



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
**ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ :**

**Οι περιβαλλοντικές και οικονομικές επιπτώσεις της  
Δομικής Βελτιστοποίησης**



**ΔΟΥΡΙΔΑ ΖΩΗ**

**ΕΠΙΒΛΕΠΟΝΤΕΣ: ΛΑΓΑΡΟΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ, ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΕΜΠ**

**ΑΘΗΝΑ, 2023**

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ:

Με την ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας, ολοκληρώνεται και ο κύκλος φοίτησής μου στη Σχολή Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Είμαι ιδιαίτερα χαρούμενη που καθ' όλη την διάρκεια εκπόνησης της εργασίας μου, βρέθηκα υπό την καθοδήγηση από μια σειρά πολύ αξιόλογων ανθρώπων. Με την αφορμή αυτήν και ως ελάχιστη υποχρέωση, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά:

Τον επιβλέπονται της διπλωματικής μου εργασίας, Κ. Νικόλαο Λαγαρό, Κοσμήτορα της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π, τόσο για την ανάθεση της εργασίας , όσο και για την συνεργασία και την καθοδήγηση σε όλα τα στάδια υλοποίησης της.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Κ. Νικόλαο Καλλιώρα , για την πολύτιμη επιστημονική βοήθεια που μου παρείχε, καθώς και τον Κ. Γεώργιο Καζάκη που συνέβαλε τα μέγιστα για την εκπλήρωση του Proof of Concept (PoC).

Τα μέλη της Τριμελούς Επιτροπής Αξιολόγησης των Διπλωματικών Εργασιών, Κ. Σάββα Τριανταφύλλου, Λέκτορα της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π., και κ. Παύλο Θανόπουλο, Λέκτορα της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π. για τη συμμετοχή τους στην εξεταστική επιτροπή της εργασίας αλλά και για τις καλοπροαίρετες παρατηρήσεις και κριτικές τους.

Τέλος, μου είναι αδύνατο να μη δώσω τις θερμότερες ευχαριστίες μου στην οικογένειά μου, για την αγάπη, τα εφόδια, τις συμβουλές, την ηθική αλλά και υλική στήριξη τους καθ' όλη τη διάρκεια των μαθητικών και φοιτητικών μου χρόνων. Τους ευχαριστώ ειλικρινά για όλα.

Ζωή Δουρίδα,

Ιούνιος , 2023

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, πρόκειται να μελετηθεί και να αναδειχθεί η Δομική Βελτιστοποίηση και οι περιβαλλοντικές και οικονομικές επιπτώσεις που απορρέουν από την χρήση της. Για τον σκοπό αυτόν , δημιουργήθηκε ένα ερωτηματολόγιο, με περιεχόμενο που προσεγγίζει το θέμα της εργασίας αλλά και την εύρεση πιθανού ενδιαφερόμενου για την πραγματοποίηση ενός PoC. Η εργασία χωρίστηκε σε πέντε κεφάλαια :

Στο πρώτο κεφάλαιο, γίνεται αρχικώς μία γενική ανασκόπηση στην οποία αναφέρεται ο σκοπός της διπλωματικής εργασίας , ο στόχος της δομικής βελτιστοποίησης, γίνεται επίσης συνοπτική αναφορά στην μεθοδολογία που ακολουθήσαμε για την διερεύνηση του τρόπου εφαρμογής της Δομικής Βελτιστοποίησης.

Στο δεύτερο κεφάλαιο, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της βιβλιογραφικής ανασκόπησης, όπως αυτά προέκυψαν από την μελέτη ερευνών που σχετίζονται με το αντικείμενο που διερευνάται. Ουσιαστικά, αναφέρεται όλο το επιστημονικό υπόβαθρο που κρύβεται πίσω από την διπλωματική εργασία. Παρουσιάζεται η έννοια της Δομικής Βελτιστοποίησης, τα είδη της και η συνεισφορά της στον κατασκευαστικό τομέα.

Στο τρίτο κεφάλαιο, γίνεται η παρουσίαση και η ανάλυση του ερωτηματολογίου καθώς και τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την αποστολή του.

Στο τέταρτο κεφάλαιο, περιγράφεται η διαδικασία της βελτιστοποίησης, τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την πραγματοποίηση του PoC και η ανάλυση τους.

Στο πέμπτο και τελευταίο κεφάλαιο, γίνεται μια ανάλυση των αποτελεσμάτων , εξάγονται τα συμπεράσματα και παρουσιάζονται προτάσεις για περαιτέρω διερεύνηση του φαινομένου

Ζωή Δουρίδα,

Ιούνιος , 2023

## **ABSTRACT**

In this thesis, the Structural Optimization and the environmental and economic impacts resulting from its use will be studied and highlighted. For this purpose, a questionnaire was created with content that approaches the subject of the thesis and aims to identify potential stakeholders interested in conducting a Proof of Concept(PoC). The thesis is divided to five chapters.

Chapter 1 provides an initial overview, stating the purpose of the thesis and the objective of structural optimization. It also gives a brief reference to the methodology followed to explore the application of Structural Optimization.

Chapter 2 presents the results of the literature review, based on the study of research related to the investigated subject. Essentially, it covers the entire scientific background behind the thesis. The concept of Structural Optimization is introduced, including its types and contributions to the construction sector.

Chapter 3 presents the questionnaire and analyzes the results obtained from its administration.

Chapter 4 describes the optimization process, the results obtained from conducting the PoC, and their analysis.

Chapter 5, the final chapter, provides an analysis of the results, draws conclusions, and presents proposals for further investigation of the phenomenon.

Zoe Dourida,  
June , 2023

# Περιεχόμενα

<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup>: ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b> .....	7
1.1 ΓΕΝΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΙΣΗ-ΟΡΙΣΜΟΣ ΔΟΜΙΚΗΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ.....	7
1.2 ΣΤΟΧΟΣ ΔΟΜΙΚΗΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ .....	7
1.3 ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ-ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ.....	7
1.4 ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ .....	8
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup>: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ</b> .....	9
2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	9
2.2 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ.....	9
2.3 ΤΑ ΔΟΜΙΚΑ ΥΛΙΚΑ ΣΕ ΠΑΓΚΟΣΜΙΟ ΕΠΙΠΕΔΟ .....	10
2.4 ΔΟΜΙΚΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ VALUE ENGINEERING.....	16
2.5 ΤΥΠΟΙ ΔΟΜΙΚΗΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ .....	17
2.5.1 ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕΓΕΘΟΥΣ .....	17
2.5.2 ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΣΧΗΜΑΤΟΣ.....	17
2.5.3 ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΠΟΛΟΓΙΑΣ.....	17
2.5.4 ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΤΥΠΩΝ (Multi-objective optimization) : .....	18
2.6 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΑΠΟΔΟΣΗ ΤΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΑΞΙΑΣ. ....	19
2.7 ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗΣ ΑΝΑΖΗΤΗΣΗΣ.....	21
2.8 ΚΥΚΛΟΣ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ .....	22
2.9 ΕΡΓΑΛΕΙΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΔΟΜΙΚΗΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ .....	24
2.10 ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ .....	25
2.11 ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΕΣ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ .....	30
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup></b> .....	31
<b>ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΣΥΝΤΑΞΗ ΕΡΩΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟΥ</b> .....	31
3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	31
3.2 ΓΕΝΙΚΕΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ-ΑΝΑΛΥΣΗ.....	32
3.3 ΠΡΟΚΛΗΣΕΙΣ ΜΕΣΩ ΤΗΣ ΥΙΟΘΕΤΗΣΗΣ ΤΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ-ΑΝΑΛΥΣΗ.....	35
3.4 ΥΙΟΘΕΤΗΣΗ ΤΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΑΞΙΑΣ ΠΟΥ ΒΑΣΙΖΕΤΑΙ ΣΤΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ .....	39
3.5 ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΡΩΤΗΣΕΩΝ ΠΟΥ ΣΧΕΤΙΖΟΝΤΑΙ ΜΕ ΤΟ ΕΠΙΧΕΙΡΗΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ .....	45
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup>: Η ΑΠΟΤΥΠΩΣΗ ΤΗΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΣΤΗΝ ΠΡΑΞΗ (Proof of Concept) - ΤΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΟΥ ΠΡΟΕΚΥΨΑΝ</b> .....	50
4.1 ΓΕΝΙΚΑ .....	50
4.2 Η ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΤΗΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ .....	51

4.3 Αλγόριθμος PQN.....	61
4.4 ΑΠΟΤΥΠΩΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ΜΕΣΩ ΤΟΥ ETABS.....	66
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 <sup>ο</sup> : ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....	75
5.1 Συμπεράσματα .....	75
5.2 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα .....	76
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	77

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup>: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

### 1.1 ΓΕΝΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΙΣΗ-ΟΡΙΣΜΟΣ ΔΟΜΙΚΗΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ

Στην παρούσα εποχή της τεχνολογικής εξέλιξης, η κατασκευαστική βιομηχανία κάνει προσπάθειες να εστιάσει στην μείωση του κόστους και του βάρους της κατασκευής καθώς και σε ένα ικανοποιητικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα, εξασφαλίζοντας όμως την ποιότητα και την ασφάλεια στο ίδιο επίπεδο. Ο τρόπος για να επιτευχθούν τα παραπάνω γίνεται μέσω της διαδικασίας της βελτιστοποίησης του μεγέθους, του σχήματος και της τοπολογίας της κατασκευής. Γενικά, η βελτιστοποίηση είναι η διαδικασία ανάπτυξης μιας δραστηριότητας με τον βέλτιστο τρόπο, όσο το δυνατόν πιο αποτελεσματικά, με το ελάχιστο πόσο πόρων και σε συντομότερο δυνατό χρονικό διάστημα.

### 1.2 ΣΤΟΧΟΣ ΔΟΜΙΚΗΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ

Ειδικότερα, η Δομική Βελτιστοποίηση είναι ένας κλάδος που ασχολείται με τον βέλτιστο σχεδιασμό μηχανικών κατασκευών που φέρουν φορτίο. Ο στόχος μπορεί να είναι η ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους της κατασκευής που υπόκειται σε περιορισμούς στις μετατοπίσεις και τις τάσεις στην κατασκευή υπό τα δεδομένα φορτία. Προκειμένου να επιτευχούμε σε αυτό το πρόβλημα αριθμητικά, ο τομέας σχεδιασμού διακρίνεται από ένα μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων. Θεωρεί λοιπόν ένα «διακριτοποιημένο σύμπαν» στο οποίο για κάθε ξεχωριστό διακριτό σημείο, δηλαδή πεπερασμένο στοιχείο, θα πρέπει να αποφασιστεί αν θα τοποθετηθεί υλικό εκεί ή όχι! Στόχος της δομικής βελτιστοποίησης είναι η ανάπτυξη μαθηματικών μοντέλων και αποτελεσματικών μεθόδων αριθμητικής βελτιστοποίησης.

### 1.3 ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ-ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι να αναδειχθεί η βελτιστοποίηση των κατασκευών, τις θετικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις αυτής και τα άμεσα οικονομικά οφέλη που απορρέουν από την εφαρμογή της. Σε πρώτη φάση, δημιουργήθηκε ένα ερωτηματολόγιο με σκοπό να εξετάσουμε ορισμένα ζητήματα. Απευθυνθήκαμε σε πιθανούς δέκτες με σκοπό να δούμε κατά πόσο η όχι είναι εξοικειωμένοι με την έννοια της Δομικής Βελτιστοποίησης, εάν χρησιμοποιούν ήδη κάποιο μοντέλο προσομοίωσης της βελτιστοποίησης, και τέλος εάν τους ενδιαφέρει η συνεργασία με το ίδρυμα μας. Το τελευταίο πραγματοποιήθηκε μέσω της μεθόδου PoC(Proof of concept), όπου ειδικότερα τα αποτελέσματα θα τα αναλύσουμε σε επόμενο κεφάλαιο. Όπως λοιπόν εξηγήθηκε και παραπάνω, συμπερασματικά η δομή του ερωτηματολογίου βασίζεται στην συλλογή των εξής πληροφοριών:

1. Γενικές πληροφορίες της εταιρείας που απευθυνόμαστε.
2. Ενσωμάτωση της καινοτόμου αυτής μεθόδου στον κατασκευαστικό τομέα.
3. Τρόποι υιοθέτησης της μηχανικής αξίας μέσω της βελτιστοποίησης.
4. Ερωτήσεις σχετικά με το επιχειρησιακό μέρος.

Η συλλογή των απαντήσεων του ερωτηματολογίου μας οδηγεί και στην αναζήτηση των υποψήφιων συνεργατών μας που όπως θα δούμε και παρακάτω προχωρήσαμε σε εφαρμογή της βελτιστοποίησης του Δομικού Σχεδιασμού που προτείνει το ίδρυμα μας.

#### 1.4 ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Στο υποκεφάλαιο αυτό περιγράφεται συνοπτικά το περιεχόμενο των κεφαλαίων της εργασίας παραθέτοντας το βασικό στόχο του καθενός χωριστά.

Στο **κεφάλαιο 1**, γίνεται αρχικώς μία γενική ανασκόπηση στην οποία αναφέρεται η έννοια της Βελτιστοποίησης και η χρήση αυτής στα μέσα του 20<sup>ου</sup> αιώνα όπου άρχισε κιόλας να αποκτά υπόσταση χάρι στην δυνατότητα των ηλεκτρονικών υπολογιστών να εφαρμόζουν αλγορίθμους βελτιστοποίησης. Ύστερα από την σύντομη ιστορική αναδρομή, η βελτιστοποίηση κάνει αισθητή σιγά-σιγά την παρουσία της και στον κατασκευαστικό τομέα, με σκοπό να περιορίσει τόσο το περιβαλλοντικό όσο και το οικονομικό αποτύπωμα. Στο τέλος του κεφαλαίου καταλήγουμε στην ανάλυση του στόχου της εργασίας. Γίνεται επίσης συνοπτική αναφορά στην μεθοδολογία που ακολουθήσαμε για την διερεύνηση του τρόπου εφαρμογής της Δομικής Βελτιστοποίησης.

Στο **κεφάλαιο 2**, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της βιβλιογραφικής ανασκόπησης, όπως αυτά προέκυψαν από την αναζήτηση ερευνών με παρεμφερές αντικείμενο. Ουσιαστικά, αναφέρεται όλο το επιστημονικό υπόβαθρο που κρύβεται πίσω από την διπλωματική εργασία. Παρουσιάζεται η έννοια της Δομικής Βελτιστοποίησης, τα είδη της και η συνεισφορά της στον κατασκευαστικό τομέα.

Στο **κεφάλαιο 3**, γίνεται η παρουσίαση και η ανάλυση του ερωτηματολογίου καθώς και τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την αποστολή του.

Στο **κεφάλαιο 4**, περιγράφεται η διαδικασία της βελτιστοποίησης, τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την πραγματοποίηση του PoC και η ανάλυση τους.

Στο **κεφάλαιο 5**, αναγράφονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν στην παρούσα διπλωματική, με μια πιο ολιστική προσέγγιση.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup>: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

### 2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

“Τίποτα δεν συμβαίνει στο σύμπαν χωρίς να εμφανίζεται ο κανόνας του μέγιστου ή του ελάχιστου” όπως είπε ο γνωστός μαθηματικός Leonhard Euler. Διάσημοι μαθηματικοί όπως είναι ο Kepler, Newton, Lagrange, και ο Cauchy ασχολήθηκαν με την έννοια της βελτιστοποίησης και των αλγορίθμων που την εξυπηρετούν, ενώ η έννοια της ελαχιστοποίησης αρκετά νωρίτερα, στα χρόνια του Ευκλείδη. Η έννοια της βελτιστοποίησης ξεκίνησε να ανθίζει όταν και οι ηλεκτρονικοί υπολογιστές άρχισαν να εφαρμόζουν αλγορίθμους βελτιστοποίησης, γύρω στα μέσα του 20<sup>ου</sup> αιώνα. Παρόλα αυτά οι δομοστατικοί μηχανικοί κρατούσαν τις επιφυλάξεις τους, καθώς όπως θα δούμε και παρακάτω τα λογισμικά που διέθετε η αγορά τότε δεν εξυπηρετούσαν τις ανάγκες τους. Στις μέρες μας, η διαθεσιμότητα των εργαλείων διαχείρισης της Δομικής Βελτιστοποίησης είναι σίγουρα μεγαλύτερη καθώς επίσης και ο ανταγωνισμός της κατασκευαστικής βιομηχανίας. Το γεγονός αυτό δημιουργεί ενδιαφέρον για έρευνα γύρω από την Δομική Βελτιστοποίηση και πολλά αναπάντητα ερωτήματα που θα διερευνηθούν στην παρόν κεφάλαιο. (Lagaros, 2018)

### 2.2 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ

Παλιότερα, οι ερευνητές και οι μελετητές οποιουδήποτε κλάδου δεν διέθεταν το απαραίτητο γνωστικό επίπεδο που χρειαζόνταν για να πραγματοποιήσουν την ερευνά τους με όσο το δυνατόν μειωμένες αποκλίσεις. Γνωστή είναι και η εντισονική προσέγγιση (Edisonian Approach 2017), όπου ο Τόμας Έντισον δεν διέθετε το γνωστικό αντικείμενο για το οποίο διαφορετικά υλικά αντιστέκονται στον ηλεκτρισμό. Παρόλα αυτά κατάφερε να σχεδιάσει και να κατασκευάσει, το 1879, την πρώτη ανθεκτική υψηλής ποιότητας φωτεινή σφαίρα. Οι σημερινοί μηχανικοί διαθέτουν τον απαραίτητο εξοπλισμό και την εμπειρία ώστε να μην παρεκκλίνουν από τον αρχικό σχεδιασμό τους και με βάση την διαίσθησή τους να μειώσουν τις πιθανότητες αστοχίας σε κάθε επίπεδο. Η διαδικασία αυτή αναφέρεται και ως “make it and break it”. Το εργαλείο που πυροδότησε το έργο των μηχανικών και έδωσε λύσεις σε προβλήματα που παλιότερα δημιουργούσαν εμπόδια δεν είναι άλλο από τον ηλεκτρονικό υπολογιστή. Η συνεχής εκπαίδευση των μηχανικών ως προς την χρήση των υπολογιστών αλλά και των καινοτόμων πακέτων λογισμικού μηχανικής μειώνουν το χάσμα μεταξύ μηχανικού και ενδιαφερόμενου. Ο τελευταίος διαθέτει πλήρη εικόνα της δουλειάς του μηχανικού μέσω εικονικών προσομοιώσεων και σχεδίων, προτού καν ξεκινήσει η διαδικασία υλοποίησης. Η διαδικασία αυτή ωφελεί και τις δυο πλευρές και βοηθά στην εξοικονόμηση χρόνου, κόστους αλλά και περιβαλλοντικού αποτυπώματος. (Lagaros, 2018)

Από την άλλη, η αποτύπωση της ιδέας εικονικά περιορίζεται από δυο παράγοντες. Πρώτον, η απαίτηση ύπαρξης ενός μηχανικού για να αναπτύξει ή να τροποποιήσει τον αντίστοιχο αλγόριθμο χειροκίνητα ελλοχεύει κινδύνους που συχνά είναι συνυφασμένοι με εσφαλμένη

και χρονοβόρα διαδικασία. Δεύτερον, το αποτέλεσμα μιας σχεδιαστικής και κατ' επέκταση εκτελεστικής διαδικασίας είναι απόρροια ενός περίπλοκου συστήματος. Αυτό προϋποθέτει την άριστη οργάνωση και τεχνογνωσία της ομάδας. Συμπερασματικά, σκοπός είναι ο συνεχής έλεγχος της διαδικασίας με σκοπό οι δυο παράγοντες που προαναφέρθηκαν να περιορίζονται.(Lagaros, 2018)

Ως αποτέλεσμα, το ανταγωνιστικό κλίμα της εποχής και οι παράγοντες περιορισμού που προαναφέρθηκαν, έφεραν στην επιφάνεια την καινοτόμο διαδικασία της αυτοματοποιημένης Δομικής Βελτιστοποίησης. Μια αυτοματοποιημένη μέθοδο όπου μέσα από επαναλήψεις σχεδιασμού μας δίνει το βέλτιστο αποτέλεσμα. Δημιουργήθηκαν έτσι πακέτα λογισμικού βασισμένα στη αυτοματοποίηση, που προσφέρουν την επιλογή σχεδιασμού με πιο γρήγορους ρυθμούς, με μειωμένο κόστος και χωρίς ανησυχία για χειροκίνητα σφάλματα. Η αύξηση της ποιότητας προϊόντων, διατηρώντας την απόδοση και την αξιοπιστία στο ίδιο επίπεδο καθιστά ακόμα πιο ανταγωνιστική την αυτοματοποίηση στον χώρο της Δομικής Βελτιστοποίησης. Σαν αποτέλεσμα, η άμεση αγορά αλγορίθμων βελτιστοποίησης αλλάζει χαρακτήρα. Η αυτόματη επαναληπτική διαδικασία είναι υπεύθυνη και για την αξιολόγηση σχεδιασμού αλλά και ολοκλήρωσης ενός έργου δημιουργώντας όλο και πιο ολοκληρωμένα και ανεξάρτητα προϊόντα.(Lagaros, 2018)

Η Δομική Βελτιστοποίηση ή η χρήση τεχνικών αριθμητικής βελτιστοποίησης για το σχεδιασμό κατασκευών αποδοτικών περιβαλλοντικά, αλλά και οικονομικά αποδοτικών κατασκευών, έχει μεγάλες δυνατότητες για τον κατασκευαστικό τομέα(KT). Ο κατασκευαστικός κλάδος είναι υπεύθυνος για ένα μεγάλο μερίδιο της παγκόσμιας κατανάλωσης φυσικών πόρων και η διαρθρωτική βελτιστοποίηση μπορεί να συμβάλει στην μείωση αυτού, βελτιώνοντας έτσι την βιωσιμότητα του τομέα. Επιπλέον, η Δομική Βελτιστοποίηση έχει τη δυνατότητα να μειώσει όχι μόνο το κόστος κατασκευής, αλλά και το κόστος μηχανικής, αυτοματοποιώντας την επαναλαμβανόμενη εργασία του μεγέθους δομικών μελών. Αξίζει ακόμα να σημειωθεί, ότι η Δομική Βελτιστοποίηση μπορεί να δώσει λύσεις για συγκεκριμένα εξαρτήματα ή υλικά.(Kamat, 1993; Kirsch, 2012)

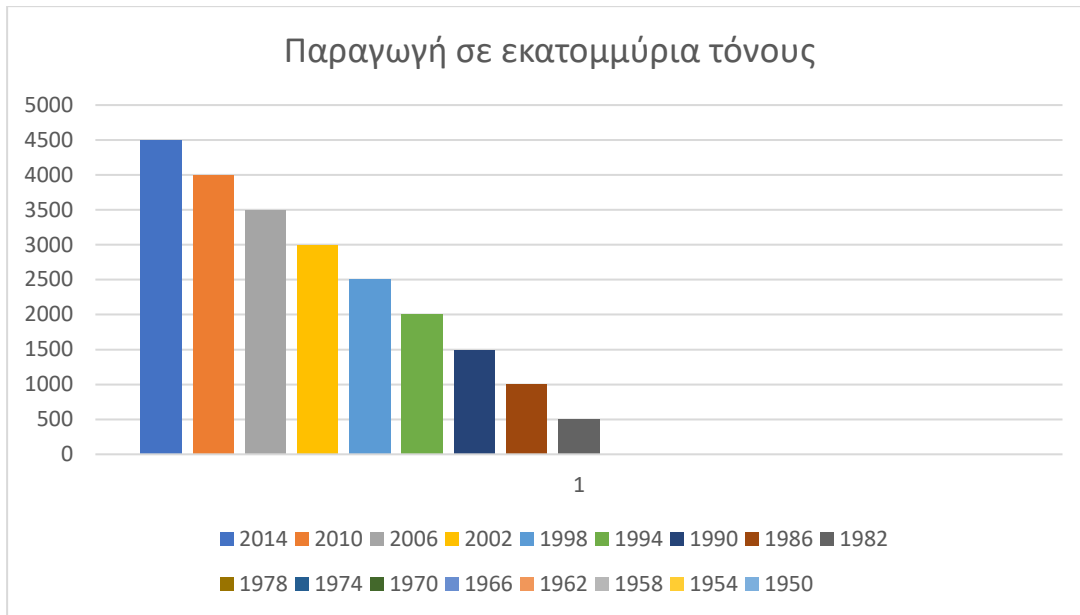
### 2.3 ΤΑ ΔΟΜΙΚΑ ΥΛΙΚΑ ΣΕ ΠΑΓΚΟΣΜΙΟ ΕΠΙΠΕΔΟ

Στα πλαίσια σχεδιασμού μιας κατασκευής εξετάζονται και οι ποσότητες των δομικών υλικών που απαιτούνται ετησίως αλλά και από την κατασκευαστική βιομηχανία, με σκοπό τον καθορισμό της τεχνοοικονομικής ανάλυσης του κάθε έργου. Ειδικότερα, αποδεδειγμένες μελέτες δείχνουν την εξέλιξη της παραγωγής τσιμέντου για τα έτη 1950 έως 2016 όπως αναφέρεται από την US Geological Survey(εικόνα 1). Οι χώρες που ενισχύουν την παραγωγή τσιμέντου για τα έτη 1967,2000,2016 φαίνονται στις εικόνες 2-4, όπου η συνολική παραγωγή τους ήταν 563,1200 και 4200 εκατομμύρια τόνους, αντίστοιχα. Με τον ίδιο τρόπο παρουσιάζονται τα δεδομένα για την παγκόσμια παραγωγή χάλυβα για τα έτη 1950 έως 2016 όπως αναφέρεται από την World Steel Association(Σχήμα 5). Η παραγωγή του χάλυβα για τα έτη 1967, 2000 και 2016 φαίνεται στα σχήματα 6-7, όπου η συνολική παραγωγή για τα συγκεκριμένα έτη ήταν ίση με 493,850 και 1630 εκατομμύρια

