX	PZ	472051	AX	PZ
385067	AX	PZ	437939	AX	PZ	472053	PZ	PZ
385069	PZ	PZ	437941	AX	PZ	472055	PZ	PZ
385071	PZ	PZ	437943	AX	PZ	472057	PZ	PZ
385073	PZ	PZ	437945	AX	PZ	472059	PZ	PZ
385075	PZ	PZ	437947	AX	PZ	472061	AX	PZ
385077	PZ	PZ	437949	AX	PZ	472063	PZ	PZ
385079	AX	PZ	437951	AX	PZ	472065	PZ	PZ
385081	PZ	PZ	437953	AX	PZ	472067	PZ	PZ
385083	PZ	PZ	437955	AX	PZ	472069	PZ	PZ
385085	PZ	PZ	437957	AX	PZ	472071	AX	PZ
385087	AX	PZ	437959	AX	PZ	472073	PZ	PZ
385089	PZ	PZ	437961	AX	PZ	472075	PZ	PZ
385091	AX	PZ	437963	AX	PZ	472077	PZ	PZ
385093	PZ	PZ	437965	AX	PZ	472079	PZ	PZ
385095	PZ	PZ	437967	AX	PZ	472081	AX	PZ
385097	PZ	PZ	437969	AX	PZ	472083	PZ	PZ
385099	AX	PZ	437971	AX	PZ	472085	PZ	PZ
385101	PZ	PZ	437973	AX	PZ	472087	PZ	PZ
385103	AX	PZ	437975	AX	PZ	472089	PZ	PZ
385105	PZ	PZ	437977	AX	PZ	472091	AX	PZ
385107	PZ	PZ	437979	AX	PZ	472093	AX	PZ
385109	PZ	PZ	437981	AX	PZ	472095	AX	PZ
385111	AX	PZ	437983	AX	PZ	472097	AX	PZ
385113	PZ	PZ	437985	AX	PZ	472099	AX	PZ
385115	AX	PZ	437987	AX	PZ	472101	AX	PZ
385117	AX	PZ	437989	AX	PZ	472103	AX	PZ
385119	AX	PZ	437991	AX	PZ	472105	AX	PZ
385121	AX	PZ	437993	AX	PZ	472107	AX	PZ
385123	AX	PZ	437995	AX	PZ	472109	AX	PZ
385125	AX	PZ	437997	AX	PZ	472111	AX	PZ
385127	AX	PZ	437999	AX	PZ	472113	AX	PZ
385129	AX	PZ	438001	AX	PZ	472115	AX	PZ
385131	AX	PZ	438003	AX	PZ	472117	AX	PZ
385133	AX	PZ	438005	AX	PZ	472119	AX	PZ
385135	AX	PZ	438007	AX	PZ	472121	AX	PZ

Σχήμα 48: Σύγκριση των αποτελεσμάτων κάθε λύσης της ανάλυσης για τις δοκούς της κατασκευής της εφαρμογής 2 παράλληλα με τη διαύθυνση του σεισμού



Σχήμα 49: Σύγκριση των ποσοστών των υποστυλωμάτων και των δοκών που βρίσκονται στις στάθμες 'Άμεση Χρήση' και 'Προστασία Ζωής' υπό τη δράση σεισμού με πιθανότητα υπέρβασης 50% στα 70 χρόνια για κάθε λύση του κτηρίου της εφαρμογής 2. Τα διαγράμματα 49i, 49ii, 49iii αναφέρονται στα υποστυλώματα, ενώ τα διαγράμματα 49iv, 49v, 49vi αναφέρονται στις δοκούς.





Σχήμα 50: Σύγκριση των ποσοστών των υποστυλωμάτων και των δοκών που βρίσκονται στις στάθμες 'Άμεση Χρήση' και 'Προστασία Ζωής' υπό τη δράση σεισμού με πιθανότητα υπέρβασης 10% στα 475 χρόνια για κάθε λύση του κτηρίου της εφαρμογής 1. Τα διαγράμματα 39i, 39ii, 39iii αναφέρονται στα υποστυλώματα, ενώ τα διαγράμματα 39iv, 39v, 39vi αναφέρονται στις δοκούς.