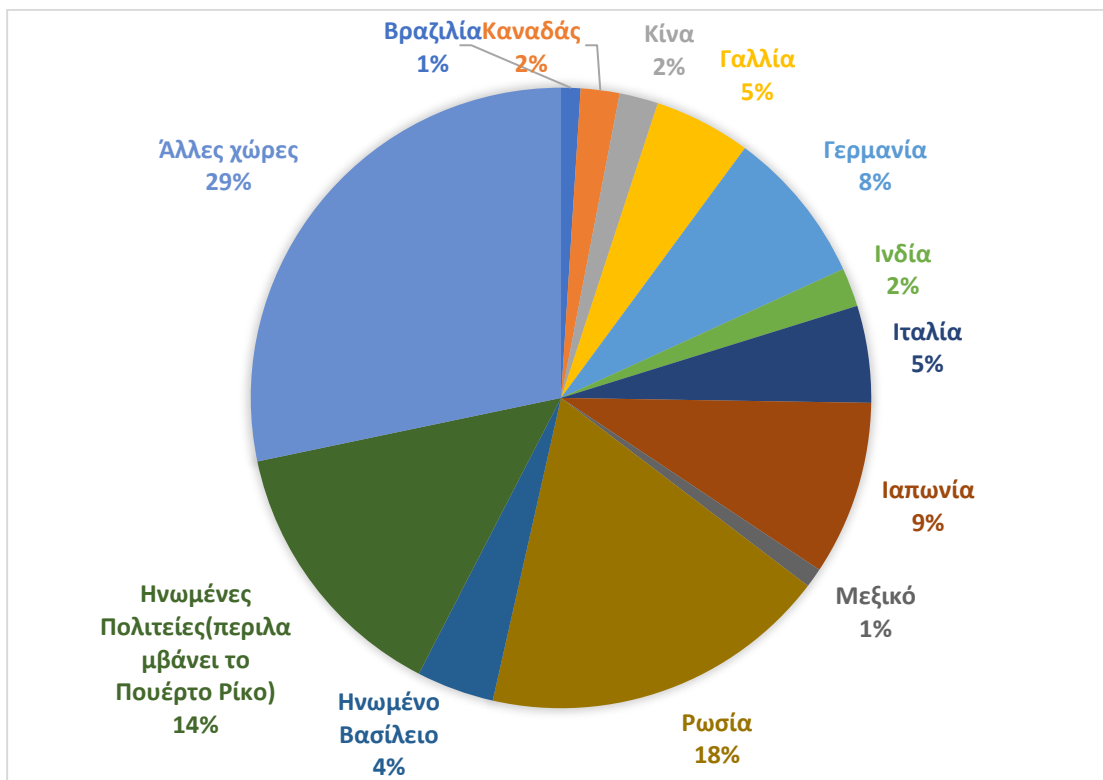
τόνους, αντίστοιχα. Πολλά περιβαλλοντικά προβλήματα προκύπτουν από την κακή χρήση πόρων. (Lagaros, 2018)

Αυτό επιβεβαιώνεται, αν σκεφτεί κανείς ότι στην Ευρώπη περισσότερο από το 30%-50% της συνολικής χρήσης υλικών πηγαίνει στην στέγαση, που αποτελείτε κυρίως από χάλυβα, σκυρόδεμα, αλουμίνιο, χαλκό, χαλίκι, ασβεστόλιθο, άργιλο, άμμο, ξύλο και οικοδομική πέτρα. Έτσι προκύπτει το συμπέρασμα ότι σχεδόν η συνολική παραγωγή τσιμέντου καταναλώνεται από την κατασκευαστική βιομηχανία, ενώ η παγκόσμια ζήτηση σε χάλυβα αντιπροσωπεύει παραπάνω από το ήμισυ της συνολικής ζήτησης. Αξίζει να σημειωθεί ότι σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή Ένωση τσιμέντων, που είναι και η αντιπροσωπευτική οργάνωση της τσιμεντοβιομηχανίας στην Ευρώπη, το 75% της κατασκευαστικής δραστηριότητας σχετίζεται με κτίρια. Έρευνες δείχνουν ότι η χρήση των υλικών θα αυξηθεί, ως άμεσο αποτέλεσμα της αύξησης της ανερχόμενης κινέζικης βιομηχανίας αλλά και της αύξησης της αγοραστικής δύναμης στις αναδυόμενες οικονομίες και στις αναπτυσσόμενες χώρες, οι οποίες αναμένεται να διπλασιάσουν την δομημένη τους επιφάνεια έως το 2050. Η αύξηση αυτή έχει ως απόρροια την επιπλέον αύξηση της ενέργειας και τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου. Στο σχήμα 9 φαίνονται οι προβλέψεις που αφορούν την δομημένη επιφάνεια του περιβάλλοντος για τα έτη 2030 και 2050 αντίστοιχα, σύμφωνα με το United Nations Environment Programme (UNEP). Αναλυτικότερα, σε παγκόσμιο επίπεδο από 232,4 δισεκατομμύρια τετραγωνικά μέτρα το 2016 αναμένεται ότι θα ανέρχεται σε 315,5 και 415,1 δισεκατομμύρια μέτρα για τα έτη 2030 και 2050 αντίστοιχα. Η χρήση του σκυροδέματος προβλέπεται να φτάσει τέσσερις φορές τα επίπεδα του 1990. Η παγκόσμια ζήτηση για το έτος 2016 ισούται με 1515 εκατομμύρια μετρικούς τόνους ενώ οι αριθμοί για το 2017 και το 2018 εκτιμάται ότι θα ισοδυναμούν με 1535 και 1549 εκατομμύρια μετρικούς τόνους, αντίστοιχα. (Lagaros, The environmental and economic impact of Structural Optimization, 2018)

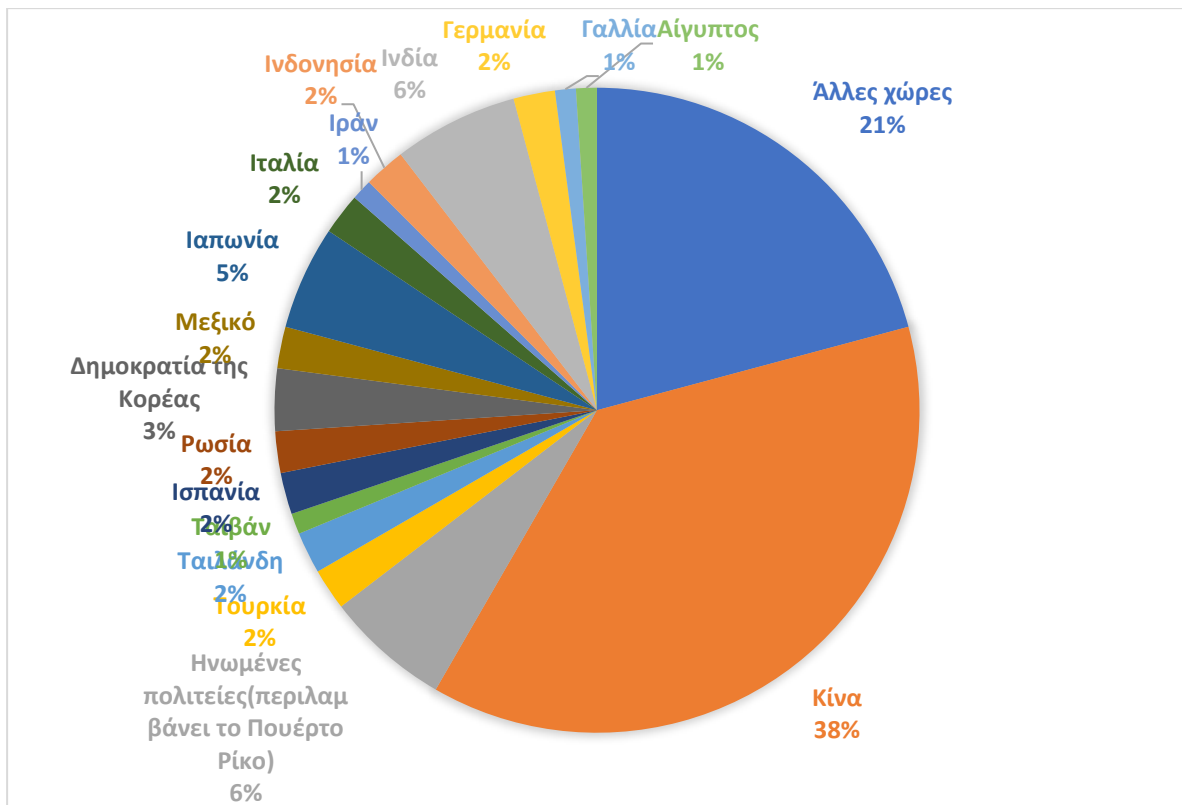
Ο Karen Scrivener, επικεφαλής του εργαστηρίου κατασκευών στο Ελβετικό Ομοσπονδιακό Ινστιτούτο της Technology, εξηγεί στο άρθρο του J.M Crow το 2008 ότι: "Ο λόγος που χρησιμοποιείται τόσο πολύ το σκυρόδεμα είναι επειδή στην πραγματικότητα είναι ένα υλικό πολύ χαμηλής πρόσκρουσης", ενώ "Αν αντικαταστήσεις μπετόν με οποιοδήποτε άλλο υλικό, θα έχει μεγαλύτερο αποτύπωμα σε άνθρακα. Σε ένα γενικό πλαίσιο, υπάρχει η πεποίθηση ότι αν χτίζαμε αντικαθιστώντας το σκυρόδεμα κυρίως από χάλυβα θα ήταν πιο ωφέλιμο, στην πραγματικότητα αυτό όμως δεν ισχύει. Αυτό συμβαίνει γιατί η ποσότητα του σκυροδέματος που χρειάζεται είναι πολύ μεγάλη και άρα το περιβαλλοντικό αποτύπωμα αντίστοιχο". Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι η διαδικασία αυτή δεν είναι απλή και απαιτεί συλλογική συντονισμένη προσπάθεια με σκοπό την καλύτερη ενεργειακή απόδοση παγκοσμίως. (Lagaros, 2018)



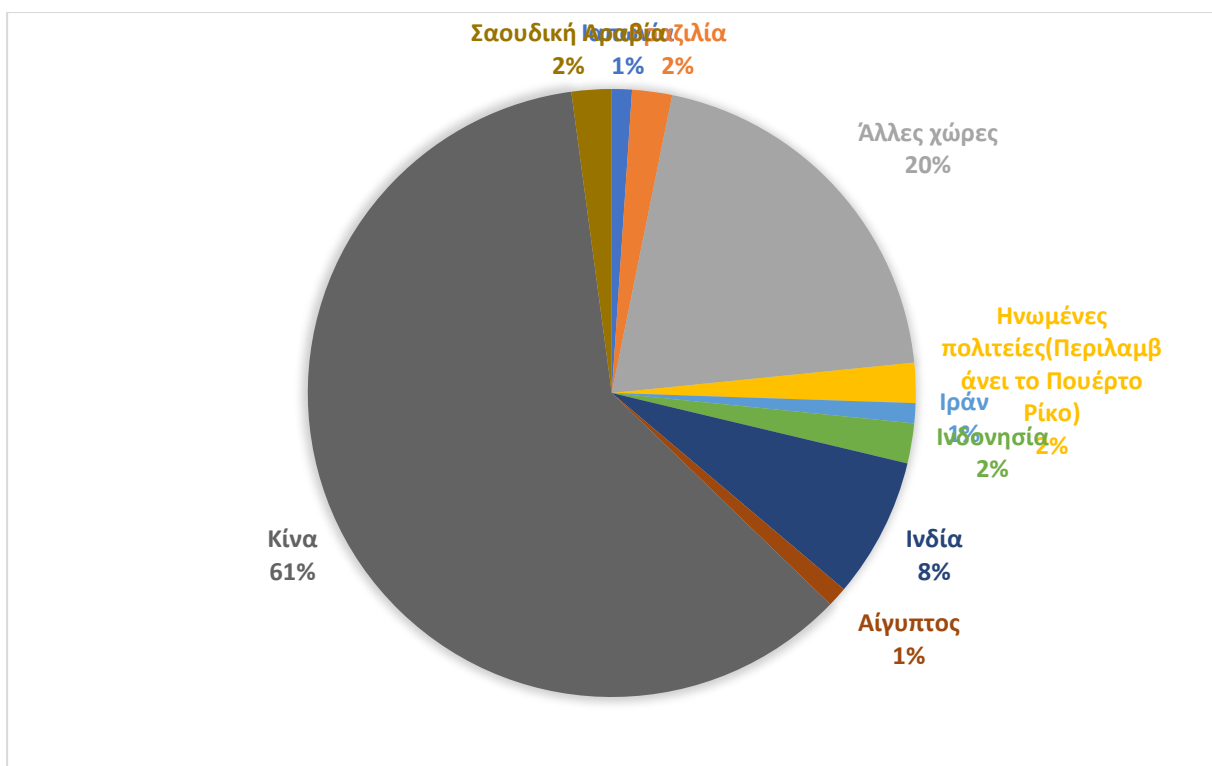
Σχήμα 1. Παραγωγή τσιμέντου παγκοσμίως 1950-2016.



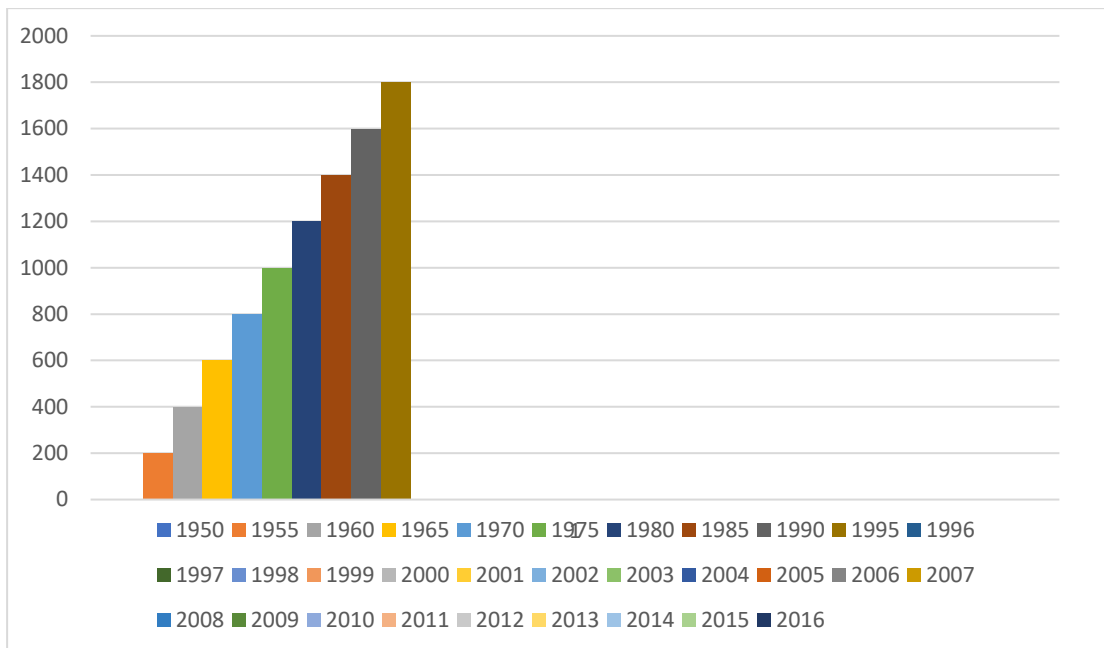
Σχήμα 2. Κύριες χώρες στην παραγωγή τσιμέντου για το έτος 1967 (σύνολο 563 εκατομμύρια τόνους).



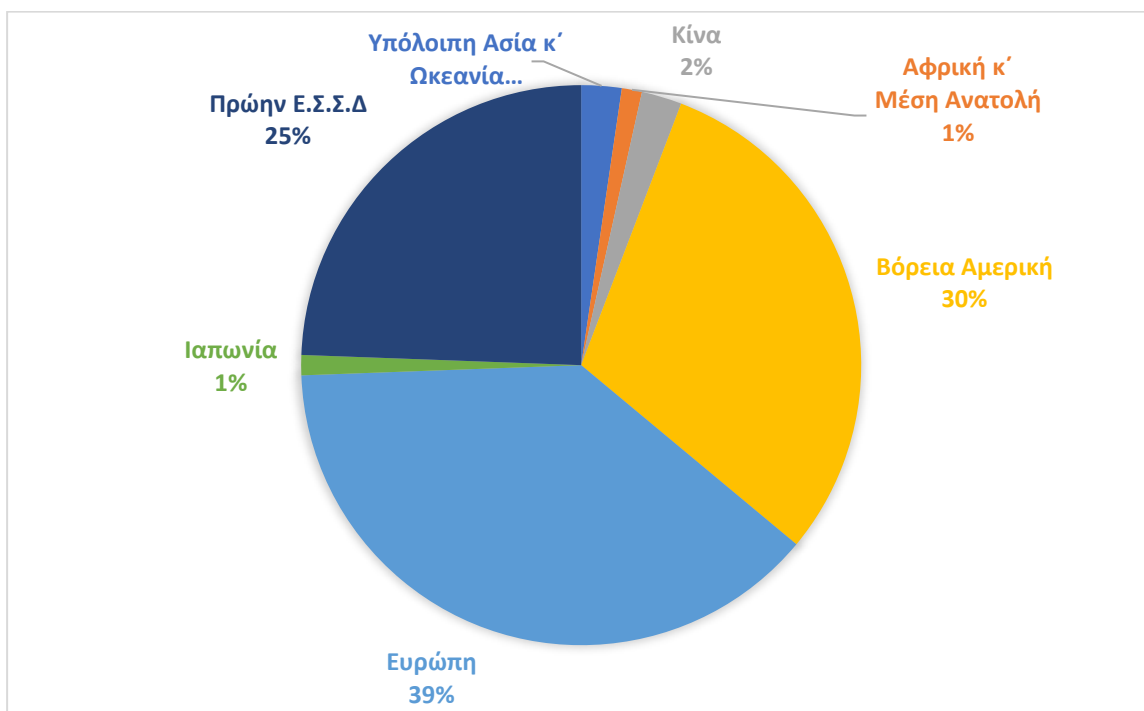
Σχήμα 3. Κύριες χώρες στην παραγωγή τσιμέντου για το έτος 2000 (σύνολο 1600 εκατομμύρια τόνους).



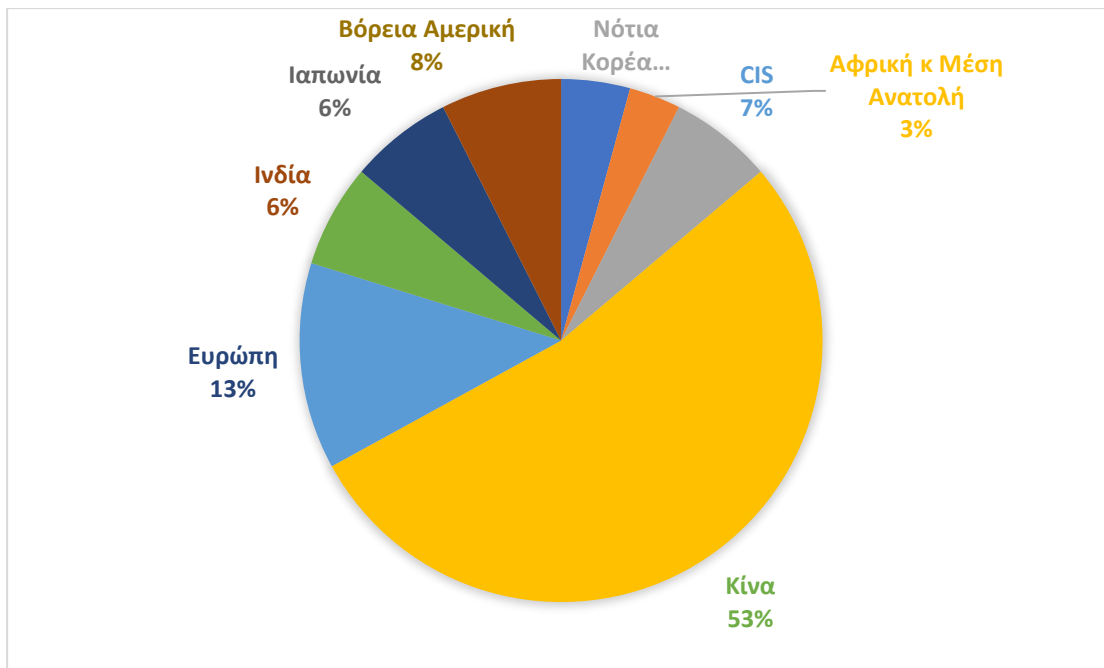
Σχήμα 4. Κύριες χώρες στην παραγωγή τσιμέντου για το έτος 2016 (σύνολο 4200 εκατομμύρια τόνους).



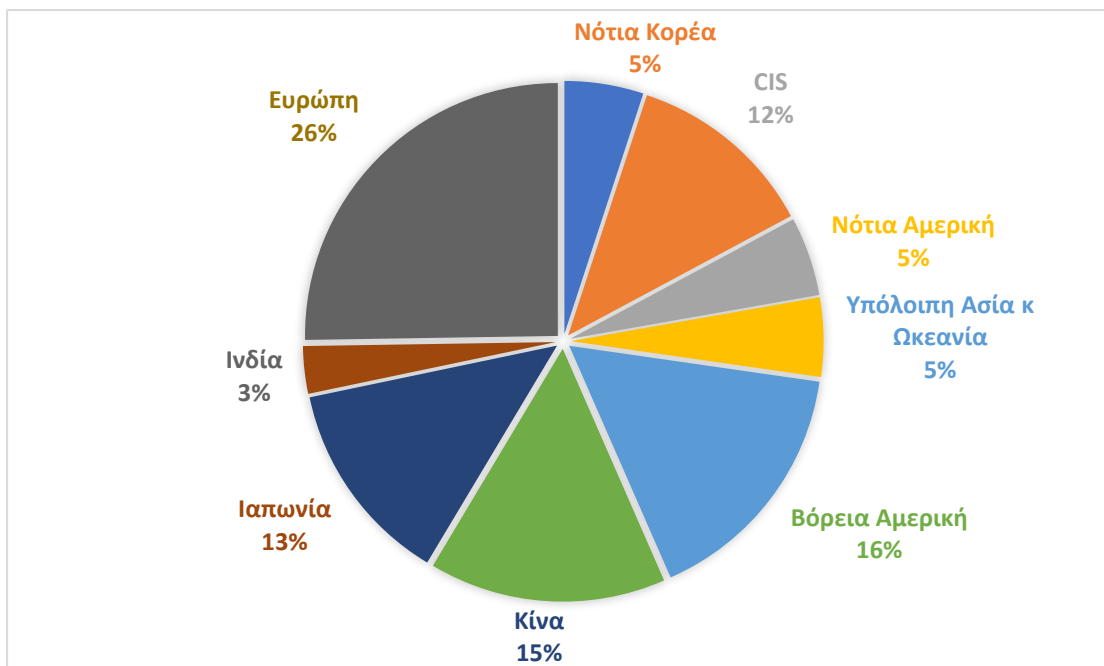
Σχήμα 5. Παραγωγή χάλυβα παγκοσμίως 1950-2016.



Σχήμα 6. Κύριες χώρες στην παραγωγή χάλυβα για το έτος 1967 (σύνολο 493 εκατομμύρια τόνους).



Σχήμα 7. Κύριες χώρες στην παραγωγή χάλυβα για το έτος 2000 (σύνολο 850 εκατομμύρια τόνους).