## Κεφάλαιο 8

# Συμπεράσματα και Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Σε αυτή τη διπλωματική εργασία εξετάστηκε η δυνατότητα παραμετροποίησης και βελτιστοποίησης του σχεδιασμού απλών μεταλλικών κατασκευών. Η παραμετρική προσομοίωση και ο παραμετρικός σχεδιασμός των κατασκευών έχουν σημαντικά πλεονεκτήματα στη διαδικασία της μελέτης και της υλοποίησης των έργων. Αποσκοπούν στην μείωση του κόστους των αλλαγών στο σχεδιασμό και έτσι παρέχουν τη δυνατότητα διερεύνησης περισσότερων εναλλακτικών λύσεων με στόχο την εύρεση της βέλτιστης. Ακόμα, η εργασία επιδιώκει τη συνεργασία της παραμετρικής σχεδίασης και της τεχνολογίας μοντέλων δομικών πληροφοριών αποσκοπώντας έτσι σε μία ολιστική προσέγγιση της διαδικασίας σχεδιασμού και υλοποίησης των κατασκευών.

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας έχουν γίνει ορισμένες απλοποιήσεις οι οποίες είναι σημαντικό να αναφερθούν προς αποφυγή παρεξηγήσεων σχετικά με τη μέθοδο και τα αποτελέσματα της ανάλυσης. Αρχικά, όπως γίνεται αντιληπτό από τα προσομοιώματα των φορέων των εφαρμογών που παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 7 δεν παρέχεται δυνατότητα προσθήκης κατακόρυφων συνδέσμων δυσκαμψίας στις αναλύσεις της εργασίας. Λόγω της απουσίας τους παρατηρείται η δημιουργία εύκαμπτων ορόφων στα αποτελέσματα των εφαρμογών. Οι κατακόρυφοι σύνδεσμοι δυσκαμψίας θα μπορούσαν να προστεθούν στις παραμέτρους του σχεδιασμού, παρόλα αυτά δεν κρίθηκε αναγκαίο, καθώς θα προσέθεταν μία πολυπλοκότητα που διαφεύγει από τα πλαίσια του σκοπού της εργασίας. Η εργασία εστιάζει περισσότερο στη δυνατότητα χρήσης του περιβάλλοντος σχεδίασης και ανάλυσης στην παραμετρική σχεδίαση και βελτιστοποίηση των κατασκευών. Ταυτόχρονα, θα πρέπει να αναφερθεί ότι στα πλαίσια της σχεδίασης και της βελτιστοποίησης μεταλλικών κτιρίων είναι απαραίτητος ο σχεδιασμός και η βέλτιστη σχεδίαση των συνδέσεων του φορέα που διαφεύγουν των αναλύσεων και των αποτελεσμάτων της παρούσας δουλειάς. Ακόμα, έχουν παραμεληθεί οι έλεγχοι των δεδομένων που εισάγονται μέσω παραθύρων διεπαφής με το χρήστη. Τα δεδο-

μένα θα πρέπει να εισάγονται με συγκεκριμένο τρόπο, ο οποίος υποδεικνύεται στο χρήστη και να είναι ορθά, ώστε να εκτελεστεί με επιτυχία η ανάλυση. Επίσης, κατά την ανάλυση των εφαρμογών του κεφαλαίου 7 εκτελείται η στατική ανελαστική ανάλυση της κατασκευής θεωρώντας τη διεύθυνση του σεισμού παράλληλη με την διεύθυνση X (όπως εισάγονται τα δεδομένα). Για την εξαγωγή αποτελεσμάτων κατά τη σεισμική δράση παράλληλα με την άλλη διεύθυνση του κτηρίου θα πρέπει να γίνει η εισαγωγή του μοντέλου του κτηρίου με ανεστραμμένες τις δύο διευθύνσεις. Τέλος, σχετικά με τη διαδικασία βελτιστοποίησης των κατασκευών, θα πρέπει να σημειωθεί το γεγονός ότι το μέγεθος του πληθυσμού στις υπό μελέτη κατασκευές του κεφαλαίου 7 είναι περιορισμένο λόγω της δυσκολίας των μέσων που χρησιμοποιήθηκαν για την εκπόνηση της εργασίας να ανταπεξέλθουν στην διαχείριση μεγάλων πληθυσμών. Υπό κανονικές συνθήκες ο αριθμός των ατόμων των πληθυσμών όφειλε να είναι έστω δεκαπλάσιος των μεταβλητών του σχεδιασμού της κάθε εφαρμογής.