Σχήμα 8. Κύριες χώρες στην παραγωγή χάλυβα για το έτος 2016 (σύνολο 1630 εκατομμύρια τόνους)

## 2.4 ΔΟΜΙΚΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ VALUE ENGINEERING

Η έννοια της λατινικής λέξης “optimum” σημαίνει απόλυτο-ιδανικό. Άρα η λέξη “optimus” σημαίνει ακόμα καλύτερο. Γενικότερα, η βελτιστοποίηση αναφέρεται στην διαδικασία όπου κάτι πλησιάζει την τελική του μορφή. Η ιστορία της Βελτιστοποίησης, δηλαδή η αναζήτηση για την εύρεση ακραίων σημείων, χρονολογείται αρκετές εκατοντάδες χρόνια κατά την διάρκεια των οποίων έχουν σημειωθεί μεγάλος αριθμός καινοτόμων και αποτελεσματικών μεθόδων. Πιο συγκεκριμένα, ο Ευκλείδης(300 π.Χ.) ασχολήθηκε με το πρόβλημα της εύρεσης της μικρότερης απόστασης μεταξύ σημείων, ο Ήρων της Αλεξάνδρειας(100 π.Χ.) μελέτησε το πρόβλημα βελτιστοποίησης του φωτός που ταξιδεύει μεταξύ δύο σημείων από το συντομότερο μονοπάτι(Russo 2004). Πολλά χρόνια αργότερα, ο Fermat(1657) ανέπτυξε μια γενικότερη αρχή ότι το φως ταξιδεύει μεταξύ δύο βαθμών στον ελάχιστο χρόνο (Veselago 2002), ενώ ο Cauchy (1847) παρουσίασε την πρώτη μέθοδο ελαχιστοποίησης, γνωστή και ως μέθοδος Steepest Descent. Η ανάπτυξη των πακέτων που διέθεταν αλγορίθμους ήταν η βάση για την ανάπτυξη της μαθηματικής θεωρίας βελτιστοποίησης. Το πρωτοποριακό. Μερικά ακόμα παραδείγματα είναι τα εξής : τα πρωτοποριακά έργα του Courant(1943),Dantzig( 1951) για τον γραμμικό προγραμματισμό, Karush (1939) καθώς και των Kuhn και Tucker( 1951) σχετικά με τις συνθήκες βελτιστοποίησης για περιορισμένα προβλήματα καθιέρωσαν την σύγχρονη εποχή της αριθμητικής βελτιστοποίησης. (University)(Bendsøe, 1995; Bendsøe et al., 1994)

Ο όρος Δομική Βελτιστοποίηση όμως αφορά την εφαρμογή αριθμητικών μεθόδων βελτιστοποίησης που αφορούν την διαδικασία σχεδιασμού στον κτηριακό τομέα. Συγκεκριμένα, σύμφωνα με τον λογισμό των παραλλαγών (Rozvany 1989), σχεδιάζονται με τον βέλτιστο τρόπο τα δομικά στοιχεία της εκάστοτε κατασκευής και έτσι προτού εφαρμοστεί η διαδικασία βελτιστοποίησης με την βοήθεια των ηλεκτρονικών υπολογιστών, έχουμε προσομοίωση του αποτελέσματος που επιθυμούμε. Η μέθοδος του πεπερασμένου στοιχείου, μέθοδος FEM(Αργύρης 1955), ήταν η αιτία για την κυριαρχία της μηχανογραφικής δομικής ανάλυσης και επέτρεψε την εφαρμογή διαδικασιών αριθμητικής βελτιστοποίησης που έχουν ως βάση πεπερασμένα στοιχεία σε δομές. Ο Schmit στο πρωτοποριακό του έργο (Schmit 1960), παρουσίασε την πρώτη εφαρμογή όπου ένα απλό τρίποδο ζευκτό χρησιμοποιήθηκε για την παρουσίαση της ιδέας της δομικής σύνθεσης. Στα πρώτα χρόνια της μηχανογραφικής βελτιστοποίησης των δομικών στοιχείων, χρησιμοποιήθηκαν δομές ζευκτών πολιτικού μηχανικού για την εφαρμογή της νέας ιδέας, με μεταβλητές σχεδιασμού να είναι οι περιοχές διατομής των στοιχείων της ράβδου.



## 2.5 ΤΥΠΟΙ ΔΟΜΙΚΗΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ

Η Δομική Βελτιστοποίηση μπορεί να διακριθεί σε τρεις διακριτούς κλάδους: Βελτιστοποίηση μεγέθους, Βελτιστοποίηση σχήματος και Βελτιστοποίηση τοπολογίας.

### 2.5.1 ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕΓΕΘΟΥΣ

Η Βελτιστοποίηση μεγέθους είναι η απλούστερη μορφή δομικής βελτιστοποίησης. Στόχος είναι η βελτιστοποίηση της δομής μιας κατασκευής με κριτήριο τις μεταβλητές σχεδίασης, όπου θα είναι τα δομικά στοιχεία, για παράδειγμα η διάμετρος μιας ράβδου ή το πάχος μιας δοκού. Οι μεταβλητές είναι συνήθως γεωμετρικές παράμετροι των δομικών στοιχείων που μου επιτρέπεται να επεξεργαστώ. (

### 2.5.2 ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΣΧΗΜΑΤΟΣ

Η βελτιστοποίηση σχήματος εκτελείται παρόμοια με την βελτιστοποίηση τοπολογίας. Η διαφορά τους βρίσκεται στον τρόπο σχεδίασης. Η διαδικασία της βελτιστοποίησης σχήματος αποτελείται από τρεις ενότητες : γεωμετρική αναπαράσταση, δομική ανάλυση και αλγόριθμοι βελτιστοποίησης. (Ding, 1986, Haslinger & Mäkinen, 2003, Mohammadi & Pironneau, 2004, Sokolowski et al., 1992)

### 2.5.3 ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΠΟΛΟΓΙΑΣ

Η βελτιστοποίηση τοπολογίας είναι η πιο γενική τεχνική δομικής βελτιστοποίησης και εξετάζεται κυρίως κατά το στάδιο σχεδιασμού της κατασκευής. Η ελληνική λέξη τόπος, που σημαίνει τοπίο ή τόπος είναι η προέλευση της έννοιας βελτιστοποίηση τοπολογίας. Η κατηγορία αυτή είναι ενδεχομένως η πιο δύσκολη από τις τρεις κατηγορίες δομικής βελτιστοποίησης. Η βελτιστοποίηση εκτελείται με τον προσδιορισμό της βέλτιστης τοπολογίας της κατασκευής. Επομένως, η βελτιστοποίηση πραγματοποιείται μέσω του προσδιορισμού τιμών που αντιστοιχούν στην τοπολογία. Η συμβατική βελτιστοποίηση τοπολογίας χρησιμοποιεί ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων για την αξιολόγηση της απόδοσης του σχεδιασμού και την παραγωγή δομών για την ικανοποίηση στόχων όπως οι ακόλουθοι:

- Μειωμένη αναλογία ακαμψίας προς βάρος
- Καλύτερη αναλογία ενέργειας καταπόνησης προς βάρος
- Μειωμένος λόγος όγκου υλικού προς συντελεστή ασφάλειας,
- Φυσική αναλογία συχνότητας προς βάρος.

Το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο αριθμητικό σχήμα για τη βελτιστοποίηση τοπολογίας είναι το σχήμα Στερεού Ισότροπου Υλικού με Ποινικοποίηση (SIMP) όπου η πυκνότητα προσεγγίζεται ως σταθερή σε κάθε στοιχείο. Ο στόχος της βελτιστοποίησης είναι στην παρούσα εργασία να βρεθεί ένα σχέδιο που να μεγιστοποιεί την ακαμψία για μια δεδομένη ποσότητα υλικού. Το πλεονέκτημα της χρήσης της ακαμψίας ως στόχου, ή μάλλον ως συμπλήρωμα της συμμόρφωσης, είναι ότι είναι ένα συνολικό μέτρο και επομένως μπορεί

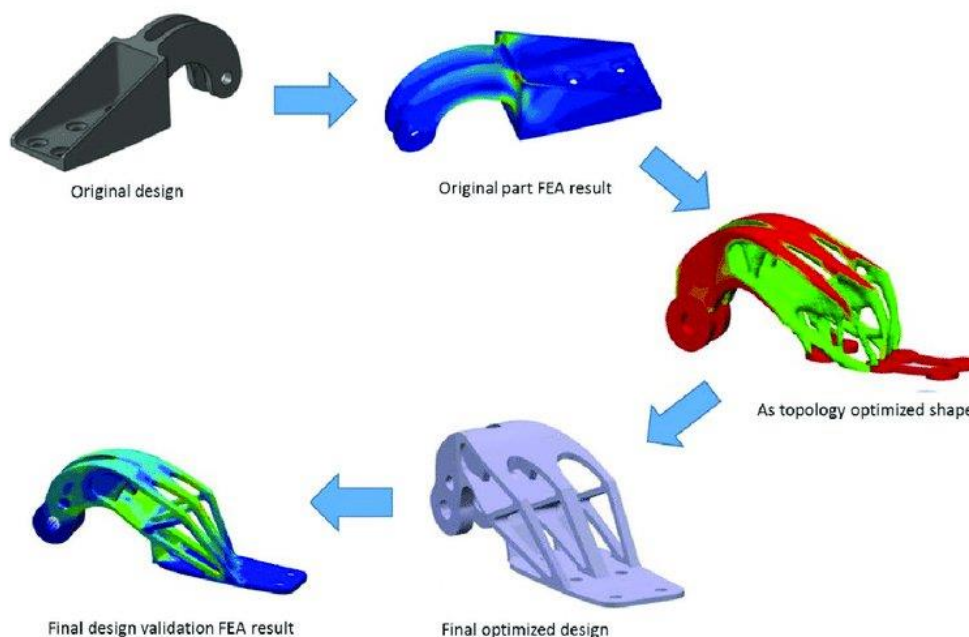
να αναπαρασταθεί από μια κλιμακωτή τιμή. Επιπλέον, ο περιορισμός στον όγκο είναι επίσης ιδιαίτερα απλός, καθώς είναι γραμμικός και μονότονος, γεγονός που στις περισσότερες περιπτώσεις οδηγεί σε έναν ισχυρό αριθμητικό αλγόριθμο. Η διαδικασία SIMP βασίζεται σε μια ακολουθία κυρτών προσεγγίσεων και ο αλγόριθμος είναι απλός στην εφαρμογή και ταυτόχρονα αριθμητικά αποδοτικός. Μια ευδιάκριτη ασπρόμαυρη λύση λαμβάνεται με την τιμωρία των γκρι σχεδίων μέσω μιας κλιμάκωσης της ελαστικής συστατικής σχέσης. Αυτό το σκεύασμα έχει αποδειχθεί ότι είναι κακώς τοποθετημένο λόγω της κλίμακας μήκους που λείπει στη σύνθεση. Η αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος τακτοποιεί το πρόβλημα μέσω π.χ. ενός φίλτρου.(Banga et al., 2018, Bendsøe, 1995, Bendsøe et al., 1994, Ροντογιάννης, 2023)

#### 2.5.4 ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΤΥΠΩΝ (Multi-objective optimization) :

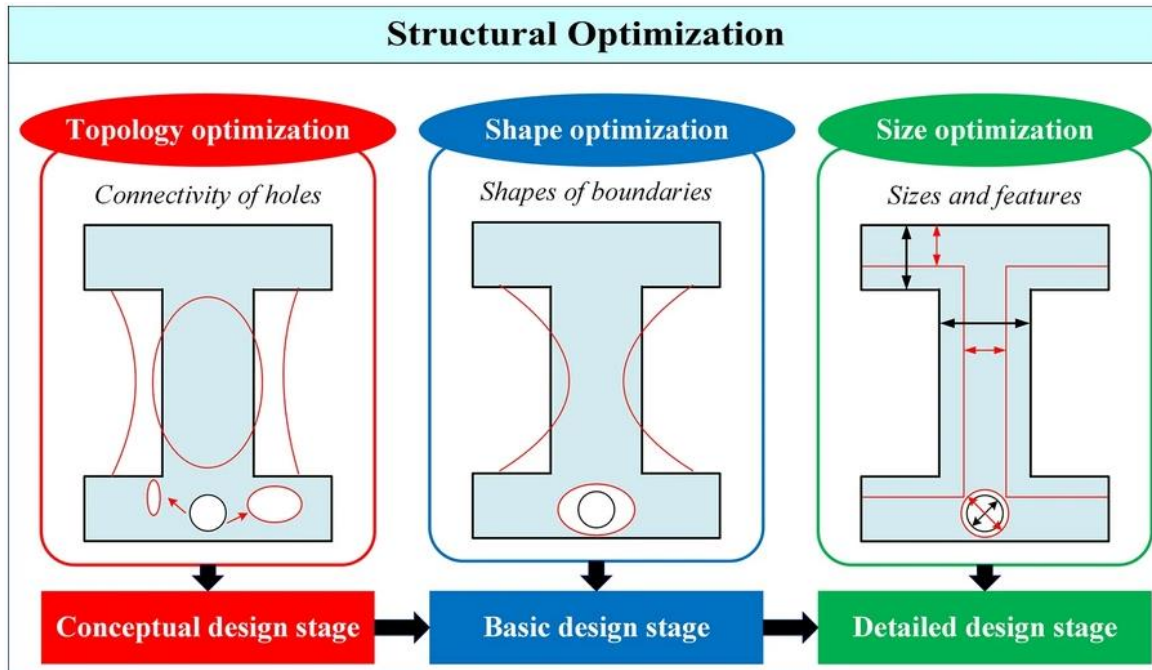
Κατά την βελτιστοποίηση πολλαπλών τύπων περιλαμβάνεται ταυτόχρονα το μέγεθος, το σχήμα και η τοπολογία. Είναι γνωστή και ως βελτιστοποίηση διάταξης (layout optimization). (Seyranian et al., 1994)

##### ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΙΚΑ :

Η βελτιστοποίηση μεγέθους απαιτείται για την εύρεση των βέλτιστων τιμών των διαφόρων διαστάσεων. Η επέκταση της βελτιστοποίησης μεγέθους είναι η βελτιστοποίηση σχήματος, επιτρέπει επιπλέον ελευθερίες στη διαμόρφωση της δομής. Η βελτιστοποίηση τοπολογίας προάγει την βελτιστοποίηση μεγέθους και σχήματος και δίνει χωρίς περιορισμούς στην βελτιστοποιημένη δομή. Σε σύγκριση με βελτιστοποίηση μεγέθους και σχήματος, η βελτιστοποίηση τοπολογίας επιτρέπει μεγαλύτερη ελευθερία καθώς δεν απαιτείται αρχική δομή.



Σχήμα 9. Στάδια Βελτιστοποίησης Τοπολογίας



Σχήμα 10. Οι τρεις κλάδοι της Δομικής Βελτιστοποίησης

## 2.6 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΑΠΟΔΟΣΗ ΤΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΑΞΙΑΣ.

Για να πειστεί κανείς για την σπουδαιότητα της Δομικής Βελτιστοποίησης στον σχεδιασμό, την κατασκευή και την συντήρηση οποιουδήποτε συστήματος θα πρέπει να λάβει υπόψιν ότι ο απώτερος σκοπός είναι να μετριάσουν την απαιτούμενη προσπάθεια και παράλληλα να μεγιστοποιήσουν το κέρδος. Ταυτόχρονα θα πρέπει να διατηρείται η επιθυμητή απόδοση, αξιοπιστία, ποιότητα και ασφάλεια. Επομένως, η βελτιστοποίηση είναι η πράξη λήψης ενός βελτιωμένου αποτελέσματος υπό δεδομένες συνθήκες. Η απόδοση της έννοιας value engineering στα ελληνικά σχετίζεται με την μηχανική αξία που προστίθεται στο προϊόν που δημιουργούμε. Η μείωση του κόστους και η ταυτόχρονη αύξηση της αξίας του προϊόντος είναι τελικά το αποτέλεσμα που προσδοκούμε ύστερα από την εφαρμογή της Δομικής Βελτιστοποίησης. Μαθηματικά, η διατύπωση των προβλημάτων Δομικής Βελτιστοποίησης σε σχέση με τις μεταβλητές σχεδιασμού, τον στόχο και τις συναρτήσεις περιορισμού διαφοροποιείται ανάλογα με την εφαρμογή. Πρακτικά, τα προβλήματα παρουσιάζονται χρησιμοποιώντας διάφορα κριτήρια και περιορισμούς που τυπικά εκφράζονται ως μη γραμμικά προβλήματα προγραμματισμού. (Haftka & Gürdal, 2012a; Lee & Geem, 2004)

Κατά την διαδικασία της βελτιστοποίησης, ακολουθείται μια επαναλαμβανόμενη στατική ανάλυση, με σκοπό να αξιολογούνται τα αποτελέσματα του κάθε βήματος. Η διαδικασία συνεχίζει να ακολουθείται έως ότου προκύψει η επιθυμητή σύγκλιση. Μια διαδικασία που κρίνεται αρκετά κοστοβόρα. Ως εκ τούτου, είναι απαραίτητη η εφαρμογή μιας μεθόδου στατικής ανάλυσης που να είναι υπολογιστικά οικονομική. Για τον λόγο αυτόν, κρίνεται σκόπιμο η ανάλυση να διεξάγεται σύμφωνα με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Analysis). (Bean et al., n.d., Kirsch, 2012, Xie & Steven, 1993, Yang & Soh, 1997)

Κατά την διατύπωση ενός προβλήματος κρίνεται απαραίτητος ο προσδιορισμός των εξής ποσοτήτων :

1. Αντικειμενικών συναρτήσεων.
2. Μεταβλητών Σχεδιασμού.
3. Περιορισμοί.

Αναλυτικότερα,

- Αντικειμενική Συνάρτηση(Objective function) : Η αντικειμενική συνάρτηση αναφέρεται σε μια συνάρτηση ή ένα σύνολο συναρτήσεων που αντικατοπτρίζουν την ποιότητα του αποτελέσματος βελτιστοποίησης. Είναι θεμιτό η αντικειμενική συνάρτηση (f) να ελαχιστοποιείται, χωρίς να απαιτείται η μεγιστοποίηση της.
- Μεταβλητές Σχεδιασμού(Design Variable): Οι μεταβλητές σχεδιασμού (x), είναι ένα διάνυσμα αριθμητικών τιμών που αλλάζουν εντός ενός προκαθορισμένου εύρους κατά την διάρκεια εξέλιξης της βελτιστοποίησης. Με τον τρόπο αυτόν ορίζεται ο σχεδιασμός της κατασκευής. Οι μεταβλητές σχεδιασμού χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, ανάλογα με την τιμή τους. Οι μεταβλητές συνεχούς σχεδίασης και οι μεταβλητές διακριτής σχεδίασης. Οι τιμές των μεταβλητών συνεχούς σχεδίασης κυμαίνονται εντός ενός συγκεκριμένου εύρους, ενώ οι διακριτές μεταβλητές σχεδίασης έχουν μεμονωμένες τιμές.
- Περιορισμοί (Constrains): Οι περιορισμοί απευθύνονται στις απαιτήσεις ασφάλειας και συντήρησης που πρέπει να πληρούνται κατά την διαδικασία βελτιστοποίησης. Οι περιορισμοί χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, σε περιορισμούς ισότητας και ανισότητας. Σημειώνεται ότι οι περιορισμοί μπορούν να συνδυαστούν με την αντικειμενική συνάρτηση ως συναρτήσεις ποινής για την μετατροπή της περιορισμένης αντικειμενικής συνάρτησης σε μη περιορισμένη.

Η διατύπωση των προβλημάτων βελτιστοποίησης κατασκευών μπορεί να έχει την ακόλουθη μορφή:

Minimize/Maximize:  $f(X)$

Subject to:  $g_i(X) \leq 0, i = 1, 2, 3, \dots, m$

$h(X) = 0, j = 1, 2, 3, \dots, p; X \in S$

Όπου,

- $X$  είναι συνήθως ένα διάνυσμα  $X = [x_1, x_2, x_3, \dots, x_n]$  και αντιπροσωπεύει το σύνολο των μεταβλητών σχεδιασμού, όπου  $n$  είναι ο αριθμός των μεταβλητών σχεδιασμού.
- $f(X)$  είναι η αντικειμενική συνάρτηση.
- Τα  $g_i(X)$  και  $h_j(X)$  αναφέρονται σε περιορισμούς ανισότητας και ισότητας, όπου  $m$  και  $p$  είναι ο αριθμός των περιορισμών και  $S$  είναι ο χώρος αναζήτησης του προβλήματος βελτιστοποίησης.

## 2.7 ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗΣ ΑΝΑΖΗΤΗΣΗΣ

Οι τεχνικές βελτιστοποίησης που βασίζονται στις αρχές του μαθηματικού προγραμματισμού μπορούν γενικά να ταξινομηθούν σε δύο κατηγορίες: στις προσεγγίσεις που βασίζονται στον παραγωγό (gradient-based approaches) και στις ευρετικές προσεγγίσεις (heuristic approaches). (Bean et al., n.d., Christensen & Klarbring, 2008, Spillers & MacBain, 2009, Zhou & Rozvany, 1993)

Οι προσεγγίσεις που βασίζονται στην παράγωγο (gradient-based approaches) της συνάρτησης μπορεί να χωριστεί στις τέσσερις παρακάτω κατηγορίες:

- Μέθοδος Γραμμικού Προγραμματισμού (Linear Programming - LP) :

Οι μέθοδοι γραμμικού προγραμματισμού αναφέρονται σε μεθόδους βελτιστοποίησης με γραμμικές αντικειμενικές συναρτήσεις και περιορισμούς. Σε αυτήν την περίπτωση η βέλτιστη λύση βρίσκεται επί του συνόρου μίας ή περισσότερων συναρτήσεων περιορισμού. Σε προβλήματα αυτού του είδους (κυρτά) ένα τοπικό ελάχιστο είναι οπωσδήποτε και το καθολικό ελάχιστο του προβλήματος.

- Μέθοδος Μη Γραμμικού Προγραμματισμού (Non Linear Programming - NLP) :

Όταν τουλάχιστον μία από τις αντικειμενικές συναρτήσεις ή τις συναρτήσεις περιορισμών είναι μη γραμμική, οι μέθοδοι βελτιστοποίησης ονομάζονται μέθοδοι μη γραμμικού προγραμματισμού. Σε αυτή την περίπτωση (μη κυρτό πρόβλημα) η εύρεση ενός τοπικού ελάχιστου δεν πιστοποιεί την εύρεση ενός καθολικού ελάχιστου.

- Μέθοδος Κριτηρίων Βελτιστοποίησης (Optimality Criteria - OC) :

Οι μέθοδοι κριτηρίων βελτιστοποίησης χρησιμοποιούνται συνήθως για τον υπολογισμό των πολλαπλασιαστών Lagrange, οι οποίοι χρησιμοποιούνται για την εύρεση τοπικών ελάχιστων/μέγιστων μιας συνάρτησης που υπόκειται σε περιορισμούς ισότητας, καθώς και για την ικανοποίηση του συγκεκριμένου κριτηρίου βελτιστοποίησης.

- Μέθοδος Εφικτής Κατεύθυνσης (Feasible Direction – FD) :

Στις μεθόδους εφικτής κατεύθυνσης, η αναζήτηση του βέλτιστου ξεκινά από ένα σημείο που ικανοποιεί όλους τους περιορισμούς και στη συνέχεια, το σημείο μετακινείται σε καλύτερο σημείο με βάση την επαναληπτική σχέση:

$$X_{i+1} = X_i + \lambda S_i$$

Όπου :

- $X_i, X_{i+1}$ : το σημείο έναρξης και το τελικό σημείο της επανάληψης
- $S_i$ : η κατεύθυνση της κίνησης, όπου προσδιορίζεται με βάση δύο αρχές, μια μικρή κίνηση ώστε να μην παραβιάζονται οι περιορισμοί και μια κατεύθυνση που μειώνει την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης. Επομένως, η βέλτιστη λύση μπορεί να προκύψει μετά από πολλές επαναλήψεις.
- $\lambda$ : η απόσταση κίνησης, της οποίας η τιμή είναι πάντα προκαθορισμένη ώστε το  $X_{i+1}$  να εμπίπτει στην εφικτή περιοχή.

Οι ευρετικές μέθοδοι (heuristic approaches) αναφέρονται σε προσεγγίσεις επίλυσης προβλημάτων που επιτυγχάνουν τη λύση με δοκιμή και σφάλμα (trial and error). Αυτού του είδους οι μέθοδοι βελτιστοποίησης περιλαμβάνουν πολλές τεχνικές μηχανικής εκμάθησης, όπως τεχνητά νευρωνικά δίκτυα και μηχανές υποστήριξης διανυσμάτων, που στοχεύουν στη βελτίωση της ακρίβειας των λύσεων με επαναλήψεις. Αν και οι ευρετικές μέθοδοι είναι σχετικά εύκολο να προγραμματιστούν με υψηλή υπολογιστική ταχύτητα, μπορεί να παγιδευτούν σε κάποιο τοπικό βέλτιστο. Ως εκ τούτου, έχουν αναπτυχθεί μεταευρετικές μέθοδοι (metaheuristic methods), για καλύτερα αποτελέσματα βελτιστοποίησης. Οι μεταευρετικές μέθοδοι είναι ανεξάρτητες από το πρόβλημα και χρησιμοποιούν ορισμένη τυχαιοποίηση για τη μετάβαση από κάποιο τοπικό βέλτιστο στον αναζητήσή του καθολικού βέλτιστου.

## 2.8 ΚΥΚΛΟΣ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ

Σύμφωνα με το UNEP, οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου GHG πρόκειται να διπλασιαστούν έως το 2050, εάν δεν αλλάξει κάτι ριζικά έως τότε. Μεγάλες ποσότητες αερίων του θερμοκηπίου παράγονται μέσω των δομικών υλικών και πιο συγκεκριμένα μέσω των συγκεκριμένων δραστηριοτήτων :

- i. Μεταποίηση δομικών υλικών(ενσωματωμένη ενέργεια).
- ii. Μεταφορά υλικών από εργοστάσια παραγωγής σε εργοτάξια(γκρίζα ενέργεια)
- iii. Κατασκευή δομής(επαγόμενη ενέργεια).
- iv. Λειτουργία της δομής(επιχειρησιακή ενέργεια) και
- v. Κατεδάφιση της κατασκευής.

Σαν αποτέλεσμα, η διαδικασία αξιολόγησης του κύκλου ζωής(LCA:Life Cycle Assessment) αποτελεί πολύτιμο εργαλείο καθ' όλη την διαδικασία κατασκευής του ζητούμενου προϊόντος , αλλά και μέχρι να παραδοθεί στον καταναλωτή. Σύμφωνα με τον διεθνή οργανισμό τυποποίησης(ISO) η διαδικασία αξιολόγησης αναφέρεται ως "Cradle to Grave". Υπάρχει μια πληθώρα παραγωγικών βιομηχανικών διαδικασιών, κατά την διάρκεια του κύκλου ζωής των κτιρίων, που ευθύνονται για μεγάλο ποσοστό περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Επομένως, είναι σημαντικό να συσσωρεύονται οι επιπτώσεις που προκύπτουν από κάθε πτυχή του κύκλου ζωής του κτιρίου. Ειδικότερα, τα παγκόσμια περιβαλλοντικά έσοδα ετησίως υπολογίζονται μαζί με δύο παραδείγματα δοκιμής, τα οποία εξετάζονται σε αυτήν την μελέτη, με διάφορα μέσα που χρησιμοποιεί η διαδικασία αξιολόγησης. Σε αυτήν την μελέτη, η σημασία της βελτιστοποίησης σχεδιασμού αξιολογείται σε σχέση με την ενσωματωμένη ενέργεια του κτιρίου. Στην πράξη, η ενσωματωμένη ενέργεια διαιρείται σε δύο μέρη : αρχικό και επαναλαμβανόμενο, χρησιμοποιείται για την αποκατάσταση του κτιρίου και εκφράζεται ως εξής :

$$EE(s) = EE_i(s) + EEr(s)$$

$$= \sum_i mi(s)Mi + \sum_i mi(s)Mi \left[ \frac{Lb}{Lm} - 1 \right].$$

Όπου  $EE_i(s)$  είναι η αρχική ενσωματωμένη ενέργεια του σχεδιασμού  $s$  και  $EEr(s)$  είναι η επαναλαμβανόμενη ενσωματωμένη ενέργεια,  $mi(s)$  είναι η ποσότητα των υλικών του κτιρίου,  $Mi(s)$  είναι το ενεργειακό περιεχόμενο του  $i^{th}$  υλικού ανά μονάδα ποσότητας. Το  $Lb$  είναι η διάρκεια ζωής του κτιρίου και  $Lmi$  είναι το εύρος ζωής του υλικού ( $i$ ).

Η κατανάλωση ενέργειας και οι εκπομπές GHG είναι οι μετρήσεις που αφορούν τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις των κτιρίων που χρησιμοποιούνται από την διεθνή βιβλιογραφία. Επιπλέον, και οι δύο μετρήσεις είναι ευθέως ανάλογες με τις χρησιμοποιούμενες ποσότητες υλικού. Αυτοί είναι οι λόγοι που κάνουμε χρήση των μετρήσεων, αλλά και για την αξιολόγηση του περιβαλλοντικού αντίκτυπου των βελτιστοποιημένων σχεδίων. (Haftka & Gürdal, 2012b, Zhou & Rozvany, 1992)

Συμπερασματικά, η κατανάλωση ενέργειας και οι εκπομπές GHG είναι οι μετρήσεις που αφορούν τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις των κτιρίων. Επιπλέον, και οι δύο μετρήσεις είναι ευθέως ανάλογες με τις χρησιμοποιούμενες ποσότητες υλικού. Αυτοί είναι τελικά οι λόγοι για την χρήση αυτών των δύο μετρήσεων στην παρούσα μελέτη και για την αξιολόγησή του περιβαλλοντικού αποτυπώματος των βελτιστοποιημένων σχεδίων που εκτελέστηκαν.

Η εφαρμογή βέλτιστων μεθοδολογιών σχεδίασης στην πράξη απαιτεί εξελιγμένη υπολογιστική δύναμη, η οποία μπορεί να αντιμετωπιστεί αποκλειστικά από καταρτισμένους στον τομέα αυτόν. Τα εργαλεία που παρέχονται για την διαχείριση της Δομικής Βελτιστοποίησης, πρέπει να εξυπηρετούν τους εξής σκοπούς :

- ✓ Σωστή αριθμητική μοντελοποίηση δομικών συστημάτων.

- ✓ Αξιόπιστη δομική ανάλυση για τον υπολογισμό μεγεθών απόκρισης, όπως μετατοπίσεις και τάσεις.
- ✓ Η συνεπής τήρηση του σχεδιαστικού κώδικα και των σχεδίων που ο μηχανικός προγραμματίζει.
- ✓ Οι αλγόριθμοι βελτιστοποίησης που χρησιμοποιούνται, να ικανοποιούν τις συνθήκες σχεδιασμού, να συνυπολογίζουν το οικονομικό και περιβαλλοντικό αποτύπωμα διατηρώντας την ασφάλεια και την απόδοση σε ανταγωνιστικό επίπεδο.

## 2.9 ΕΡΓΑΛΕΙΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΔΟΜΙΚΗΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ

Αξίζει να σημειωθεί πως, η εφαρμογή της βελτιστοποίησης στον χώρο των κατασκευών βρίσκεται σε αρχικό στάδιο μελέτης. Πιο συγκεκριμένα, οι μηχανικοί σχεδιασμού εστίαζαν κυρίως στην βελτιστοποίηση απλών κατασκευών καθώς τα εργαλεία που διέθεταν και ήταν για επαγγελματική χρήση δεν πρόσφεραν πιο ολοκληρωμένη προσέγγιση βελτιστοποίησης, καθώς προορίζονταν κυρίως για μηχανικούς άλλων κλάδων (μηχανικούς της αυτοκινητοβιομηχανίας και της αεροναυπηγικής) . Όπως προαναφέρθηκε, η βελτιστοποίηση τοπολογίας παρουσιάζει την μεγαλύτερη ζήτηση, και άρα υπάρχουν και οι περισσότερες εφαρμογές λογισμικού που την εξυπηρετούν. Το περιεχόμενο τους όμως είναι και πάλι στραμμένο σε τομείς όπως είναι η αεροδιαστημική μηχανική. Μια τέτοια πλατφόρμα είναι αυτή της Altair (Opti struct 2017), η Tosca από την Dassault Systems(Tosca 2017) που λειτουργεί με τυπικό λογισμικό FEA. Ωστόσο, αυτά τα εργαλεία δεν μπορούν να επιλύσουν προβλήματα που σχετίζονται με το αντικείμενο του δομοστατικού μηχανικού.(Bendsøe, 1989, Sobieszczanski-Sobieski & Haftka, 1997, Zhou & Rozvany, 1993b)

Η εφαρμογή βέλτιστων μεθοδολογιών σχεδίασης στην πράξη απαιτεί εξελιγμένη υπολογιστική δύναμη, η οποία μπορεί να αντιμετωπιστεί αποκλειστικά από καταρτισμένους στον τομέα αυτόν. Τα εργαλεία που παρέχονται για την διαχείριση της Δομικής Βελτιστοποίησης, πρέπει να εξυπηρετούν τους εξής σκοπούς :

- ✓ Σωστή αριθμητική μοντελοποίηση δομικών συστημάτων.
- ✓ Αξιόπιστη δομική ανάλυση για τον υπολογισμό μεγεθών απόκρισης, όπως μετατοπίσεις και τάσεις.
- ✓ Η συνεπής τήρηση του σχεδιαστικού κώδικα και των σχεδίων που ο μηχανικός προγραμματίζει.
- ✓ Οι αλγόριθμοι βελτιστοποίησης που χρησιμοποιούνται, να ικανοποιούν τις συνθήκες σχεδιασμού, να συνυπολογίζουν το οικονομικό και περιβαλλοντικό αποτύπωμα διατηρώντας την ασφάλεια και την απόδοση σε ανταγωνιστικό επίπεδο.

Η πρώτη στον κόσμο υπολογιστική πλατφόρμα βελτιστοποίησης για την δομική μηχανική είναι η OCP-OPTIMIZATION COMPUTING PLATFORM. Αυτό το καινοτόμο εργαλείο, που



αντιπροσωπεύει το μέλλον της Value Engineering, υπερβαίνει κατά πολύ αυτό που ήταν δυνατό με τις παραδοσιακές τεχνικές βελτιστοποίησης και περιλαμβάνει αλγορίθμους αιχμής για την αυτόματη βελτιστοποίηση οποιασδήποτε δομής, προκειμένου να μειωθεί το κόστος κατασκευής και των υλικών, τουλάχιστον κατά 10%. Στις μέρες μας, είναι διαθέσιμο στην αγορά της κατασκευαστικής βιομηχανίας μια πλατφόρμα Δομικής Βελτιστοποίησης (SOCP: Structural Optimization Computing Platform) που καλύπτει μεγαλύτερο μέρος της κατασκευής, καθώς και πιο σύνθετα έργα που αφορούν το επάγγελμα του δομοστατικού μηχανικού.(Kirsch, 2012, Xie et al., 1997)

Ορισμένα πακέτα λογισμικών, όπως το ETABS και το SAP, βελτιώνουν σημαντικά την ταχύτητα υπολογισμού και οδηγούν σε καλύτερα αποτελέσματα. Ωστόσο, είναι λιγότερο αποτελεσματικά σε κατασκευές μεγάλης κλίμακας. Εκτός από την χρήση των παραπάνω λογισμικών, το MATLAB είναι επίσης ένα ευρέως χρησιμοποιούμενο εργαλείο, το οποίο πολύ συχνά συνδυάζεται με διάφορα λογισμικά για την επίλυση προβλημάτων βελτιστοποίησης.

Παρατηρούμε λοιπόν ότι η είσοδος της Δομικής Βελτιστοποίησης με την αυτοματοποιημένη της μορφή μέσω ειδικών πλατφορμών παρέχει στους επαγγελματίες μηχανικούς τη δύναμη και τις δεξιότητες που προηγουμένως ήταν διαθέσιμες σε μεγάλες εταιρείες συμβούλων και στα κορυφαία πανεπιστήμια του κόσμου. Αυτός είναι και ο λόγος που προχωρήσαμε σε συνεργασία του ιδρύματός μας με τις εταιρείες που σε επόμενο κεφάλαιο θα σας παρουσιάσω.

## 2.10 ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ

Στην ενότητα αυτήν σκοπός είναι να αποδείξουμε ότι η υιοθέτηση διαδικασιών βελτιστοποίησης θα έχει ιδιαίτερα θετικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις και άμεση οφέλη για την κατασκευαστική βιομηχανία προσδίδοντας προστιθέμενη αξία στο έργο του δομοστατικού μηχανικού.(Lagatos, 2018)

Προκειμένου να εξεταστεί η επίδραση των διαδικασιών βελτιστοποίησης τόσο περιβαλλοντικά όσο και οικονομικά κάνουμε τις εξής παραδοχές :

- Υποθέτουμε μια μέση μείωση υλικών απαιτήσεων ίση με 5% ή 10%.
- Υποθέτουμε ότι παγκοσμίως 0,1%,0,5% ή 5% του κατασκευαστικού κλάδου που σχετίζεται με την αγορά κατασκευών υιοθετεί τεχνικές βελτιστοποίησης κατά την διαδικασία σχεδιασμού.

Σημαντικές διαπιστώσεις που πλαισιώνουν την αξία της Δομικής Βελτιστοποίησης είναι οι εξής:

- Στον τομέα κτιριακών κατασκευών(ΤΚΚ) παρατηρείται αυξημένη εκπομπή αερίων του θερμοκηπίου (GHG), καταναλώνεται το 40% της ενέργειας, το 25% του νερού και το 40%

των πόρων παγκοσμίως ενώ απελευθερώνει σχεδόν το 30% των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου.

- Εκτιμάται ότι ο ΤΚΚ αντιστοιχεί στο 10% του παγκόσμιου ΑΕΠ(Ακαθάριστο Εγχώριο Προϊόν) απασχολώντας πάνω από 110 εκατομμύρια εργαζομένους.
- Τέλος, η Κατασκευαστική Βιομηχανία (KB) αναμένεται να επεκταθεί κατά 85% σε 15.5 τρισεκατομμύρια δολάρια παγκοσμίως το 2030, ενώ οι ΗΠΑ, η Κίνα και η Ινδία αντιπροσωπεύουν σχεδόν το 60% αυτής της ανάπτυξης.

Η ανάλυση που παρουσιάζεται σε αυτό το τμήμα αναφέρεται στο έτος 2016, καθώς και στα έτη 2030 και 2050, όπου βάσει εκτιμήσεων υπολογίζονται οι αντίστοιχες τιμές. Η μελλοντική χρήση υλικών (που περιορίζεται μόνο σε σκυρόδεμα και χάλυβα) για τα έτη 2030 και 2050 προέρχεται ανάλογα με τις εκτιμήσεις για τα έτη κατασκευής. Η επιφάνεια του κτιρίου σε δισεκατομμύρια τετραγωνικά μέτρα μαζί με την παραγωγή υλικών και την αντίστοιχη χρήση στον κτιριακό τομέα της KB (σε εκατομμύρια μετρικούς τόνους) παρουσιάζεται στον Πίνακα 1 για τα έτη 2015, 2016 και στις προβλεπόμενες τιμές για το 2030 και το 2050, σύμφωνα με την UNEP. Με βάση αυτές τις ποσότητες υλικών οι περιβαλλοντικές και οικονομικές επιπτώσεις παρουσιάζονται αναλυτικά παρακάτω. Για τους σκοπούς αυτής της παραμετρικής μελέτης αντί για τους υπολογισμούς για το τσιμέντο, εκτελείται για σκυρόδεμα. Τυπικά, ένα μείγμα σκυροδέματος περιέχει περίπου 10% έως 15% τσιμέντο. Επομένως, προκειμένου να αντληθούν οι αντίστοιχες συγκεκριμένες ποσότητες, θεωρείται ότι το σκυρόδεμα περιέχει κατά μέσο όρο 12,5% τσιμέντο. (Lagaros, 2018)

Ο Πίνακας 2 παρουσιάζει τη μείωση σε σχέση με την ετήσια ζήτηση υλικών για τον κτιριακό τομέα του CI. Οι Πίνακες 3 και 4 απεικονίζουν τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις, υπολογιζόμενες ως μειωμένες απαιτήσεις σε όρους τρισεκατομμυρίων BTU κατανάλωσης ενέργειας (βλέπε Πίνακα 2) και σε εκατομμύρια μετρικούς τόνους εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (βλέπε Πίνακα 3) όταν υιοθετούνται διαδικασίες βελτιστοποίησης σχεδιασμού. Αυτές οι τιμές αντιστοιχούν στο έτος 2016 με βάση την κατανάλωση υλικών και για τα έτη 2030 και 2050 βάσει των προβλέψεων για την εξέλιξη της KB που περιεγράφηκε προηγουμένως αναλυτικά(πίνακας 1). Αυτές οι ποσότητες προέρχονται από σαφείς τιμές για τους συντελεστές ενέργειας και CO<sub>2</sub> που λαμβάνονται από τον κατάλογο άνθρακα και ενέργειας του Πανεπιστημίου του Bath. Συγκεκριμένα, οι ενεργειακοί συντελεστές που λαμβάνονται υπόψη είναι ίσοι με 0,82 MJ/kgg για το σκυρόδεμα και 24,35 MJ/kgg για τον χάλυβα (δηλαδή η μέση τιμή 27,1 MJ/kgg που αντιστοιχεί σε χάλυβα και 21,6 MJ/kgg για τον κόσμο που χαρακτηρίζεται από 39% ανακύκλωση). Οι συντελεστές CO<sub>2</sub>e που λαμβάνονται υπόψη είναι ίσοι με 0,124 kggCO<sub>2</sub>e/kgg για το σκυρόδεμα και 1.95 kggCO<sub>2</sub>e/kgg για τον χάλυβα (δηλαδή η μέση τιμή 1,86 kggCO<sub>2</sub>e/kgg που αντιστοιχεί σε χαλύβδινο τμήμα και 2,03 kggCO<sub>2</sub>e/kgg που αντιστοιχεί σε ράβδους και 39% υλικό ανακύκλωσης). Οι τιμές για το σκυρόδεμα αντιστοιχούν σε τύπο σκυροδέματος C28/35 που θεωρείται ως μέση κατηγορία

υλικών που χρησιμοποιείται για σκυρόδεμα και αντιστοιχεί σε 30% αντικατάσταση τσιμέντου με ιπτάμενη τέφρα.(Lagaros, 2018)

Συμπερασματικά, για την καλύτερη κατανόηση των πλεονεκτημάτων της υιοθέτησης της Δομικής Βελτιστοποίησης δίνονται στο Πίνακας 5 οι ετήσιες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου για 24 πόλεις ανά τον κόσμο σε εκατομμύρια μετρικούς τόνους CO<sub>2</sub>e. Ενδεικτικά, για το σενάριο που επιτυγχάνει κατά μέσο όρο 5% μείωση της υλικής χρήσης από το 0,50% του CI που εφαρμόζει διαδικασίες σχεδιασμού με βάση τη βελτιστοποίηση, το περιβαλλοντικό όφελος αντιστοιχεί σε μείωση κατά 0,30 εκατομμύρια μετρικούς τόνους CO<sub>2</sub>e για το έτος 2016, μπορεί να παρατηρηθεί ότι αυτή η μάζα CO<sub>2</sub>e αντιστοιχεί στην ποσότητα που εκπέμπουν ετησίως πόλεις όπως η Αδελαΐδα, η Λωζάννη, το Ρέικιαβικ ή το Ούντινε. Ως εκ τούτου, για το σενάριο ότι το 5% της ΚΒ που εφαρμόζει διαδικασίες σχεδιασμού με βάση τη βελτιστοποίηση επιτυγχάνει κατά μέσο όρο 10% μείωση της χρήσης υλικών, το περιβαλλοντικό όφελος αντιστοιχεί σε μείωση 6,04 εκατομμυρίων τόνων CO<sub>2</sub>e για το έτος 2016, μπορεί να παρατηρηθεί ότι αυτή η μάζα CO<sub>2</sub>e αντιστοιχεί στην ποσότητα που εκπέμπουν ετησίως πόλεις όπως η Αθήνα, το Μιλάνο, το Παρίσι ή το Βίρτσμπουργκ.(Lagaros, 2018)

Επιφάνεια(δισεκατομμύρια m <sup>2</sup> )	Παραγωγή(εκατομμύρια τόνους)		Χρήση σε κτίρια (εκατομμύρια τόνοι)	
	Τσιμέντο	Χάλυβας	Τσιμέντο	Χάλυβας
223.50	4100	1620	24,600	340.2
232.36	4200	1630	25,200	342.3
315.50	5787	2286	34,726.2	480.2
415.10	7614	2911	45,688.9	611.5

**Πίνακας 1. Η επιφάνεια του κτιρίου σε δισεκατομμύρια τετραγωνικά μέτρα ,σύμφωνα με την UNEP.**

Έτος	Μείωση Χρήσης	Υλικό	Αγορά(%)		
			0.10%	0.50%	5.00%
2016	5%	Σκυρόδεμα(εκατομμύρια m <sup>3</sup> )	0.53	2.63	26.25
		Χάλυβας(εκατομμύρια Kgr)	17.12	85.58	855.75
	10%	Σκυρόδεμα(εκατομμύρια m <sup>3</sup> )	1.05	5.25	52.50
		Χάλυβας(εκατομμύρια Kgr)	34.23	171.15	1711.50
2030	5%	Σκυρόδεμα(εκατομμύρια m <sup>3</sup> )	0.72	3.62	36.17
		Χάλυβας(εκατομμύρια Kgr)	24.01	120.06	1200.59
	10%	Σκυρόδεμα(εκατομμύρια m <sup>3</sup> )	1.45	7.23	72.35
		Χάλυβας(εκατομμύρια Kgr)	48.02	240.12	2401.19
2050	5%	Σκυρόδεμα(εκατομμύρια m <sup>3</sup> )	0.95	4.76	47.59
		Χάλυβας(εκατομμύρια Kgr)	30.57	152.87	1528.75
	10%	Σκυρόδεμα(εκατομμύρια m <sup>3</sup> )	1.90	9.52	95.19
		Χάλυβας(εκατομμύρια Kgr)	61.15	305.75	3057.49

**Πίνακας 2. Μείωση σε σχέση με την ετήσια ζήτηση υλικών για τον κτιριακό τομέα.**

Έτος	Μείωση Χρήσης	Αγορά(%)		
		0.10%	0.50%	5.00%
2016	5%	0.57	2.83	28.25
	10%	1.13	5.65	56.50
2030	5%	0.79	3.94	39.42
	10%	1.58	7.88	78.85
2050	5%	1.01	5.07	50.69
	10%	2.03	10.14	101.39

**Πίνακας 3. Το ετήσιο περιβαλλοντικό όφελος που επιτυγχάνεται από πλευράς κατανάλωσης ενέργειας, λόγω της μείωσης της χρήσης υλικών.**

Έτος	Μείωση Χρήσης	Αγορά(%)		
		0.10%	0.50%	5.00%
2016	5%	0.06	0.30	3.02
	10%	0.12	0.60	6.04
2030	5%	0.08	0.42	4.20
	10%	0.17	0.84	8.41
2050	5%	0.11	0.54	5.43
	10%	0.22	1.09	10.86

**Πίνακας 4. Το ετήσιο περιβαλλοντικό όφελος που επιτυγχάνεται σε όρους GHG εκπομπές λόγω της μείωσης της χρήσης υλικών (σε εκατομμύρια μετρικούς τόνους CO<sub>2</sub>e).**

Πόλη	Εκατομμύρια μετρικοί τόνοι CO <sub>2</sub> e	Πόλη	Εκατομμύρια μετρικοί τόνοι CO <sub>2</sub> e	Πόλη	Εκατομμύρια μετρικοί τόνοι CO <sub>2</sub> e
Αδελαΐδα	0.49	Μαδρίτη	10.26	Ρότερνταμ	31.51
Αθήνα	4.71	Μιλάνο	5.98	Τόκιο	70.13
Ογκόλιθος	1.72	Νέα Υόρκη	49.39	Τορόντο	18.32
Σικάγο	33.50	Παρίσι	5.20	Ούντιε	0.61
Λοζάνη	0.50	Πίτσμπουργκ	4.80	Βενετία	1.42
Λισαβόνα	1.93	Πόρτο	1.02	Ουέλινγκτον	1.08
Λονδίνο	40.19	Ρέικιαβικ	0.35	Σαραγόσα	1.79
Λος Άντζελες	29.02	Ρώμη	10.01	Ζυρίχη	1.82

**Πίνακας 5. Οι ετήσιες εκπομπές GHG ανά πόλη (σε εκατομμύρια μετρικούς τόνους CO<sub>2</sub>e).**

## 2.11 ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΕΣ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ

Όσον αφορά την οικονομική συνεισφορά της Δομικής Βελτιστοποίησης στον κτηριακό τομέα, στον πίνακα 6 παρουσιάζονται τα δεδομένα που σχετίζονται με το ετήσιο κέρδος σε δισεκατομμύρια δολάρια. Οι τιμές μονάδας που χρησιμοποιούνται για σκυρόδεμα και χάλυβα ισούνται με 200,0 USD/m<sup>3</sup> και 2,3 USD/kgf αντίστοιχα, τα οποία είναι μάλλον συντηρητικά και αντιστοιχούν στο κόστος υλικού, εργασίας και ενοικίασης εξοπλισμού. Ενώ επιτόκιο ίσο με 0,75% που αναφέρεται σε αυτό της οικονομίας των ΗΠΑ για το έτος 2016 σύμφωνα με την Focus Economics, χρησιμοποιείται για την εξαγωγή των παρόντων τιμών για τα έτη 2030 και 2050. Προτού αναλύσουμε περαιτέρω το οικονομικό όφελος που επιτυγχάνεται για τα διάφορα σενάρια που εφαρμόζονται, να τονίσουμε ότι η παγκόσμια αγορά για το έτος 2016 κυμαινόταν από σχεδόν 150-300 δισεκατομμύρια δολάρια ΗΠΑ και αναμένεται να κυμανθεί από 205-410 δισεκατομμύρια δολάρια για το 2030. Πιο συγκεκριμένα, έχοντας δεχτεί την παραδοχή ότι κατά μέσο όρο 5% υπάρχει μείωση χρήσης υλικών, για όσους εφαρμόζουν μεθόδους βελτιστοποίησης η μείωση του κόστους αντιστοιχεί σε USD 0,75 δισ. για το έτος 2016. Αντίστοιχα, για το σενάριο ότι κατά μέσο όρο ο ΤΚΚ αντιστοιχεί στο 10% του παγκόσμιου ΑΕΠ, επιτυγχάνεται η μείωση του κόστους που αντιστοιχεί σε 15,0 δισεκατομμύρια USD για το έτος 2016. Θα πρέπει να υπογραμμιστεί ότι αυτό το οικονομικό όφελος είναι προνομιακό για πάνω από το 50% του Ακαθάριστου Εγχώριου Προϊόν για χώρες όπως Αζερμπαϊτζάν, η Βουλγαρία, Κροατία, Ιορδανία, Λουξεμβούργο ή Σλοβενία για το 2016 σύμφωνα με την Παγκόσμια Τράπεζα (2017).(Lagaros, 2018)

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup>

### ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΣΥΝΤΑΞΗ ΕΡΩΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟΥ

#### 3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο παρόν κεφάλαιο, παρουσιάζω το ερωτηματολόγιο που δημιούργησα, και τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την επεξεργασία του. Ο σκοπός της έρευνας είναι να εντοπίσει τις προκλήσεις για μια πιο βιώσιμη Κατασκευαστική Βιομηχανία. Αυτό συνεπάγεται υπεύθυνη χρήση υλικού, μείωση των εκπομπών άνθρακα και οικονομική ισορροπία. **Αξίζει άραγε η υιοθέτηση αυτοματοποιημένων μεθόδων βελτιστοποίησης σήμερα;**

Η μελέτη χωρίζεται σε τέσσερα μέρη:

1. Γενικές πληροφορίες.
2. Ενσωμάτωση της καινοτομίας στην κατασκευαστική βιομηχανία.
3. Υιοθέτηση της μηχανικής αξίας που βασίζεται στη βελτιστοποίηση.
4. Ερωτήσεις σχετικά με το επιχειρηματικό μέρος.