Ως προς τα μέσα που χρησιμοποιήθηκαν για την υλοποίηση των σκοπών της εργασίας αξίζει να σημειωθούν ορισμένες διαπιστώσεις. Σχετικά με το περιβάλλον του Revit θα πρέπει να σημειωθεί ότι αποτελεί ένα από τα δημοφιλέστερα λογισμικά μοντέλων δομικών πληροφοριών και παρέχει τη δυνατότητα σύνδεσης με το λογισμικό Dynamo. Το Dynamo στοχεύει στο να είναι προσβάσιμο από άτομα είτε εξοικειωμένα με τον προγραμματισμό είτε όχι και παρέχει τη δυνατότητα συνεργασίας με αρχεία Python. Παρόλα αυτά, κατά την εκπόνηση της εργασίας υπήρξαν δυσκολίες στην εισαγωγή μερικών βιβλιοθηκών απαραίτητων για τη διαχείριση των δεδομένων της εργασίας και απαιτήθηκε η εκτέλεση των Python αρχείων εξωτερικά του λογισμικού του Dynamo μέσω της εκτέλεσης ορισμένων Αρχείων Δέσμης (Batch Files). Αυτή η δυσκολία κατέστησε περιπλοκότερη τη διαδικασία της ανάλυσης και αύξησε τον απαιτούμενο χρόνο για την εκτέλεσή της. Όσο για το μέρος της ανάλυσης της κατασκευής η χρήση του λογισμικού Openses κατέστησε εφικτή την αυτόματη προσομοίωση και εκτέλεση της στατικής ανελαστικής ανάλυσης μέσα από την εκτέλεση κατάλληλων αρχείων σε γλώσσα προγραμματισμού TCL. Τα αρχεία της ανάλυσης εκτελέστηκαν επίσης μέσα από την κλήση Αρχείων Δέσμης εντός του περιβάλλοντος του Dynamo χωρίς να απαιτείται κάποια επιπλέον ενέργεια από το χρήστη. Συμπεραίνεται, λοιπόν, ότι είναι εφικτή η συνεργασία των προγραμμάτων που επιλέχθηκαν για την εκπλήρωση των στόχων αυτής της διπλωματικής εργασίας, ωστόσο κρίνεται ότι θα ήταν χρήσιμο να υπάρξουν βελτιώσεις ως προς τη συμβατότητα των προγραμμάτων για τη μελέτη και το σχεδιασμό παραμετρικών κατασκευών.

Τέλος, θεωρώ πως υπάρχουν σημεία της εργασίας τα οποία έχουν περιθώριο για περαιτέρω διερεύνηση και εξέλιξη και θα μπορούσαν να αποτελέσουν αντικείμενο κάποιας μελλοντικής δουλειάς. Για παράδειγμα, η δυνατότητα προσομοίωσης και ανάλυσης φορέων πιο σύνθετης γεωμετρίας και η διερεύνηση διαδικασιών βελτιστοποίησης των διατομών των μελών της

---

κατασκευής είναι δύο σημεία που θα άξιζε να μελετηθούν. Επιπροσθέτως, οι διαδικασίες βελτιστοποίησης που παρουσιάστηκαν θα είχε νόημα να εξεταστούν για τις περιπτώσεις τυχαίας τοποθέτησης των υποστυλωμάτων και ποικιλίας μεταξύ των αποστάσεων των ανοιγμάτων σε κάθε διεύθυνση του φορέα. Ταυτόχρονα, η εισαγωγή συνδέσμων δυσκαμψίας που αναφέρθηκε παραπάνω θα πρόσφερε περισσότερο ρεαλιστικά αποτελέσματα στις αναλύσεις των κατασκευών.