Σημειώνεται ότι οποιαδήποτε πληροφορία έχουμε συλλέξει δεν θα δημοσιευτεί και συλλέγεται μόνο για λόγους επικύρωσης, στα πλαίσια της διατριβής μου.

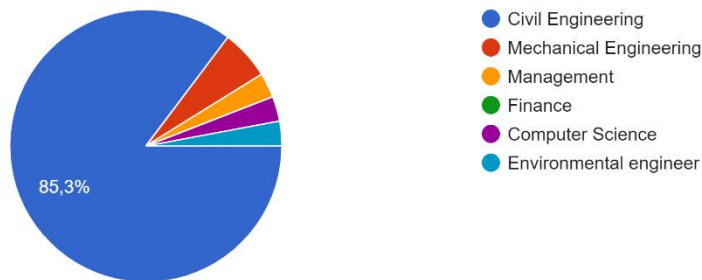


### 3.2 ΓΕΝΙΚΕΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ-ΑΝΑΛΥΣΗ

Η παρουσίαση και ανάλυση της έρευνας που πραγματοποιήθηκε ξεκινά με τις γενικές πληροφορίες που θα αναλύσω ευθύς αμέσως.

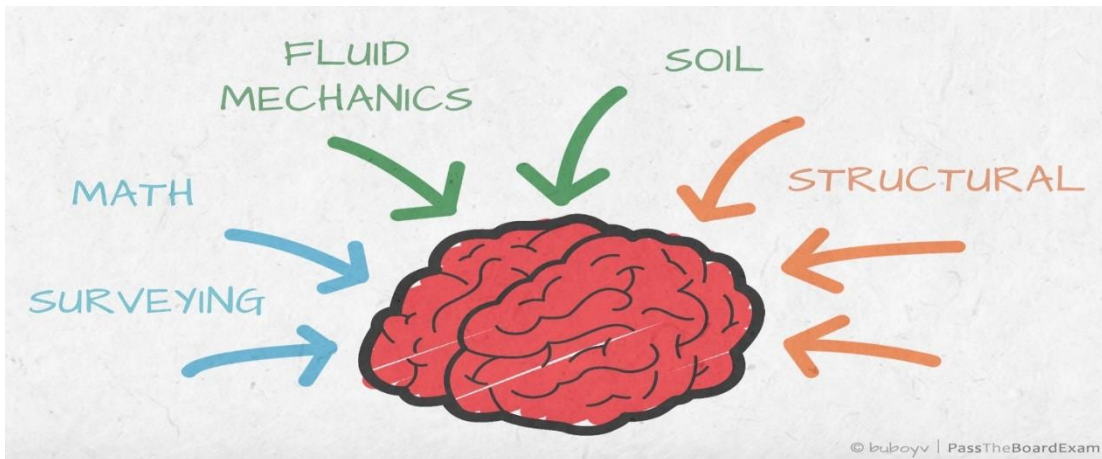
*Εικόνα 1 Ποιό είναι το αντικείμενο των σπουδών σας;*

What were your basic studies focused on?  
34 απαντήσεις



Είναι σαφές ότι το ζήτημα της Δομικής Βελτιστοποίησης αφορά κυρίως τους Πολιτικούς Μηχανικούς και συγκεκριμένα τους δομοστατικούς. Το μεγαλύτερο ποσοστό των απαντήσεων δόθηκε από πολιτικούς μηχανικούς(85,3%), ενώ μικρά ήταν τα ποσοστά απαντήσεων που δόθηκαν από μηχανολόγους μηχανικούς, μηχανικούς περιβάλλοντος και υπεύθυνους κατασκευής που ασχολούνται με τις διοικητικές υποθέσεις ενός έργου. Η κατανομή των απαντήσεων στην ερώτηση αυτήν είναι λογική καθώς ο πολιτικός μηχανικός είναι αυτός που ασχολείται τόσο με την μελέτη όσο και με την κατασκευή ενός έργου, άρα έχει μια ολιστική εικόνα του έργου για όλα του τα στάδια.Το επάγγελμα του πολιτικού μηχανικού όμως μπορεί να διακριθεί σε επιμέρους. Στην επόμενη ερώτηση βλέπουμε την κατανομή των διαφόρων ειδικοτήτων του μηχανικού που απάντησαν το ερωτηματολόγιο και άρα έχουν συμμετάσχει στην ερευνά με την αντίστοιχη εμπειρία τους.

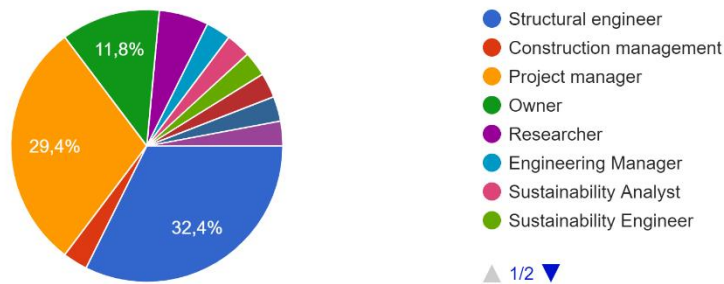




**Εικόνα 2 Ποιός είναι ο τίτλος της θέσης σας;**

What describes best your position in the company you work for?

34 απαντήσεις

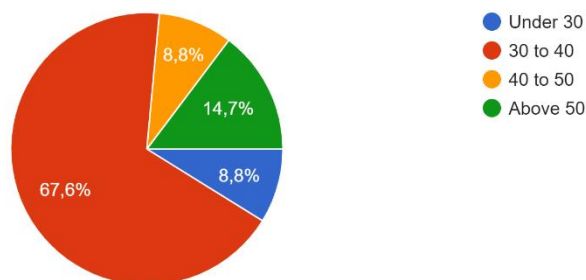


Η ερώτηση αυτή είναι άμεσα συσχετισμένη με την προηγούμενη καθώς επιβεβαιώνει ότι το ζήτημα της Δομικής Βελτιστοποίησης είναι αντικείμενο για το οποίο μπορούν να εκφέρουν τις γνώσεις τους κυρίως πολιτικοί μηχανικοί και διαχειριστές του έργου, ενώ σε μικρότερα ποσοστά και άλλοι εμπλεκόμενοι με το έργο.

**Εικόνα 3 Ποιά είναι η ηλικία σας;**

What is your age?

34 απαντήσεις

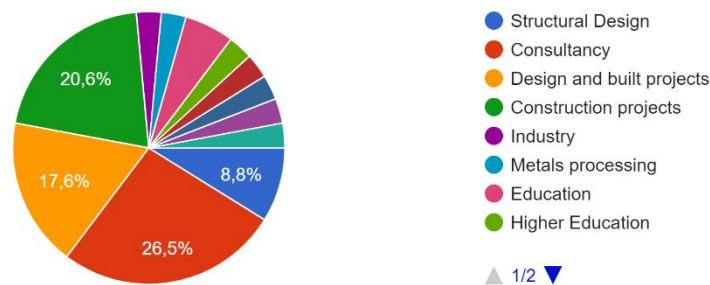


Στο παραπάνω σχήμα βλέπουμε ότι το μεγαλύτερο ποσοστό που πραγματεύεται το αντικείμενο της Βελτιστοποίησης στον χώρο των κατασκευών, ανήκει στην ηλικιακή ομάδα των 30 έως 40, ενώ μικρά είναι τα ποσοστά που ξεφεύγουν από την δεκαετία αυτήν. Αυτό θα μπορούσε να αποδοθεί στο γεγονός ότι η ηλικιακή ομάδα που προαναφέρθηκα έχει εδραιωθεί με ένα καλό γνωστικό επίπεδο και δείχνει να ενδιαφέρεται να ενημερωθεί για την εξέλιξη της βελτιστοποίησης στον χώρο των κατασκευών και ενδεχομένως και να συμμετάσχει πειραματικά για να βεβαιωθεί για τις θετικές επιδράσεις της. Είναι άλλωστε χαρακτηριστικό γνώρισμα των νεότερων επιστημόνων σε σχέση με τους παλιότερους.

**Εικόνα 4 Ποιά είναι η κύρια υπηρεσία της εταιρεία σας;**

What is your company's main service?

34 απαντήσεις

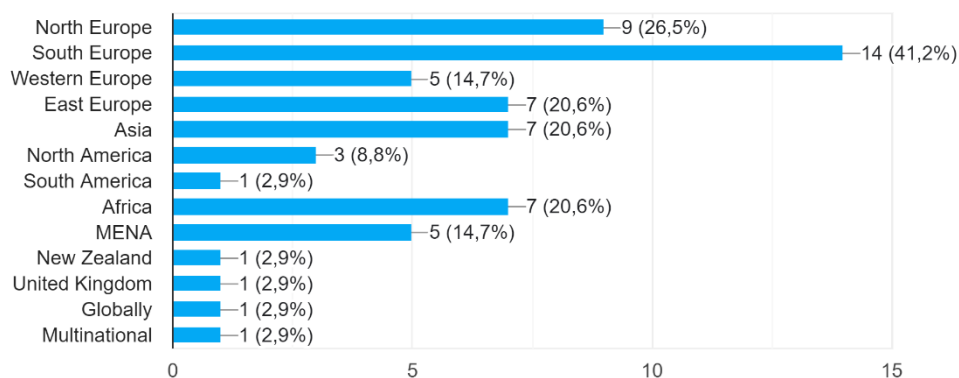


Τα μεγαλύτερα ποσοστά αυτών που απάντησαν το ερωτηματολόγιο σχετίζονται με εταιρείες που ασχολούνται με δομικό σχεδιασμό, παροχή συμβουλευτικών υπηρεσιών, μελέτη και κατασκευή έργων με ποσοστά 20,6% , 26,5 % και 17,6% αντίστοιχα.

**Εικόνα 5 Σε ποιά περιοχή εργάζεστε;**

In which regions do your company usually work?

34 απαντήσεις



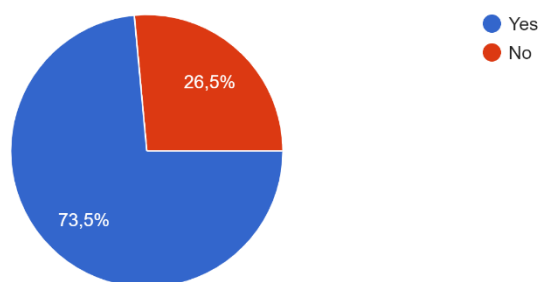
Τέλος , βλέπουμε την κατανομή των περιοχών που δραστηριοποιούνται οι αποδέκτες του ερωτηματολογίου. Γίνεται έτσι αντιληπτό το μέγεθος της δουλείας που μπορεί να αναλάβει κάθε εταιρεία αλλά και την αντίστοιχη απήχηση της σε συνάρτηση με τον κόσμο που απευθύνεται.

### 3.3 ΠΡΟΚΛΗΣΕΙΣ ΜΕΣΩ ΤΗΣ ΥΙΟΘΕΤΗΣΗΣ ΤΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ-ΑΝΑΛΥΣΗ

Σε αυτήν την υποενότητα τέθηκαν κάποιες ερωτήσεις με σκοπό να αντιληφθούμε κατά πόσο εξοικειωμένοι είναι οι αποδέκτες του ερωτηματολογίου με την ιδέα της Δομικής Βελτιστοποίησης. Θα δούμε παρακάτω την εμπειρία τους, τα προβλήματα που ενδεχομένως αντιμετώπισαν και τι αναζητούν από μια τέτοια πλατφόρμα/λογισμικό.

*Εικόνα 6 Έχετε χρησιμοποιήσει κάποιο λογισμικό/υπηρεσία στην εταιρεία σας τα τελευταία χρόνια;*

Have you used any new/novel product (service or software) in your operation in the past years?  
34 απαντήσεις

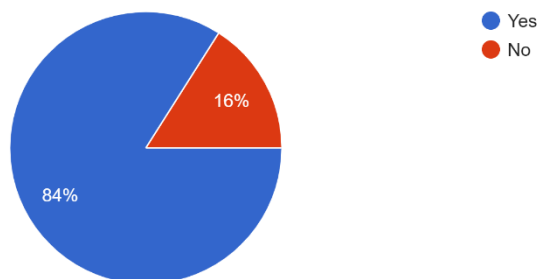


Όπως είναι προφανές το 73,5% έχει κάνει χρήση οποιασδήποτε πλατφόρμας που σχετίζεται με την Βελτιστοποίηση στον χώρο των κατασκευών. Ενώ, είναι μικρό το ποσοστό εκείνο που δεν είναι εξοικειωμένο με το αντικείμενο που ερευνούμε.

**Εικόνα 7 Μείνατε ικανοποιημένοι από το νέο προϊόν που χρησιμοποιήσατε;**

Were you satisfied by the novel product you used?

25 απαντήσεις

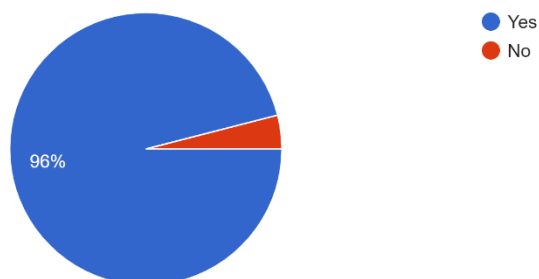


Το ποσοστό εκείνο που απάντησε ΝΑΙ στην προηγούμενη ερώτηση κλήθηκε να δηλώσει εάν έμεινε ικανοποιημένο από το προϊόν που χρησιμοποίησε ή ΟΧΙ. Το 84% απάντησε θετικά στο ερώτημα αυτό και όπως διακρίνουμε στην ακριβώς επόμενη ερώτηση υιοθέτησε τις αντίστοιχες πλατφόρμες σε ποσοστό 96%.

**Εικόνα 8 Έχετε ενσωματώσει αυτό το νέο προϊόν ή ένα παρόμοιο στις διαδικασίες που χρησιμοποιείτε;**

Did you incorporate this novel product or a similar one in your working processes?

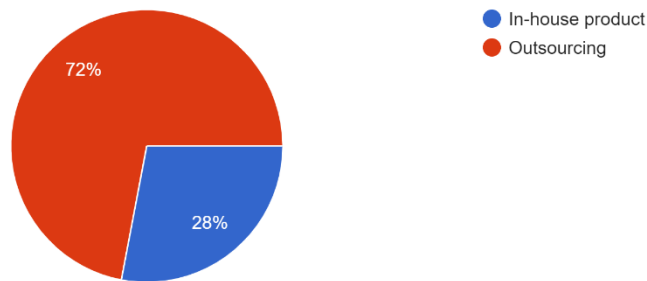
25 απαντήσεις



### Εικόνα 9 Το προϊόν που χρησιμοποιήσατε αναπτύχθηκε από εσάς ;

Was this novel product developed in-house or provided by a third party?

25 απαντήσεις



Παρατηρούμε ότι το 72% δημιούργησε εργαλεία με σκοπό να κάνει χρήση της Δομικής Βελτιστοποίησης.

Ας δούμε πως επωφελήθηκαν κάνοντας χρήση αυτής της καινοτομίας :

1. Δημιουργία ανατρεπτικών λύσεων για τον κατασκευαστικό κλάδο.
2. Νέες προτάσεις για αντισεισμικό σχεδιασμό.
3. Έξυπνη απόκτηση και επεξεργασία δεδομένων.
4. Εύκολη διαχείριση πληροφοριών και έλεγχος έργου.
5. Ανάπτυξη προϊόντων που χρησιμοποιούνται για παραμετρικό σχεδιασμό και βελτιστοποίηση.
6. Καινοτόμα εργαλεία και υπηρεσίες.
7. Κοινή χρήση πληροφοριών έγκαιρα σε όλο τον κύκλο του έργου.
8. Ελαχιστοποίηση των σφαλμάτων και μείωση χρόνου και κόστους.
9. Εξοικείωση με το BIM.
10. Βέλτιστη σχεδιαστική λύση-Δομικός Σχεδιασμός.
11. Σύστημα Διαχείρισης Εγγράφων.
12. Συντονισμός σχεδιασμού, διαχείριση και παρακολούθηση του έργου ταυτόχρονα.
13. Μείωση απωλειών σε όλες τις πτυχές λειτουργίας της εταιρείας
14. Αναθεώρηση/Εκτίμηση του κόστους.
15. Διαχείριση Συμβολαίου-Ασφάλεια Διαδικασιών
16. Υπολογισμός της απόκρισης των κραδασμών της υποδομής.

17. Ελαχιστοποιημένο βάρος για μεταλλικές κατασκευές, άρα λιγότερα έξοδα για τον πελάτη.

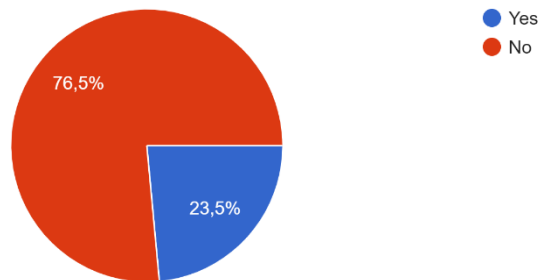
Μια ερώτηση που μας αφορά και σχετίζεται κατά πολύ με την ερευνά μας είναι η επόμενη. Είναι σημαντικό να γνωρίζουμε την ζήτηση της αγοράς και την ανεκτικότητα αυτής απέναντι σε καινοτόμους μεθόδους. Αυτός είναι και ο λόγος που ζητήσαμε από τους αποδέκτες του ερωτηματολογίου να μας περιγράψουν προϊόντα που δεν είναι διαθέσιμα ακόμα στην αγορά και θα ήθελαν να είχαν σύμμαχο στις μελέτες τους για μια πιο ολιστική προσέγγιση των έργων που αναλαμβάνουν.

Αναλυτικότερα :

**Εικόνα 10 Υπάρχει κάποιο προϊόν που θα θέλατε να χρησιμοποιήσετε και δεν υπάρχει αυτήν την στιγμή στην αγορά ;**

Is there a product that you would like to use but is not currently on the market?

34 απαντήσεις



Τι περιέγραψαν οι ενδιαφερόμενοι:

- Πλάνα από drone με σκοπό την εξαγωγή πιο ολοκληρωμένης μελέτης.
- Μια ολοκληρωμένη λύση διαχείρισης της κατασκευής.
- Ένα λογισμικό που να παρέχει λύσεις σε έργα υποδομής αλλά και ευρύτερα(γέφυρες κ.λπ.).
- Ένα προϊόν που χρησιμοποιεί τεχνητή νοημοσύνη για την παρακολούθηση της Y & A επί τόπου.
- Αυτοματοποιημένη εσωτερική διακόσμηση με βάση τον διαθέσιμο τετραγωνικό χώρο ανά όροφο.
- Ένα κοινό εργαλείο BIM για δομικό, αρχιτεκτονικό και μηχανολογικό σχεδιασμό με βάση τους ελληνικούς κανονισμούς.

Κλείνοντας την υποενότητα αυτήν , αξίζει να παρουσιαστούν οι λόγοι που δεν είναι ικανοποιημένοι όσοι χρησιμοποίησαν αντίστοιχα λογισμικά :

1. Απαιτείται περαιτέρω ανάπτυξη για τις ανάγκες της οικοδομικής βιομηχανίας.

2. Το ποσοστό της αυτοματοποίησης ήταν πολύ μικρό.
3. Το λογισμικό διαχείρισης και παρακολούθησης ήταν πολύ περίπλοκο για να το χειριστούν μηχανικοί μεγαλύτερης ηλικίας ή εργαζόμενοι.
4. Η πλατφόρμα δεν ήταν φιλική προς τον χρήστη.

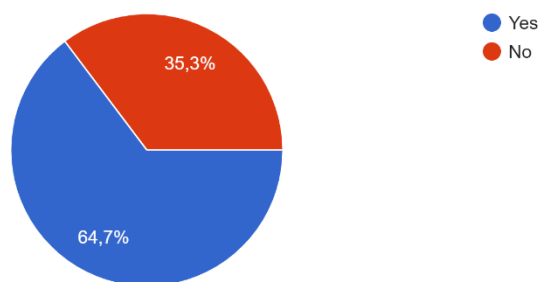
### 3.4 ΥΙΟΘΕΤΗΣΗ ΤΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΑΞΙΑΣ ΠΟΥ ΒΑΣΙΖΕΤΑΙ ΣΤΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ

Στην υποενότητα αυτήν , μας ενδιαφέρει να γίνει περιβαλλοντική και οικονομική αφύπνιση. Τα τελευταία είναι άμεσα συνδεδεμένα με την Δομική Βελτιστοποίηση και όχι μόνο. Στις μέρες μας, η υπεύθυνη χρήση υλικού και το οικονομικό αποτύπωμα των κατασκευών είναι κύριο μέλημα των κατασκευαστών και ο περιορισμός τους ξεχωρίζει εκείνους που το λαμβάνουν υπόψιν. Σαν αποτέλεσμα αυτών, για να πειστεί κανείς για την χρησιμότητα της Δομικής Βελτιστοποίησης με τον βέλτιστο τρόπο πρέπει να διακρίνει τα οφέλη που απορρέουν από αυτήν. Για να προκαλέσω την ευαισθητοποίηση σχετικά με αυτά που προανέφερα δημιούργησα τις παρακάτω ερωτήσεις.

*Εικόνα 11 Είστε εξοικειωμένοι με τον όρο μηχανική αξία και Δομική Βελτιστοποίηση ;*

Are you familiar with the term of structural optimization-based value engineering processes?

34 απαντήσεις

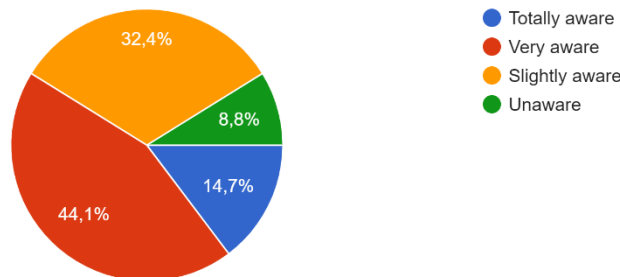


Το ποσοστό όσων έχουν αντίληψη γύρω από το ζήτημα της Δομικής Βελτιστοποίησης ξεπερνά κατά πολύ αυτούς που βρίσκονται στον αντίποδα . Αναλυτικότερα, το 64,7% δείχνει να είναι εξοικειωμένο με την μηχανική αξία που απορρέει από την εφαρμογή της Δομικής Βελτιστοποίησης, δηλαδή την εφαρμογή της διαδικασίας αυτής πρακτικά, ενώ το υπόλοιπο 35,3% βρίσκεται στον αντίποδα.

**Εικόνα 12 Ποιο είναι το επίπεδο συνειδητοποίησής σας σχετικά με την υπεύθυνη χρήση υλικών, τις ενσωματωμένες εκπομπές άνθρακα και τη βιωσιμότητα;**

What is your level of awareness with respect to responsible material usage, embodied carbon emissions and sustainability?

34 απαντήσεις

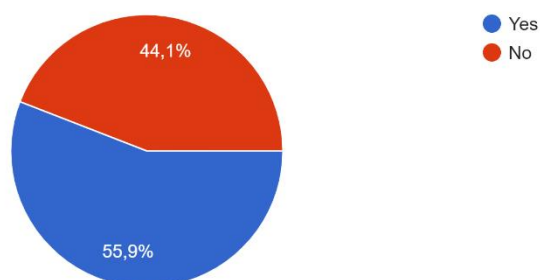


Στο σημείο αυτό είναι σημαντικό να υπενθυμίσω τον σκοπό της διπλωματικής μου εργασίας. Δηλαδή να αναδείξω την βελτιστοποίηση κατασκευών, τις θετικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις αυτής και τα άμεσα οικονομικά οφέλη που απορρέουν από την εφαρμογή της. Η υπεύθυνη χρήση υλικών είναι άμεσα συνδεδεμένη με τους οικονομικούς πόρους που απαιτούνται για την ολοκλήρωση μιας κατασκευής. Επομένως η παραπάνω ερώτηση έχει ως σκοπό να αντιληφθούμε το επίπεδο συνειδητοποίησης σχετικά με την χρήση υλικών, τις ενσωματωμένες εκπομπές άνθρακα και την βιωσιμότητα της αγοράς στην οποία απευθυνόμαστε, με σκοπό να προκαλέσουμε και την απαιτούμενη ευαισθητοποίηση για το ζήτημα αυτό. Σύμφωνα με την αποτύπωση των ποσοστών παραπάνω, συμπεραίνω πως τα ποσοστά αυτών που είναι αρκετά ενημερωμένων και εκείνα που είναι ελαφρώς ενημερωμένων δεν απέχουν πολύ ( 44,1% και 32,4% αντίστοιχα). Μικρά είναι τα ποσοστά αυτών που δεν κατέχουν ιδιαίτερα την έννοια της Δομικής Βελτιστοποίησης.

**Εικόνα 13 Έχετε χρησιμοποιήσει οποιοσδήποτε είδος υπηρεσιών δομικής βελτιστοποίησης στις λειτουργίες σας ;**

Have you used any type of structural optimization services in your operations?

34 απαντήσεις



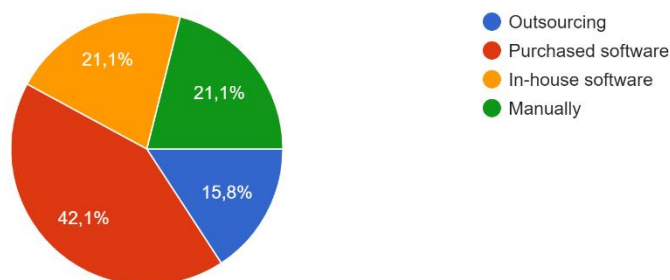


Η ερώτηση αυτή έχει ξανατοποθετηθεί στο συγκεκριμένο σημείο του ερωτηματολογίου ώστε να συνδέεται με τις επόμενες, και στόχος της είναι να ελέγξουμε κατά πόσο όσοι έχουν κάνει ήδη χρήση κάποιας υπηρεσίας Δομικής Βελτιστοποίησης συνεχίζουν να είναι χρήστες αυτής ή όχι, καθώς και τα αντίστοιχα τεκμήρια σε κάθε περίπτωση. Τα ποσοστά στην περίπτωση αυτήν, είναι σχεδόν ισοδιανεμημένα, με το ποσοστό αυτών που έχουν χρησιμοποιήσει οποιοσδήποτε είδος υπηρεσίας δομικής βελτιστοποίησης να αντιστοιχεί σε 55,9%.

Το 55,9% που προαναφέρθηκε, κλήθηκε να απαντήσει και στην εξής ερώτηση :

**Εικόνα 14 Πώς εφαρμόστηκε η συγκεκριμένη υπηρεσία ;**

How was it applied?  
19 απαντήσεις



Παρατηρούμε λοιπόν ότι πέρα από προϊόντα που δημιουργούνται από την ίδια την εταιρεία, όπως εξετάσαμε και σε προηγούμενη ενότητα, είναι πιο σύνηθες να αγοράσουν οποιοδήποτε λογισμικό/υπηρεσία από εξωτερικό φορέα και να κάνουν χρήση του έτοιμου αυτού λογισμικού. Σε μικρότερα ποσοστά βλέπουμε ότι είναι και η εξωτερική ανάθεση του ζητήματος αλλά και η χειροκίνητη αντιμετώπιση του.

Για να πειστεί κανείς για την χρησιμότητα της Δομικής Βελτιστοποίησης κρίνεται απαραίτητος ο διαχωρισμός των θετικών και των αρνητικών επιδράσεων αυτής. Όπως και παραπάνω, ζητήθηκε συμπληρωματικά να γίνει καταγραφή του μεγαλύτερου οφέλους που αποκόμισε το 55,9% από την Δομική Βελτιστοποίηση στην πράξη:

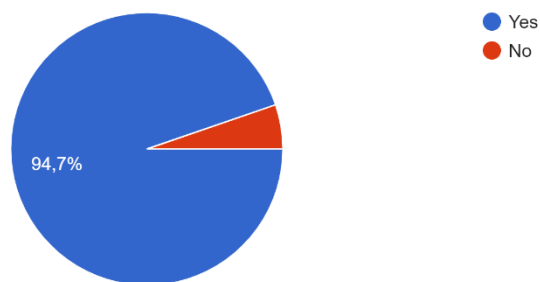
1. Εξοικονόμηση υλικών.
2. Αυξημένη ακαμψία με λιγότερη χρήση ενός υλικού.

3. Οικονομία, ενισχυμένη ασφάλεια.
4. Ψηφιοποίηση και αυτοματοποιημένες διαδικασίες.
5. Μειωμένες ποσότητες υλικών, άνθρακα και κόστους.
6. Ελαχιστοποίηση αστοχιών.
7. Αυξημένη ανταγωνιστική δύναμη.
8. Επίγνωση της συνολικής κοστολόγησης του κύκλου ζωής του έργου.

**Εικόνα 15 Συνεχίζετε να το χρησιμοποιείτε;**

Do you continue to use it?

19 απαντήσεις

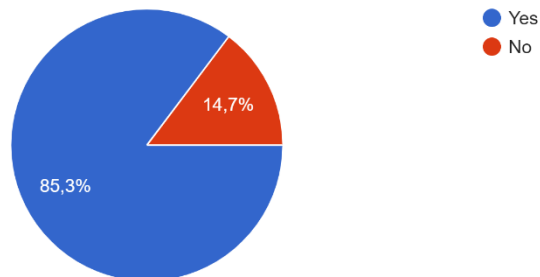


Εντυπωσιακό είναι το ποσοστό της τάξης του 94,7%, που μας φανερώνει πως όσοι δοκίμασαν κάποια υπηρεσία/πλατφόρμα που σχετίζεται με την Δομική Βελτιστοποίηση συνέχισαν την χρήση της. Ενώ ενδιαφέρον έχει για την μελέτη μας να δούμε τον λόγο που το απειροελάχιστο ποσοστό της τάξης του 5,3% δεν θέλησε να συνεχίσει την εφαρμογή της. Μέσω του ερωτηματολογίου, παρατηρούμε ότι ο λόγος που προέκυψε το μικρό αυτό ποσοστό είναι επειδή η συγκεκριμένη εταιρεία ανέθεσε σε άλλον φορέα την διεκπεραίωση του έργου, λόγω αδυναμίας ανάληψης του έργου.

**Εικόνα 16 Θα θέλατε να κάνετε χρήση μιας αυτοματοποιημένης πλατφόρμας Δομικής Βελτιστοποίησης;**

Would you be willing to try out a new cloud-based structural optimization-based value engineering approach?

34 απαντήσεις

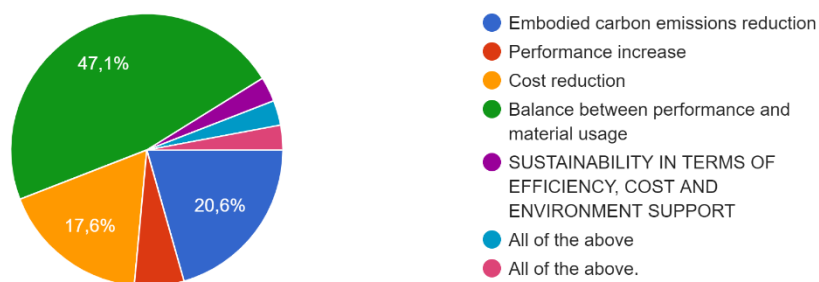


Η διαδικασία της Δομικής Βελτιστοποίησης, δεν είναι μια απλή διαδικασία. Όπως θα δούμε και παρακάτω λαμβάνονται υπόψιν όλες οι παράμετροι ενός έργου, με μεγάλη ακρίβεια, για τον συνολικό αριθμό των επαναλήψεων. Επομένως, είναι λογικό να απαιτείται αρκετός χρόνος για την ολοκλήρωση της διαδικασίας, ειδικά αν αυτή δεν είναι εκσυγχρονισμένη. Στο σημείο αυτό, έθεσα το ζήτημα του αυτοματισμού, σαν επίλυση του προβλήματος που μόλις ανέφερα. Όπως αντιλαμβανόμαστε, είναι μικρό το ποσοστό που δεν δείχνει να δελεάζεται από την έννοια της αυτοματοποίησης(14,7%).

**Εικόνα 17 Ποιος θεωρείται ότι πρέπει να είναι ο κύριος στόχος της Δομικής Βελτιστοποίησης ;**

What do you think should be the main goal of structural optimization?

34 απαντήσεις



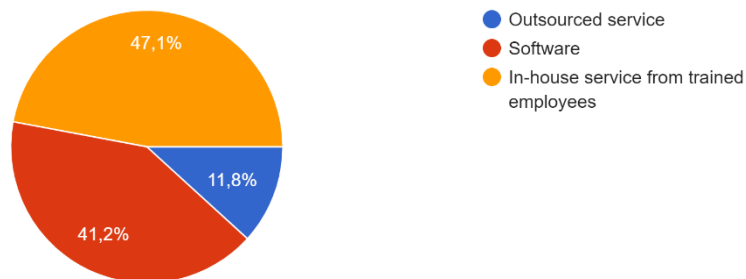
Σαν απάντηση της παραπάνω ερώτησης, παρατηρούμε ότι το μεγαλύτερο ποσοστό (47,1%) απάντησε πως θεωρεί σαν κύριο στόχο της Δομικής Βελτιστοποίησης την απαιτούμενη ισορροπία μεταξύ απόδοσης και χρήσης των υλικών, αυτός είναι και ένας βασικός λόγος που διεξάγω και την συγκεκριμένη έρευνα άλλωστε. Ο δεύτερος και βασικός επίσης λόγος που αναφέρθηκε στις απαντήσεις είναι η μείωση του κόστους και είναι επίσης ζήτημα που θέλουμε να περιορίσουμε μέσω της συγκεκριμένης έρευνας. Σε μικρότερα ποσοστά,

δόθηκαν απαντήσεις που αφορούσαν την μείωση των εκπομπών άνθρακα, αύξηση της απόδοσης, βιωσιμότητα σε όλες τις εκφάνσεις της καθώς και έναν συνδυασμό όλων των παραπάνω.

**Εικόνα 18** Κατά τη γνώμη σας, ποιο είναι το προτιμώμενο σενάριο χρήσης της έννοιας της μηχανικής αξίας που απορρέει από την Δομική Βελτιστοποίηση;

In your opinion, what is the preferable use scenario of structural optimization-based value engineering approach?

34 απαντήσεις



Μέσω της συγκεκριμένης ερώτησης, γίνεται αντιληπτό πως η πλειοψηφία (47,1%) αυτών που ενδιαφέρονται για την βελτιστοποίηση στον χώρο των κατασκευών, προτιμά να δημιουργήσει μια υπηρεσία/πλατφόρμα για την οποία θα έχει πλήρη επίγνωση της λειτουργίας της, και θα την χειρίζονται εκπαιδευμένα μέλη της ομάδας τους. Με αυτόν τον τρόπο, τους δίνεται η δυνατότητα να αυξήσουν την ανταγωνιστικότητά τους. Είναι εξίσου μεγάλο και το ποσοστό (41,2%) που ενδιαφέρεται για ένα λογισμικό, που διατίθεται ήδη στην αγορά και δεν απαιτείται περαιτέρω διερεύνηση για την χρήση και λειτουργία του.

Για να ολοκληρώσω την υποενότητα αυτήν συνοψίζω λογισμικά δομικής ανάλυσης και σχεδίασης που κάνουν ήδη χρήση ορισμένοι από αυτούς που απάντησαν το ερωτηματολόγιο (55,9%). Τα λογισμικά είναι τα εξής :

1. Robot Structural Analysis (Autodesk).
2. SAP2000.
3. ABAQUS, STKO for Opensees.
4. STAAP.
5. GSA OASys.
6. Bim Project Wise.

7. Staad Software by Bentley.
8. SCIA Engineering.
9. Civil 3D.
10. Sofistik.
11. CSI, Bentley and Nemetschek Software's.
12. HoloStatika (pi-systems).
13. Revit Autodesk.
14. StereoSTATIKA.
15. FESPA.
16. ETABs

### 3.5 ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΡΩΤΗΣΕΩΝ ΠΟΥ ΣΧΕΤΙΖΟΝΤΑΙ ΜΕ ΤΟ ΕΠΙΧΕΙΡΗΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

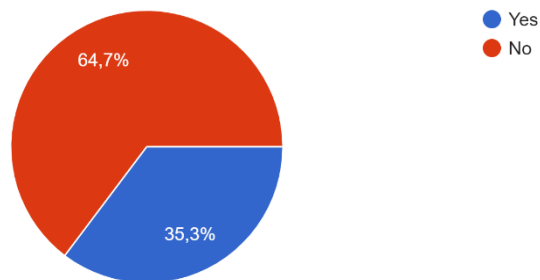
Η τελευταία υποερώτηση του ερωτηματολογίου σχετίζεται με την ενδεχόμενη ενσωμάτωση μιας πλατφόρμας/ υπηρεσίας σε μια επιχείρηση/εταιρεία. Προτού να προβεί ο εκάστοτε ενδιαφερόμενος σε μια τέτοια υιοθέτηση καινοτομίας, κρίνεται ωφέλιμο να έχει επεξεργαστεί ορισμένα ζητήματα που μπορεί να μην έχει λάβει υπόψιν έως τώρα και σχετίζονται με την βελτιστοποίηση στο χώρο των κατασκευών.

Ας δούμε τις ερωτήσεις που δημιούργησα για να ολοκληρώσω την ερευνά μου γύρω από την Δομική Βελτιστοποίηση.

**Εικόνα 19** Πιστεύετε ότι ο χρόνος που θα αφιερώσετε στην ενσωμάτωση μιας αυτοματοποιημένης διαδικασίας βασισμένης στη δομική βελτιστοποίηση, θα αυξήσει το κόστος του σχεδιασμού και θα παρατείνει το χρόνο ολοκλήρωσης του έργου;

Do you think that the time you will devote in integrating an automated structural optimization-based value engineering procedure, will increase the cost... design and extend the time of project completion?

34 απαντήσεις



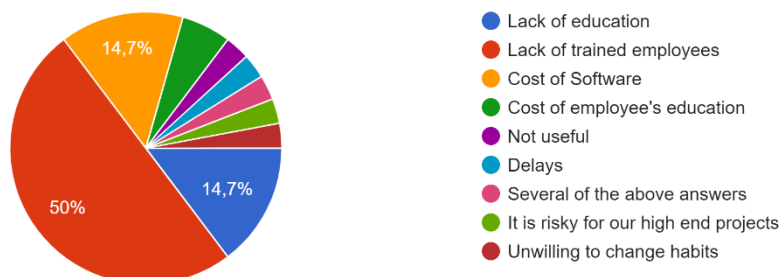
Στην σύγχρονη τεχνολογική εποχή, η παράμετρος του χρόνου, που είναι άμεσα συνυφασμένη με αυτήν του κόστους απαιτεί ιδιαίτερη μελέτη και αντιμετώπιση από τους αρμόδιους . Η διαδικασία που απαιτείται για να ενσωματωθεί μια αυτοματοποιημένη υπηρεσία που να εξυπηρετεί τη Δομική Βελτιστοποίηση είναι σχετικά χρονοβόρα. Πάραυτα, παρατηρούμε πως είναι μικρό το ποσοστό που αντιμετωπίζει αυτόν τον χρόνο ενσωμάτωσης σαν εμπόδιο για να ολοκληρωθεί το έργο, εντός χρονικού και οικονομικού προϋπολογισμού. Από την άλλη πλευρά, το 64,7% δεν δείχνει να προβληματίζεται με το συγκεκριμένο ζήτημα.

Κατά την περίπλοκη διαδικασία δημιουργίας μιας πλατφόρμας Δομικής Βελτιστοποίησης είναι σημαντικό να περιοριστούν σε μεγάλο βαθμό προβλήματα που θα προκαλούσε ενδεχόμενη υιοθέτηση τέτοιας καινοτόμου μεθόδου. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, να ληφθούν παράμετροι που θα ελαχιστοποιούν τα προβλήματα αυτά και να εκμηδενιστούν όσο αυτό είναι δυνατό. Για τον σκοπό αυτόν, τέθηκε η εξής ερώτηση :

**Εικόνα 20** Για ποιον από τους παρακάτω λόγους δεν θα υιοθετούσατε μια διαδικασία αυτοματοποιημένης Δομικής Βελτιστοποίησης;

For which of the following reasons you would not adopt an automated structural optimization-based value engineering procedure?

34 απαντήσεις

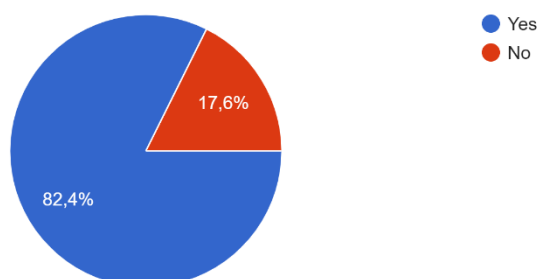


Το ποσοστό της τάξης του 50% απάντησε πως δεν διατίθεται ικανοποιητική μερίδα κατάλληλα εκπαιδευμένων εργαζομένων.

*Εικόνα 21 Θα ήσασταν διατεθειμένοι να πληρώσετε για μια επιτυχημένη μελέτη μηχανικής αξίας βασισμένη σε δομική βελτιστοποίηση;*

Would you be willing to pay for a successful structural optimization-based value engineering study?

34 απαντήσεις



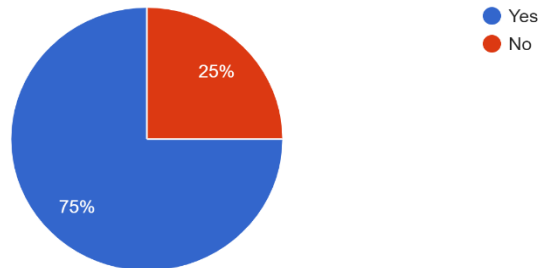
Είναι σημαντικό να τονίσουμε πως το 82,4% είναι διατεθειμένο να επενδύσει χρηματικά για μια πιο επιτυχημένη μελέτη.

Στο σημείο αυτό πρέπει να διαχωρίσουμε πως η υιοθέτηση μιας αυτοματοποιημένης διαδικασίας Δομικής Βελτιστοποίησης ενδέχεται να είναι πιο προσιτή για εταιρείες με μεγαλύτερη αγοραστική δύναμη. Αυτός είναι και ο λόγος που έχουν καταμεριστεί έτσι τα ποσοστά στην συγκεκριμένη ερώτηση.

**Εικόνα 22 Θα χρεώνετε το κόστος της μελέτης μιας διαδικασίας Δομικής Βελτιστοποίησης στον πελάτη σας;**

Would you charge the cost of the structural optimization-based value engineering study to your client?

28 απαντήσεις



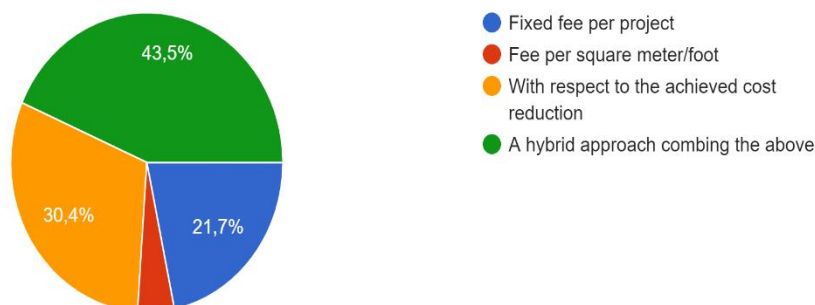
Στην συγκεκριμένη ερώτηση, διαπιστώνουμε πως η παροχή μιας τέτοιας μελέτης, η οποία μας δίνει πιο ολοκληρωμένο αποτέλεσμα, επιβαρύνει χρονικά και οικονομικά τους αγοραστές και σαν φυσικό αποτέλεσμα θα ήταν θεμιτό να χρεώνεται επιπλέον στον πελάτη. Με την αύξηση της ποιότητας του αποτελέσματος που παρέχεται στο τέλος προκύπτει και αύξηση της ανταγωνιστικότητας.

Το 75% που ανταποκρίθηκε θετικά στο παραπάνω ερώτημα έχει παραθέσει μια προσέγγιση λογικού κόστους η οποία να βασίζεται σε μια υβριδική προσέγγιση που συνδυάζει το κόστος ανά έργο, το κόστος ανά τετραγωνικό μέτρο και μια ικανοποιητική απομείωση του κόστους.

**Εικόνα 23 Εάν ναι, ποια πιστεύετε ότι πρέπει να είναι μια προσέγγιση λογικού κόστους;**

If yes, what do you think should be a reasonable cost approach?

23 απαντήσεις

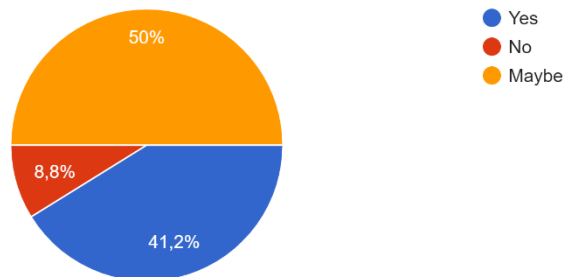




**Εικόνα 24 Θα σας ενδιέφερε η υλοποίηση ενός PoC (proof of concept) στα πλαίσια της μελέτης μας;**

Would you be interested in trying out the implementation of structural optimization-based value engineering proof of concept (PoC) as part of our study?

34 απαντήσεις



Μέσω της τελευταίας ερώτησης, παρατηρούμε ότι το 41,2% ανταποκρίνεται θετικά στην υλοποίηση ενός PoC , ενώ μικρό είναι το ποσοστό που δεν δείχνει ενδιαφέρον για την πρόταση αυτήν.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup>: Η ΑΠΟΤΥΠΩΣΗ ΤΗΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΣΤΗΝ ΠΡΑΞΗ (Proof of Concept) - ΤΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΟΥ ΠΡΟΕΚΥΨΑΝ

### 4.1 ΓΕΝΙΚΑ

Όπως έχει ήδη προαναφερθεί, πρωταρχικός σκοπός του μελετητή τόσο κατά τον σχεδιασμό όσο και κατά την κατασκευή και συντήρηση ενός έργου είναι η εξασφάλιση της ασφάλειας, οικονομίας, λειτουργικότητας, ανθεκτικότητας και αισθητικής. Συνεπώς, ως βέλτιστος σχεδιασμός κατασκευών, μπορεί να οριστεί η διαδικασία διερεύνησης ενός δομικού συστήματος το οποίο ικανοποιεί τους παραπάνω περιορισμούς. Η χρήση τεχνικών βελτιστοποίησης για το σχεδιασμό κατασκευών είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς ο κατασκευαστικός κλάδος είναι υπεύθυνος για ένα μεγάλο μερίδιο της παγκόσμιας κατανάλωσης φυσικών πόρων. Έτσι, η βελτιστοποίηση μπορεί να συμβάλει στη μείωση της κατανάλωσης φυσικών πόρων, βελτιώνοντας τη βιωσιμότητα του τομέα! Αυτός είναι και ο λόγος που προχωρήσαμε σε καινοτόμες σχεδιαστικές λύσεις που θα δούμε στο συγκεκριμένο κεφάλαιο.

Ο στόχος του μηχανικού είναι να ανακαλύψει, μέσω μιας αλγοριθμικής διαδικασίας, τον επιθυμητό συνδυασμό ανεξάρτητων μεταβλητών, οι οποίες ονομάζονται μεταβλητές σχεδιασμού. Μέσω της διαδικασίας αυτής, βελτιστοποιείται η αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος. Για να ολοκληρωθεί η διαδικασία αυτή είναι απαραίτητο να εκτελεστούν δύο βασικά βήματα: η μαθηματική διατύπωση του προβλήματος βελτιστοποίησης και η εφαρμογή του κατάλληλου αλγορίθμου. Πέρα από την αποτελεσματικότητα των αλγορίθμων βελτιστοποίησης, σημαντική είναι και η εμπειρία του πολιτικού μηχανικού.

Στόχος της βελτιστοποίησης είναι ο προσδιορισμός του καλύτερου δυνατού αποτελέσματος υπό συγκεκριμένες συνθήκες. Στον τομέα του πολιτικού μηχανικού, η χρήση τεχνικών βελτιστοποίησης μπορεί να εκτελεστεί σε κάθε στάδιο ενός έργου, όπως ο σχεδιασμός, η κατασκευή, η λειτουργία και η συντήρηση. Το αντικείμενο εφαρμογής των παραπάνω διαδικασιών μπορεί να χωριστεί στις εξής κατηγορίες:

- Ελαχιστοποίηση κόστους: Ο στόχος είναι η ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους. Αυτό επιτυγχάνεται με την μείωση του βάρους ή του όγκου της κατασκευής.
- Βελτίωση δομικής απόδοσης : Στόχος είναι η βελτίωση καθορισμένων ιδιοτήτων της κατασκευής, για παράδειγμα η μηχανική συμπεριφορά και η αεροδυναμική απόδοση ώστε να ικανοποιούνται οι απαιτήσεις σχεδιασμού.
- Ελαχιστοποίηση περιβαλλοντικών επιπτώσεων : Στόχος είναι η μείωση της κατανάλωσης ενέργειας για την βελτίωση της περιβαλλοντικής απόδοσης της κατασκευής.
- Βελτιστοποίηση πολλαπλών στόχων : Ο στόχος της βελτιστοποίησης συνήθως περιλαμβάνει παραπάνω από έναν από τους τρεις παραπάνω στόχους.

Στην παρόν κεφάλαιο ,παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την διαδικασία βελτιστοποίησης με σκοπό κατά βάση την ελαχιστοποίηση του κόστους. Μέσω της ελαχιστοποίησης του κόστους προκύπτει αυτόματα και ελαχιστοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων , καθώς θα χρησιμοποιηθούν μελετημένες ποσότητες υλικών. Αυτός είναι άλλωστε και ο στόχος της διπλωματικής εργασίας.