## Βιβλιογραφία

Adam Slowik, H. K. (2020), ‘Evolutionary algorithms and their applications to engineering problems’, *Neural Computing and Applications* .

Baskar, N. (2015), ‘The history and evolution of civil engineering, from ancient civilizations to modern times’.

Casini, M. (2022), *Construction 4.0: Advanced Technology, Tools and Materials for the Digital Transformation of the Construction Industry*, Elsevier.

Daichao Sheng, Scott W. Sloan, A. J. A. (2002), ‘An automatic newton–raphson scheme’, *The International Journal of Geomechanics* **2**(4), 471–502.

Eleftheria Touloupaki, T. T. (2017), ‘Performance simulation integrated in parametric 3d modeling as a method for early stage design optimization’, *Energies* **10**(5), 637.

Enrico Spacone, Filip C. Filippou, F. F. T. (1996), ‘Fibre beam-column model for non-linear analysis of r/c frames: Part i. formulation’, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* **2**(25), 711–725.

F.Fedorik, T.Makkonen, R. (2016), 33rd international symposium on automation and robotics in construction, *in* ‘Integration of BIM and FEA in Automation of Building and Bridge Engineering Design’, ISARC, Auburn, Alabama, USA.

Gregory G. Deierlein, Andrei M. Reinhorn, M. R. W. (2010), ‘Nonlinear structural analysis for seismic design’.

Leslie, R. (2013), Race ’13, *in* ‘The Pushover Analysis, explained in its Simplicity’, SAINTGITS College of Engineering, Kottayam, India.

Olesen, J. R. (2018), ‘Intelligent optimization of steel structures in the early design phase through visual programming’.

Rahmani, M. (2014), ‘Optimo – optimization algorithm for dynamo’. Accessed: 2024-05-23.

**URL:** <https://dynamobim.org/optimo/>

Wikipedia (n.d.), 'Wikipedia, the free encyclopedia'. [Online; accessed 06-June-2024].

**URL:** <https://www.wikipedia.org/>

Αβραμίδης, (2017), Η φιλοσοφία του αντισεισμικού σχεδιασμού και το θεμελιώδες ερώτημα κατά την έναρξη της αντισεισμικής μελέτης, Οργανισμός Αντισεισμικού Σχεδιασμού και Προστασίας.

Γαντές, (2015), *Μη Γραμμική Συμπεριφορά των Κατασκευών*, Ελληνικά Ακαδημαϊκά Ηλεκτρονικά Συγγράματα.

Γεώργιος Σ. Παπαγεωργίου, (2015), *Αριθμητική Ανάλυση με εφαρμογές σε Mathematica και Matlab*, Τσότρας.

Ο.Α.Σ.Π. (2022), 'Κανονισμός Επεμβάσεων - 3η Αναθεώρηση', *Εφημερίδα της Κυβερνήσεως*.

Παρούσης-Ορθοδόξου, (2014), *Εξελικτικοί Αλγόριθμοι σε Πολύπλοκα Δίκτυα*, PhD thesis, Σχολή Οικονομίας Διοίκησης και Πληροφορικής, Πανεπιστήμιο Πελοποννήσου.

Προβατίδης, (2015), *Πεπερασμένα στοιχεία στην ανάλυση κατασκευών*, Τζιόλα.

Τομπουλίδης, (2018), 'Αντισεισμικός σχεδιασμός με βάση την επιτελεσματικότητα - Εφαρμογή προβλέψεων της νέας γενιάς Ευρωκώδικα 8 σε πρότυπη κτιριακή κατασκευή και σύγκριση με τη συμβατική μέθοδο σχεδιασμού'.

Τριανταφύλλου, (2006), 'Μη γραμμική ανάλυση και βέλτιστος σχεδιασμός καλωδιωτών φορέων'.

Φραγκιαδάκης, (2020), 'Αντισεισμική Τεχνολογία ii'. Σημειώσεις Διαλέξεων.