Η κατηγορία βελτιστοποίησης που εφαρμόστηκε είναι η βελτιστοποίηση μεγέθους των διατομών. Στο πρόβλημα της βελτιστοποίησης του μεγέθους των διατομών ενός φορέα, ως παράμετροι σχεδιασμού χρησιμοποιούνται οι διαστάσεις των διατομών των δομικών στοιχείων. Ο στόχος είναι η ελαχιστοποίηση του βάρους της κατασκευής συγκεκριμένης τοπολογίας και σχήματος υπό ορισμένους περιορισμούς , όπως τις αναπτυσσόμενες τάσεις στα μέλη , την μετακίνηση των κόμβων κ.λπ.

## 4.2 Η ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΤΗΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ

Η διαδικασία της βελτιστοποίησης εκτελείται σε ολόκληρο το δομικό σύστημα, δηλαδή όλες οι βελτιστοποιήσιμες παράμετροι αντιμετωπίζονται ταυτόχρονα, λαμβάνοντας υπόψη όλους τους συνδυασμούς φορτίων σχεδιασμού, τις απαιτήσεις κώδικα , την κατασκευή και τους περιορισμούς κατασκευής. Η διαδικασία σχεδιασμού είναι μια επαναληπτική διαδικασία όπου η επανάληψη θεωρείται ως η διαδοχική δοκιμή υποψηφίων λύσεων και αξιολογεί αν κάθε υποψήφια λύση είναι καλύτερη ή όχι σε σύγκριση με τα προηγούμενα, ικανοποιώντας ταυτόχρονα τους περιορισμούς του προβλήματος.

Μια συγκεκριμένη διαδικασία που χρησιμοποιείται συνήθως από τους μηχανικούς είναι αυτή της <<Δοκιμής και Διόρθωσης>> . Η διαδικασία αυτή βασίζεται στην χρήση εμπειρικών τεχνικών του μηχανικού, και λόγω της πολυπλοκότητας των νέων κατασκευών και του μεγέθους των προβλημάτων δεν οδηγούμαστε στην βέλτιστη λύση. Αξιοποιώντας τις εξελίξεις στην τεχνολογία των υπολογιστών και την πρόοδο των αλγορίθμων βελτιστοποίησης κατέστη αναγκαία η αυτοματοποίηση της διαδικασίας του σχεδιασμού βελτιστοποίησης.

Τα στάδια που υποχρεούται να ακολουθήσει ο μηχανικός προτού αναλάβει την βελτιστοποίηση ενός έργου είναι τα εξής :

Βήμα 1: Εξοικείωση με το αρχικό μοντέλο.

Βήμα 2: Ανάπτυξη ειδικών απαιτήσεων του πελάτη.

Βήμα 3: Διατύπωση προβλήματος, ορισμός βελτιστοποιημένων παραμέτρων, περιορισμών. Διατύπωση στόχου βελτιστοποίησης.

Βήμα 4: Δοκιμαστικές εκτελέσεις βελτιστοποίησης και βαθμονόμηση της διαδικασίας.

Βήμα 5: Τελική εκτέλεση βελτιστοποίησης.

Βήμα 6: Προετοιμασία του βελτιστοποιημένου μοντέλου και της συνοδευτικής αναφοράς.

Η διαδικασία αναζήτησης βέλτιστης λύσης ξεκινά συνήθως από έναν αρχικό σχεδιασμό και σταδιακά βελτιώνει την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης μέχρι να επιτευχθεί η ζητούμενη σύγκλιση. Άρα, η ποσότητα που βελτιστοποιούμε είναι η αντικειμενική συνάρτηση. Για να μειωθεί το κόστος των υλικών αλλάζουμε τις διαστάσεις των υλικών οι οποίες αποτελούν και τις μεταβλητές σχεδιασμού, σύμφωνα πάντα με τους δεδομένους περιορισμούς. Οι διαστάσεις των υλικών μεταβάλλονται κατά την διαδικασία βελτιστοποίησης εντός των ορίων σχεδιασμοί και του βήματος που παρέχει ο πελάτης. : Πρέπει να παρέχονται τα όρια σχεδιασμού για όλες τις ιδιότητες τομέων που πρόκειται να βελτιστοποιηθούν ένα και εφόσον επιτρέπεται να αλλάξουν. Είναι σημαντικό να τονιστεί πως για κάθε διατομή δίνεται ένα διαφορετικό σετ διαστάσεων με το αντίστοιχο βήμα σε κάθε περίπτωση. Εάν κάποια από τις διαστάσεις διατομής πρέπει να παραμείνει αμετάβλητη (να μην βελτιστοποιηθεί), θα πρέπει επίσης να δηλωθεί.

Σε περίπτωση που στο αρχικό μοντέλο υπάρχουν σφάλματα/παραβιάσεις ελέγχων σχεδιασμού που επιτρέπονται από τον δομικό μηχανικό, πρέπει να εξαχθεί αναφορά σε μορφή Excel, η οποία να περιέχει μόνο τα σφάλματα ή τα τμήματα που παραβιάζουν τον έλεγχο σχεδιασμού, και να επιβεβαιωθεί ότι όλα αυτά τα σφάλματα θα αγνοηθούν κατά την διαδικασία βελτιστοποίησης.

Συνοψίζοντας, η διαδικασία βελτιστοποίησης βασίζεται στην ομαδοποίηση των στοιχείων που χρησιμοποιούνται από τον μηχανικό σχεδιασμού, δηλαδή διαστάσεις διατομής για τα στοιχεία στα οποία εκχωρούνται οι ίδιες ιδιότητες διατομής. Πιο συγκεκριμένα , η διαδικασία που περιγράφεται στο ETABs με τα βήματα <<καθορισμός ιδιότητας τμήματος>> και ιδιότητα εκχωρημένης τομής>>.

Ας δούμε αναλυτικότερα τα βήματα που ακολουθήσαμε στην πρώτη εφαρμογή, για κάθε διατομή ξεχωριστά, με σκοπό να πετύχουμε τις απαιτούμενες αλλαγές των διαστάσεων:

Διατομή	Τύπος	Διαστάσεις	Αρχική τιμή	Ελάχιστη τιμή	Μέγιστη τιμή	Βήμα
<b>B25X40</b>	Ορθ.	Πλάτος	0.25	0.20	0.50	0.05
		Ύψος	0.40	0.20	0.80	0.05
<b>B25X100</b>	Ορθ.	Πλάτος	0.25	0.20	0.50	0.05
		Ύψος	1.00	0.50	1.20	0.05
<b>B25X140</b>	Ορθ.	Πλάτος	0.25	0.20	0.50	0.05
		Ύψος	1.40	0.80	1.60	0.05
<b>B25X170</b>	Ορθ.	Πλάτος	0.25	0.20	0.50	0.05

		Ύψος	1.70	1.00	2.00	0.05
<b>B30X80</b>	Ορθ.	Πλάτος	0.30	0.10	0.60	0.05
		Ύψος	0.80	0.40	1.40	0.05
<b>B30X90</b>	Ορθ.	Πλάτος	0.30	0.10	0.60	0.05
		Ύψος	0.90	0.70	1.60	0.05
<b>B30X110</b>	Ορθ.	Πλάτος	0.30	0.10	0.60	0.05
		Ύψος	1.10	1.00	1.80	0.05
<b>B30X140</b>	Ορθ.	Πλάτος	0.30	0.20	1.00	0.05
		Ύψος	1.40	0.10	0.60	0.05
<b>C30X60</b>	Ορθ.	Πλάτος	0.60	0.30	1.20	0.05
		Ύψος	0.30	0.10	0.60	0.05
<b>C30X80</b>	Ορθ.	Πλάτος	0.80	0.70	1.50	0.05
		Ύψος	0.30	0.10	0.60	0.05
<b>C30X100</b>	Ορθ.	Πλάτος	1.00	0.40	0.80	0.05
		Ύψος	0.30	0.40	0.80	0.05
<b>C60X60</b>	Ορθ.	Πλάτος	0.60	0.40	0.80	0.05
		Ύψος	0.60	0.10	0.50	0.05
<b>CØ60.</b>	Κυκλ.	Ύψος	0.60	0.00	0.02	0.05
<b>CHS200/8</b>	Σωλ.	Πλάτος	0.20	0.10	0.50	0.05
		Ύψος	0.01	0.00	0.02	0.001
<b>CHS 200X8</b>	Σωλ.	Πλάτος	0.20	0.10	0.50	0.05
		Ύψος	0.01	0.10	0.50	0.001
<b>SHS200/8</b>	Σωλ.	Πλάτος	0.20	0.10	0.50	0.05
		Ύψος	0.20	0.10	0.50	0.001
<b>Wall 250</b>	Σωλ.	Πάχος	0.25	0.10	0.50	0.05
<b>Wall 300</b>	Σωλ.	Πάχος	0.30	0.10	0.60	0.05

**Παράρτημα: Επισυνάπτω τον κώδικα που δημιουργήθηκε στο Etabs με σκοπό να επιτύχουμε όλα τα παραπάνω.**

```
"formulate" : {
  "components" : {
    "B25X100" : {
      "type" : "rectangle",
      "variables" : {
        "t2" : {
          "value" : "0.25",
          "lower_bound" : "0.2",
          "upper_bound" : "0.5",
          "step" : "0.05"
        }
        "t3" : {
          "value" : "1",
          "lower_bound" : "0.5",
          "upper_bound" : "1.2",
          "step" : "0.05"
        }
      }
    }
    "B25X140" : {
      "type" : "rectangle",
      "variables" : {
        "t2" : {
          "value" : "0.25",
          "lower_bound" : "0.2",
          "upper_bound" : "0.5",
          "step" : "0.05"
        }
        "t3" : {
          "value" : "1.4",
          "lower_bound" : "0.8",
          "upper_bound" : "1.6",
          "step" : "0.05"
        }
      }
    }
    "B25X170" : {
      "type" : "rectangle",
      "variables" : {
        "t2" : {
          "value" : "0.25",
          "lower_bound" : "0.2",
          "upper_bound" : "0.5",
          "step" : "0.05"
        }
      }
    }
  }
}
```

```
"t3" : {  
  "value" : "1.7",  
  "lower_bound" : "1",  
  "upper_bound" : "2",  
  "step" : "0.05"
```

```
"B25X40" : {  
  "type" : "rectangle",  
  "variables" : {  
    "t2" : {  
      "value" : "0.25",  
      "lower_bound" : "0.2",  
      "upper_bound" : "0.5",  
      "t3" : {  
        "value" : "0.4",  
        "lower_bound" : "0.2",  
        "upper_bound" : "0.8",  
        "step" : "0.05"
```

```
"B30X110" : {  
  "type" : "rectangle",  
  "variables" : {  
    "t2" : {  
      "value" : "0.3",  
      "lower_bound" : "0.1",  
      "upper_bound" : "0.6",  
      "step" : "0.05"
```

```
"t3" : {  
  "value" : "1.1",  
  "lower_bound" : "0.7",  
  "upper_bound" : "1.6",  
  "step" : "0.05"
```

```
"B30X140" : {  
  "type" : "rectangle",  
  "variables" : {  
    "t2" : {  
      "value" : "0.3",  
      "lower_bound" : "0.1",  
      "upper_bound" : "0.6",
```

```
"step" : "0.05"
"t3" : {
  "value" : "1.4",
  "low er_bound" : "1",
  "upper_bound" : "1.8",
  "step" : "0.05"
"B30X60" : {
  "type" : "rectangle",
  "variables" : {
    "t2" : {
      "value" : "0.3",
      "lower_bound" : "0.2",
      "upper_bound" : "0.6",
      "step" : "0.05"

    "t3" : {
      "value" : "0.6",
      "lower_bound" : "0.4",
      "upper_bound" : "1",
      "step" : "0.05"
"B30X80" : {
  "type" : "rectangle",
  "variables" : {
    "t2" : {
      "value" : "0.3",
      "lower_bound" : "0.1",
      "upper_bound" : "0.6",
      "step" : "0.05"

    "t3" : {
      "value" : "0.8",
      "lower_bound" : "0.4",
      "upper_bound" : "1.2",
      "step" : "0.05"

"B30X90" : {
  "type" : "rectangle",
  "variables" : {
    "t2" : {
```



```
"value" : "0.3",
"lower_bound" : "0.1",
"upper_bound" : "0.6",
"step" : "0.05"
"t3" : {
"value" : "0.9",
"lower_bound" : "0.4",
"upper_bound" : "1.4",
"step" : "0.05"
"C30X100" : {
"type" : "rectangle",
"variables" : {
"t2" : {
"value" : "1",
"lower_bound" : "0.7",
"upper_bound" : "1.5",
"step" : "0.05"
"t3" : {
"value" : "0.3",
"lower_bound" : "0.1",
"upper_bound" : "0.6",
"step" : "0.05"
"C30X60" : {
"type" : "rectangle",
"variables" : {
"t2" : {
"value" : "0.6",
"lower_bound" : "0.2",
"upper_bound" : "1",
"step" : "0.05"

"t3" : {
"value" : "0.3",
"lower_bound" : "0.1",
"upper_bound" : "0.6",
"step" : "0.05"
"C30X80" : {
"type" : "rectangle",
"variables" : {
"t2" : {
```

```
"value" : "0.8",
"lower_bound" : "0.3",
"upper_bound" : "1.2",
"step" : "0.05"
"t3" : {
"value" : "0.3",
"lower_bound" : "0.1",
"upper_bound" : "0.6",
"step" : "0.05"
"C60X60" : {
"type" : "rectangle",
"variables" : {
"t3" : {
"value" : "0.6",
"lower_bound" : "0.4",
"upper_bound" : "0.8",
"step" : "0.05"
"CHS 200X8" : {
"type" : "pipe",
"variables" : {
"t3" : {
"value" : "0.2",
"lower_bound" : "0.1",
"upper_bound" : "0.5",
"step" : "0.05"

"tw" : {
"value" : "0.008",
"lower_bound" : "0.001",
"upper_bound" : "0.015",
"step" : "0.001"
"CHS200/8" : {
"type" : "pipe",
"variables" : {
"t3" : {
"value" : "0.2",
"lower_bound" : "0.1",
"upper_bound" : "0.5",
"step" : "0.05"
"tw" : {
```

```
"value" : "0.008",
"lower_bound" : "0.001",
"upper_bound" : "0.015",
"step" : "0.001"
"CØ60" : {
  "type" : "circle",
  "variables" : {
    "t3" : {
      "value" : "0.6",
      "lower_bound" : "0.4",
      "upper_bound" : "0.8",
      "step" : "0.05"
    }
  }
"SHS200/8" : {
  "type" : "tube",
  "variables" : {
    "t3" : {
      "value" : "0.2",
      "lower_bound" : "0.1",
      "upper_bound" : "0.5",
      "step" : "0.05"
    }
  }
"copycat_variables" : {
  "t2" : "t3",
  "tf" : "tw"
"Wall 250" : {
  "type" : "area",
  "variables" : {
    "thickness" : {
      "value" : "0.25",
      "lower_bound" : "0.1",
      "upper_bound" : "0.5",
    }
  }
"Wall 300" : {
  "type" : "area",
  "variables" : {
    "thickness" : {
      "value" : "0.3",
      "lower_bound" : "0.1",
      "upper_bound" : "0.6",
      "step" : "0.05"
    }
  }
"objectives" : {
  "material_cost" : {
```

```

"objective_params" : {
  "minimize" : "True"
  "constraints" : {
    "design_violations" : {
      "type" : "bound constraint",
      "constraint_params" : {
        "lower_bound" : "0",
        "upper_bound" : "1"
      }
      "function_params" : {
        "threshold" : "1"
      }
      "optimizer" : {
        "type" : "sizing"
        "algorithms" : {
          "projected_quasi_newton" : {
            "type" : "unconstrained",
            "blender" : {
              "type" : "classic"
            }
            "algorithm_params" : {
              "max_num_iter" : "300",
              "max_fun_eval" : "1000",
              "max_cuts" : "5",
              "tolerance" : "1"
            }
          }
        }
      }
    }
  }
}

```

Αφού ολοκληρωθεί η παραπάνω διαδικασία και εφόσον έχουμε καταλήξει σε μια τιμή που είναι ανάμεσα στο ανώτερο και στο κατώτερο όριο που δίνεται από τους κανονισμούς , τονίζουμε πως η αρχική τιμή και η βελτιστοποιημένη τιμή σε κάθε διατομή, έχουν την ίδια τιμή. Συγκεντρωτικά , οι αντίστοιχες τιμές φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Διατομή	Διάσταση	Αρχική Τιμή	Βελτιστοποιημένη Τιμή
<b>B25X40</b>	Πλάτος	0.25	0.25
	Ύψος	0.40	0.40
<b>B25X100</b>	Πλάτος	0.25	0.25
	Ύψος	1.00	1.00
<b>B25X140</b>	Πλάτος	0.25	0.25
	Ύψος	1.40	1.00
<b>B25X170</b>	Πλάτος	0.25	0.25
	Ύψος	1.70	1.70

<b>B30X90</b>	Πλάτος	0.30	0.30
	Ύψος	0.90	0.90
<b>B30X110</b>	Πλάτος	0.30	0.30
	Ύψος	1.10	1.05
<b>B30X140</b>	Πλάτος	0.30	0.30
	Ύψος	1.40	1.40
<b>C30X60</b>	Πλάτος	0.60	0.60
	Ύψος	0.30	0.30
<b>C30X80</b>	Πλάτος	0.80	0.80
	Ύψος	0.30	0.30
<b>C30X100</b>	Πλάτος	1.00	1.00
	Ύψος	0.30	0.30
<b>C60X60</b>	Πλάτος	0.60	0.60
	Ύψος	0.60	0.60
<b>CØ60.</b>	Πλάτος	0.60	0.60
<b>CHS200/8</b>	Ύψος	0.20	0.20
	Πλάτος	0.01	0.01
<b>CHS 200X8</b>	Ύψος	0.20	0.20
	Πλάτος	0.01	0.01
<b>SHS200/8</b>	Ύψος	0.20	0.20
	Πλάτος	0.20	0.20

Μετά την αλλαγή των διαστάσεων ο περιορισμός πάντα είναι να μην υπάρχουν αστοχίες. Ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης που εφαρμόστηκε δεν λαμβάνει υπόψη τους περιορισμούς. Η εμπειρία του μηχανικού όμως είναι ικανή να τους περιορίσει. Για να ολοκληρωθεί ο αριθμός των επαναλήψεων, δίνεται ένα ποσοστό επαναλήψεων αλλαγής στον αλγόριθμο. Ο αλγόριθμος που χρησιμοποιήθηκε ονομάζεται αλγόριθμος PQN και αναλύεται στην επόμενη ενότητα.

#### 4.3 Αλγόριθμος PQN

Ο αλγόριθμος αυτός είναι μια εφαρμογή της μεθόδου Implicit filtering, η οποία αποτελεί μία derivative-free μέθοδο βελτιστοποίησης που δεν κάνει άμεση χρήση «παραγώγων» και έχει αναπτυχθεί τα τελευταία χρόνια. Βασίζεται σε ένα συνδυασμό των γνωστών αλγορίθμων Quasi-Newton που χρησιμοποιούνται για βελτιστοποίηση προβλημάτων με περιορισμούς (bound constraints), των μη-γραμμικών προβλημάτων ελάχιστων τετραγώνων και ενός ντετερμινιστικού αλγορίθμου αναζήτησης.

Η Implicit filtering είναι κατά βάση μια ντετερμινιστική μέθοδος δειγματοληψίας για βελτιστοποίηση προβλημάτων με οριακές συνθήκες (bound constrained optimization). Οι μέθοδοι δειγματοληψίας, γενικά, ελέγχουν την πρόοδο της βελτιστοποίησης αξιολογώντας τις εφικτές λύσεις της αντικειμενικής συνάρτησης, χωρίς τη χρήση «διαφορικών» (gradients). Σε κάποιες μεθόδους όμως, όπως στη συγκεκριμένη μέθοδο, γίνεται «εκτίμηση» και υπολογισμός της παραγώγου ή/ και άλλων απαιτούμενων πληροφοριών από τη δειγματοληψία και γι' αυτό συγκαταλέγεται στις derivative-free μεθόδους. (Liu et al., 2006)

Μέθοδοι όπως η Implicit filtering έχουν σχεδιαστεί για να ελαχιστοποιούν αντικειμενικές συναρτήσεις που είναι μη ομαλές, πιθανώς ασυνεχείς ή στοχαστικές και οι οποίες μπορεί να μην ορίζονται καν σε όλα τα σημεία του χώρου. Δεν είναι μέθοδοι για «ομαλά» προβλήματα όπου η συνάρτηση που θα ελαχιστοποιηθεί και οι περιορισμοί εκφράζονται σε όρους παραγωγισίμων συναρτήσεων. Γιατί σε αυτή την περίπτωση υπάρχουν άλλες αποτελεσματικές, αυστηρά ντετερμινιστικές μέθοδοι, που βασίζονται στη χρήση παραγώγων, όπως η μέθοδος μεγίστης καθόδου (Steepest Descent) κτλ. Επίσης, μέθοδοι όπως η Implicit filtering, μπορεί να επιφέρουν σημαντικά οφέλη και σε περιπτώσεις όπου η χρήση άλλων μαθηματικών μεθόδων απαιτούν μεγάλο υπολογιστικό «κόστος» προκειμένου να δημιουργήσουν τις παραγώγους της αντικειμενικής συνάρτησης. (Liu et al., 2006)

Η Implicit filtering θεωρείται επέκταση της μεθόδου αναζήτησης συντεταγμένων (coordinate search algorithm), την απλούστερη δυνατή προσέγγιση στη βελτιστοποίηση. Διαφέρει όμως από αυτήν, καθώς η Implicit filtering δημιουργεί ένα τοπικό μοντέλο της αντικειμενικής συνάρτησης χρησιμοποιώντας τη μέθοδο Quasi-Newton. Εν ολίγοις, η Implicit filtering επεκτείνει την μέθοδο αναζήτησης συντεταγμένων προσεγγίζοντας ένα διαφορικό με χρήση της μεθόδου παρεμβολής των ελαχίστων τετραγώνων, στη συνέχεια χρησιμοποιεί αυτήν την κατά προσέγγιση «παράγωγο» για να δημιουργήσει ένα νέο απλούστερο μοντέλο και έπειτα αναζητά μία καλύτερη λύση αντλώντας πλέον πληροφορίες από αυτό το μοντέλο. Πρακτικά, εκμεταλλεύεται τα πλεονεκτήματα αφενός των απλών μεθόδων δειγματοληψίας για μη ομαλά προβλήματα ή προβλήματα με ασυνέχειες (derivative-free μέθοδοι) και αφετέρου άλλων αποτελεσματικών μαθηματικών μεθόδων (gradient-based) οι οποίες χρησιμοποιούνται μόνο σε ομαλά και συνεχή προβλήματα και αποφέρουν γρήγορη σύγκλιση.

Η Implicit filtering είναι σχεδιασμένη για να επιλύει και να βελτιστοποιεί προβλήματα με περιορισμούς (bound constraint problems). Η μαθηματική διατύπωση των προβλημάτων αυτών εκφράζεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$\min_{x \in \Omega} f(x), \text{ όπου } \Omega = \{x \in R^N, L_i \leq (x)_i \leq U_i\} \text{ (Εξίσωση 1)}$$

Στην παραπάνω εξίσωση τα  $L_i, U_i$  είναι το πεπερασμένο άνω και κάτω όριο του  $i$ -στου στοιχείου  $(x)_i$ , του διανύσματος της μεταβλητής  $x$  και  $N$  ο αριθμός των μεταβλητών σχεδιασμού. Τα βασικά στάδια του αλγορίθμου αναλύονται παρακάτω:

**α. Διαδικασία δειγματοληψίας**

Ο αλγόριθμος ξεκινάει τη λειτουργία του με τη λήψη δειγμάτων, από τα οποία υπολογίζει την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης και στη συνέχεια κατασκευάζει ένα πίνακα (stencil) ώστε αργότερα να τον χρησιμοποιήσει για διάφορες διεργασίες, όπως για παράδειγμα στον υπολογισμό των απαιτούμενων διαφορικών που θα χρησιμοποιηθούν από τη μέθοδο Quasi-Newton.

Αν θεωρήσουμε ως  $x_c$  την μεταβλητή μιας τυχαίας επανάληψης και  $f(x_c)$  την αντίστοιχη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης, τότε ο αλγόριθμος προεπιλέγει  $2N$  δείγματα  $x_c \pm h v_i$ , όπου  $v_i = (L_i - U_i) e_i$  με  $1 \leq v_i \leq N$ . Ο όρος  $e_i$  αναφέρεται στο  $i$ -στο στοιχείο του μοναδιαίου διανύσματος και ο όρος  $h$  σε μια παράμετρο κλίμακας με  $h = (2^{-n})_{n=start}^{depth}$ , όπου η τιμή του  $h$  μειώνεται συνεχώς κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης μέχρι να βρεθεί η βέλτιστη τιμή της  $f(x)$ . Οι τιμές που λαμβάνει το  $n$  (και άρα και το  $h$ ) επιλέγονται από τον χρήστη κάθε φορά. Εάν ολοκληρωθεί η αλληλουχία της κλιμάκωσης δηλ. εξαντληθούν οι τιμές του  $h$ , τότε η διαδικασία βελτιστοποίησης τερματίζεται.

**β. Προσέγγιση παραγώγων μέσω πεπερασμένων διαφορών**

Με βάση τον προηγούμενο πίνακα που περιέχει τις τιμές της  $f(x)$ , σε κάθε κλιμάκωση  $h$ , υπολογίζεται ένας προσεγγιστικός πίνακας παραγώγων (stencil gradient) μέσω πεπερασμένων διαφορών και ο οποίος χρησιμοποιείται αργότερα για να υπολογιστεί η νέα κατεύθυνση στην οποία θα ψάξει ο αλγόριθμος για καλύτερες λύσεις.

Ο πίνακας παραγώγων είναι η λύση του γραμμικού προβλήματος ελαχίστων τετραγώνων  $\min_{y \in R^N} \| h V^T y - \delta(f, x, V, h)^T \|^2$  και ορίζεται ως  $\nabla f(x, V, h) = Df(x, V, h)^T$ .

$V$  είναι ο πίνακας κατεύθυνσης με  $V = (v_1, v_2, \dots, v_{2N})$

$Df(x, V, h)$  είναι ο Ιακωβιανός πίνακας, ο οποίος είναι ένα διάνυσμα – γραμμή και υπολογίζεται από τη σχέση  $Df(x, V, h) = \frac{1}{h} \delta(f, x, V, h) V^+$ , όπου

$$\delta(f, x, V, h) = \begin{pmatrix} f(x + h v_1) - f(x) \\ f(x + h v_2) - f(x) \\ \dots \\ f(x + h v_K) - f(x) \end{pmatrix}^T \text{ και } V^+ \text{ είναι ο ψευδο-αντίθετος πίνακας του } V.$$

### γ. Υπολογισμός νέας κατεύθυνσης αναζήτησης καλύτερης λύσης

Η νέα κατεύθυνση προς την οποία πρέπει να κινηθεί ο αλγόριθμος υπολογίζεται από τη μέθοδο projected Quasi-Newton μέσω της κατασκευής ενός προσεγγιστικού πίνακα Hess, ο οποίος περιλαμβάνει πληροφορίες δεύτερης παραγώγου και σε κάθε επανάληψη ενημερώνεται (είτε μέσω της μεθόδου BFGS είτε της SR1) ώστε να υπολογίζεται κάθε φορά η νέα κατεύθυνση.

Η κατεύθυνση στη μέθοδο projected Quasi-Newton ορίζεται ως:

$$d = -R^{-1}\nabla f(x, V, h)$$

όπου  $R$  είναι ένας πίνακας που προσεγγίζει τον αντίστροφο του πίνακα Hess και ισχύει  $R = P_{B^\epsilon}(x) + (I - P_{B^\epsilon}(x))H(I - P_{B^\epsilon}(x))$ .

Με τον τελεστή  $P$  ορίζεται η προβολή (projection) του συνόλου  $B^\epsilon$  στο  $\Omega$  με

$$B^\epsilon = P_{B^\epsilon}(x) = \left\{ i \mid U_i - (x)_i \leq \epsilon \text{ και } \partial f(x) / \partial (x)_i \leq -\sqrt{\epsilon} \right\} \cup \left\{ i \mid (x)_i - L_i \leq \epsilon \text{ και } \partial f(x) / \partial (x)_i \geq \sqrt{\epsilon} \right\}$$

όπου  $\epsilon = 10^{-6}$ .

Ο αρχικός πίνακας  $R$  τίθεται ίσος με τον μοναδιαίο πίνακα  $I$  και στη συνέχεια ενημερώνεται είτε μέσω της μεθόδου BFGS (Broyden – Fletcher – Goldfarb – Shanno) είτε της Symmetric Rank – One SR1

### δ. Περιορισμοί

Οι περιορισμοί στις τιμές που μπορεί να λάβει η μεταβλητή  $x$  δημιουργούν πρόβλημα στη διαδικασία βελτιστοποίησης της αντικειμενικής συνάρτησης. Αυτό συμβαίνει γιατί, αν κατά τη διαδικασία αναζήτησης καλύτερης λύσης βρεθεί κάποια τιμή η οποία είναι εκτός του πεδίου ορισμού του  $\Omega$ , τότε θα δώσει μια τιμή αντικειμενικής συνάρτησης που στην ουσία θα είναι μη εφικτή (infeasible). Όμως τόσο οι πίνακες των αντικειμενικών τιμών όσο και οι πίνακες των παραγώγων, σε όλη τη διάρκεια βελτιστοποίησης λαμβάνουν απλά τιμές, οπότε πρέπει να ενημερώνονται συνεχώς για τις μη εφικτές, ώστε να μην τις λαμβάνουν υπόψη. Έτσι, γίνεται ειδική διαχείριση των περιορισμών και ο αλγόριθμος ελέγχει όλες τις λύσεις, ώστε οι τιμές που είναι μη εφικτές να μη γίνονται αποδεκτές και έτσι η κατεύθυνση αναζήτησης λύσεων να είναι πάντα εντός του πεδίου εφικτών τιμών.



**ε. Κριτήρια τερματισμού διαδικασίας βελτιστοποίησης (termination criteria)**

Στην Implicit filtering γίνονται συνεχώς δύο ειδών επαναληπτικές διαδικασίες μία εξωτερική και μία εσωτερική. Η εξωτερική επανάληψη απλά ελέγχει την τιμή του  $h$  και τον συνολικό αριθμό των υπολογισμών της αντικειμενικής συνάρτησης  $f$  που έχουν γίνει. Η εσωτερική επανάληψη (ή Quasi-Newton επανάληψη), η οποία εκτελείται για κάθε τιμή της παραμέτρου κλίμακας  $h$ , είναι αυτή στην οποία ενημερώνονται οι πίνακες και υπολογίζεται η νέα κατεύθυνση σύμφωνα με τη μέθοδο Quasi-Newton.

Ως εκ τούτου, η εξωτερική επανάληψη θα σταματήσει όταν:

- ο συνολικός αριθμός (budget) των υπολογισμών της αντικειμενικής συνάρτησης  $f$  ξεπεράσει κάποιο όριο που έχει προκαθοριστεί ή
- ολοκληρωθεί η αλληλουχία της κλιμάκωσης δηλ. εξαντληθούν οι τιμές του  $h$ .

Αντίστοιχα, η εσωτερική επανάληψη θα σταματήσει όταν:

- η τιμή της  $f$  σε κάποιο σημείο είναι μικρότερη από οποιοδήποτε στοιχείο μέσα στον πίνακα πεπερασμένων διαφορών (stencil failure) ή
- ικανοποιηθούν τα εσωτερικά κριτήρια της κάθε επανάληψης της μεθόδου Quasi-Newton.

Τέλος, υπάρχει δυνατότητα να τεθούν και άλλα κριτήρια τερματισμού από τον χρήστη, κριτήρια όπως συγκεκριμένη τιμή – στόχος της αντικειμενικής συνάρτησης  $f$ , κ.α.

Όλα τα παραπάνω υλοποιούνται και αξιολογούνται κατά τη διαδικασία βελτιστοποίησης. Κατά συνέπεια, το επίπεδο ασφάλειας της βελτιστοποιημένης σχεδίασης είναι ακριβώς το ίδιο με αυτό του αρχικού. Προκειμένου να επαληθευτεί η ασφάλεια του βελτιστοποιημένου σχεδιασμού, το βελτιστοποιημένο μοντέλο παραδίδεται στον μηχανικό σχεδιασμού, ώστε να πραγματοποιήσει ανάλυση και σχεδιασμό και να διασφαλίσει την ασφάλεια του βελτιστοποιημένου σχεδιασμού.

Πρέπει να παρέχονται τυχόν περιορισμοί συνδεσιμότητας. Για παράδειγμα, το πλάτος μιας δοκού πρέπει να είναι ίσο ή μικρότερο από το πλάτος των διατμητικών τοιχωμάτων για εκείνες τις δοκούς και τους διατμητικούς τοίχους (συγκεκριμένης διατομής) που συνδέονται. Είναι πολύ σημαντικό να μην παραβιάζεται κανένας περιορισμός

συνδεσιμότητας στο αρχικό μοντέλο που παρέχεται από τον πελάτη και επαληθεύεται στο πρόγραμμα βελτιστοποίησης.

Όλοι οι επιπλέον περιορισμοί που απαιτούνται, πρέπει να παρέχουν περιορισμούς μάζας, μετατόπισης ή πλευρικής μετατόπισης. Πρέπει επίσης να παρέχεται λεπτομερής περιγραφή του τρόπου με τον οποίο εκτελούνται οι πρόσθετοι έλεγχοι σχεδιασμού (π.χ. τα φύλλα excel που χρησιμοποιούνται από τον μηχανικό σχεδιασμού). Ο πελάτης πρέπει να παρέχει ένα αρχείο Excel που να ορίζει για κάθε ιδιότητα ενότητας τους ελέγχους σχεδιασμού που πραγματοποιούνται.

Τιμολόγιο Υλικών			
Δομικά Στοιχεία	Αρχική Τιμή	Βελτιστοποιημένη Τιμή	Μείωση
Περ. Σκυροδέματος	165,786.34 €	153,664.36 €	7.31%
Οπλισμός	144.01 €	144.01 €	0.00%
Δοκοί-Σκυρόδεμα	291.12 €	291.12 €	0.00%
Δοκοί-Ράβδοι	253.25 €	251.16 €	0.82%
Δοκάρια-Χάλυβας	3,793.78 €	3,793.78 €	0.00%
Στήλες-Σκυρόδεμα	6,954.78 €	6,805.49 €	2.15%
Στήλες-Ράβδος	12,678.61 €	13,514.25 €	-6.59%
Σύνολο	189,901.90 €	178,464.18 €	6.02%

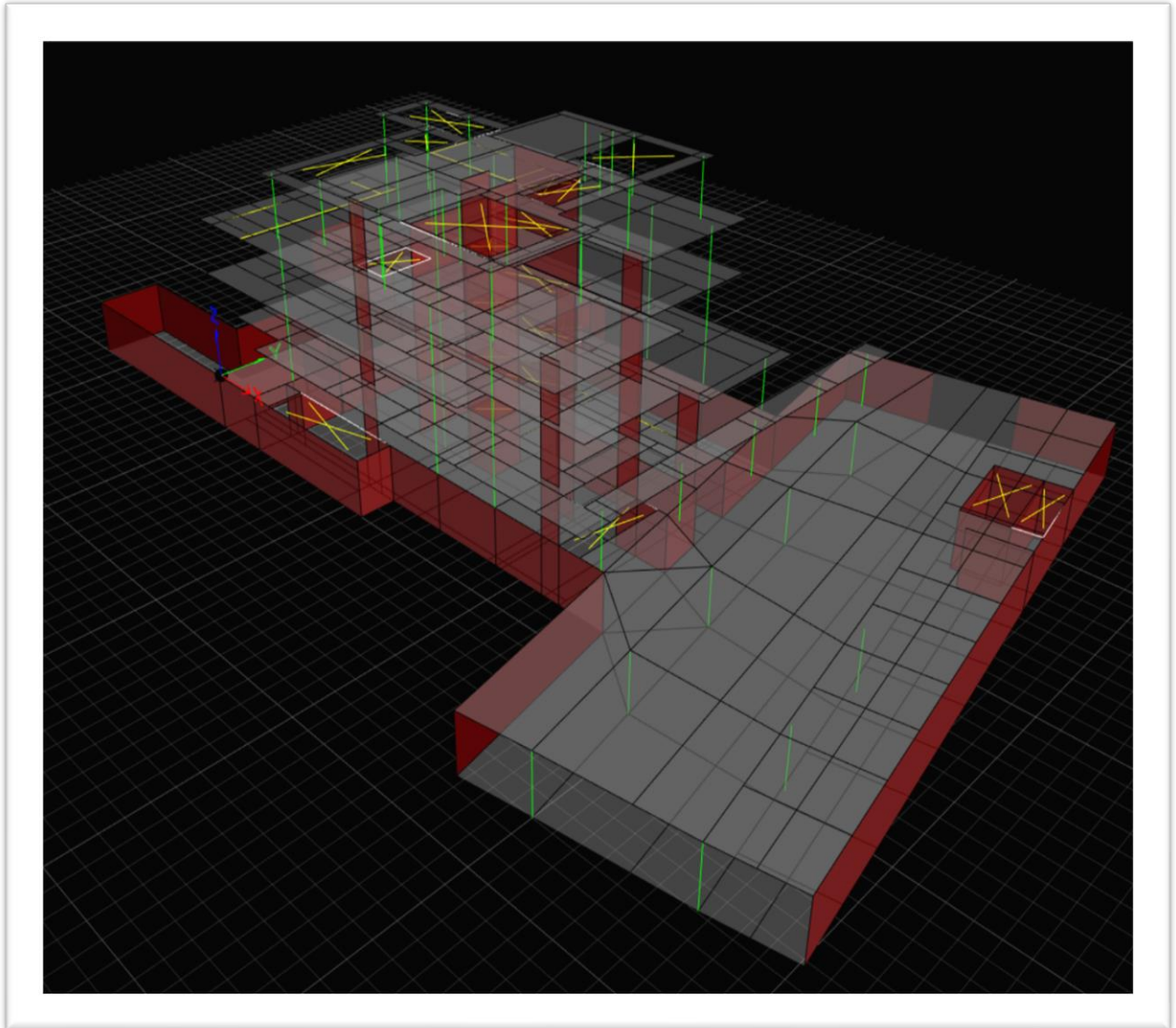
#### Τελικός Πίνακας-Αρχική και Βελτιστοποιημένη Τιμή.

Για να συντάξω το τελικό συμπέρασμα σχετικά με την ελαχιστοποίηση του κόστους στο συγκεκριμένο παράδειγμα, δημιουργήθηκε τον παραπάνω πίνακα, ο οποίος περιλαμβάνει και ένα τιμολόγιο για τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στο έργο που αναλάβαμε. Στην δεύτερη στήλη έχω καταγράψει την αρχική τιμή των υλικών των αντίστοιχων δομικών στοιχείων που αναγράφονται στην πρώτη στήλη. Στην επόμενη στήλη αναγράφεται η βελτιστοποιημένη τελικά τιμή του κόστους των υλικών σε κάθε περίπτωση. Η βελτιστοποιημένη τιμή όπως είναι λογικό είναι μικρότερη από την αρχική τιμή με ποσοστό μείωσης που αναγράφεται στην τελευταία στήλη. Αναλυτικά, στις περιοχές του κτιρίου όπου τοποθετείται οπλισμός αλλά και στα δοκάρια από οπλισμένο σκυρόδεμα και χάλυβα δεν παρατηρείται καμία μείωση. **Δηλαδή τα επιφανειακά στοιχεία του κτιρίου δεν έχουν μοντελοποιηθεί.** Η συνολική μείωση του κόστους των υλικών είναι της τάξης του **6.02%** και το αρχικό συνολικό κόστος από **189,901.90€** μετατρέπεται τελικώς σε **178,464.18€**.

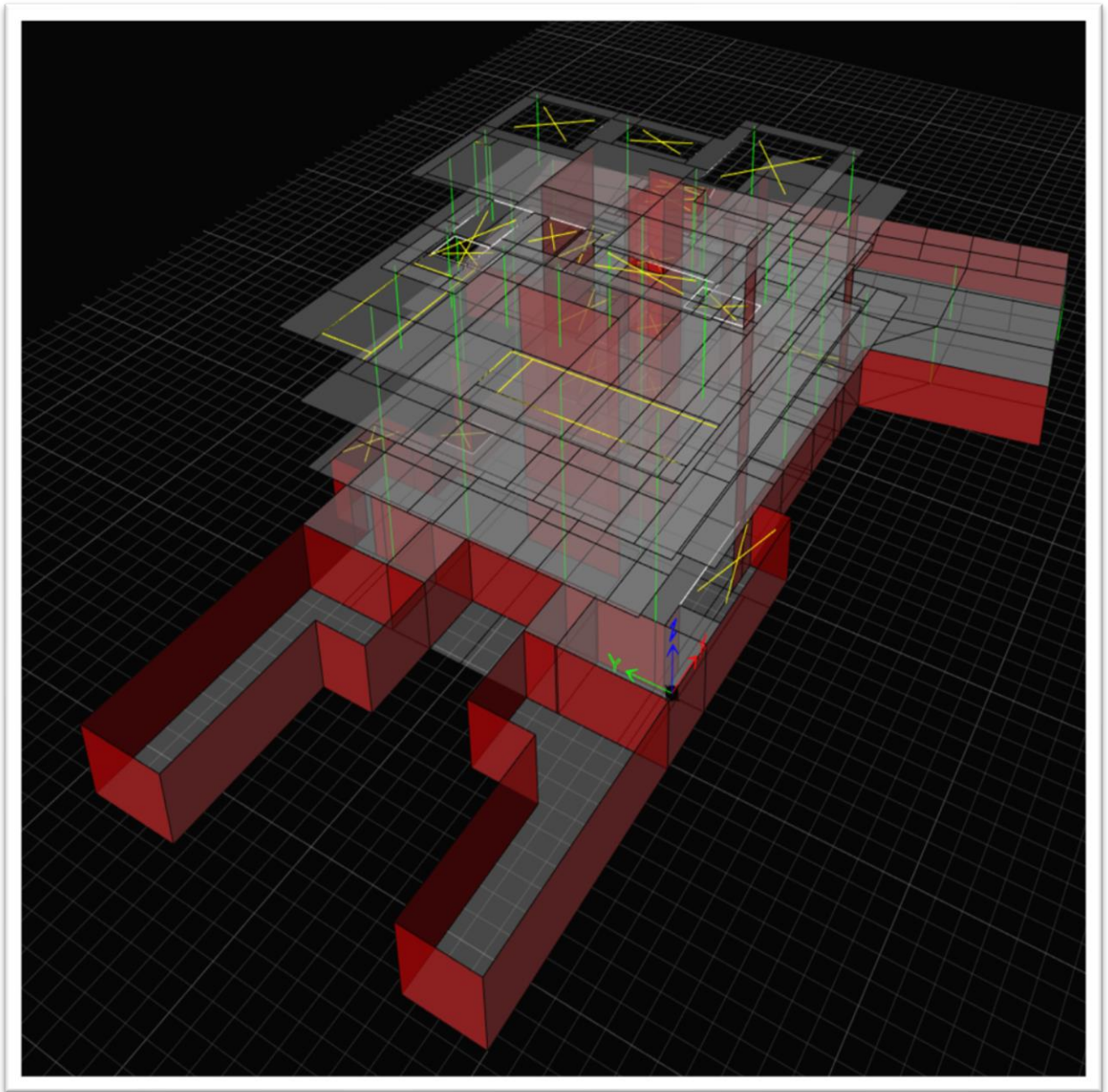
#### 4.4 ΑΠΟΤΥΠΩΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ΜΕΣΩ ΤΟΥ ETABS

Για την πλήρη κατανόηση, θα δούμε πως πραγματοποιήθηκαν όλα τα παραπάνω μέσω του προγράμματος που κάναμε χρήση. Αναλυτικότερα θα δούμε πως δόθηκαν οι αντίστοιχες ρυθμίσεις με σκοπό να έχουμε μια βέλτιστη μορφή του έργου που μας δόθηκε.

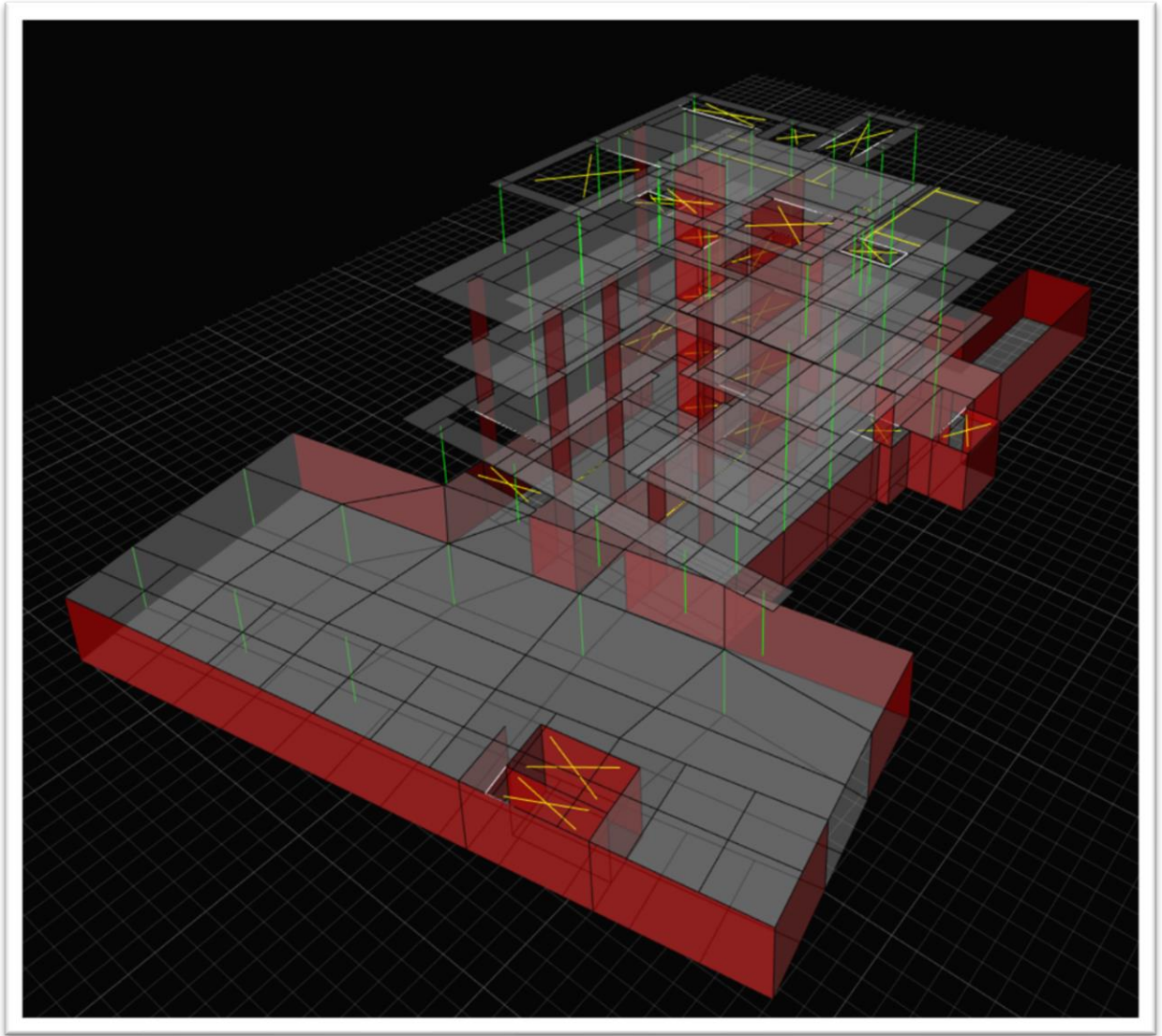
Επισυνάπτονται τρεις όψεις του κτιρίου ,για να έχουμε οπτική αντίληψη του παραδείγματος και της μορφής του:



Όψη 1.



Όψη 2



Όψη 3

Σημαντική αναφορά πρέπει να γίνει για τα φορτία που χρησιμοποιήθηκαν, την κατανομή τους και τους διάφορους συνδυασμούς που χρησιμοποιήσαμε για τους ελέγχους.

**E** Load Case Data ×

**General**

Load Case Name:  Design...

Load Case Type/Subtype: Modal Eigen Notes...

Mass Source: MsSrcFOREA

Analysis Model: Default

---

**P-Delta/Nonlinear Stiffness**

Use Preset P-Delta Settings Noniterative based on mass Modify/Show...

Note: Nonlinear case option for P-Delta does not apply when Preset P-Delta is noniterative based on mass.

---

**Loads Applied**

Load Type	Load Name	Target Mass Par. Ratio, %	Static Correction
Load Pattern	Dead	99	No
Load Pattern	Dead	99	No

Add  
Delete  
 Advanced

---

**Other Parameters**

Maximum Number of Modes:

Minimum Number of Modes:

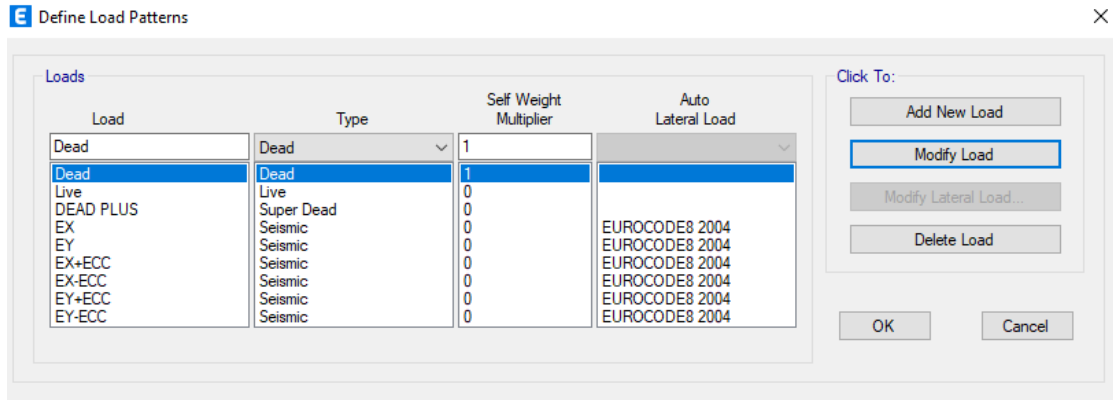
Frequency Shift (Center):  cyc/sec

Cutoff Frequency (Radius):  cyc/sec

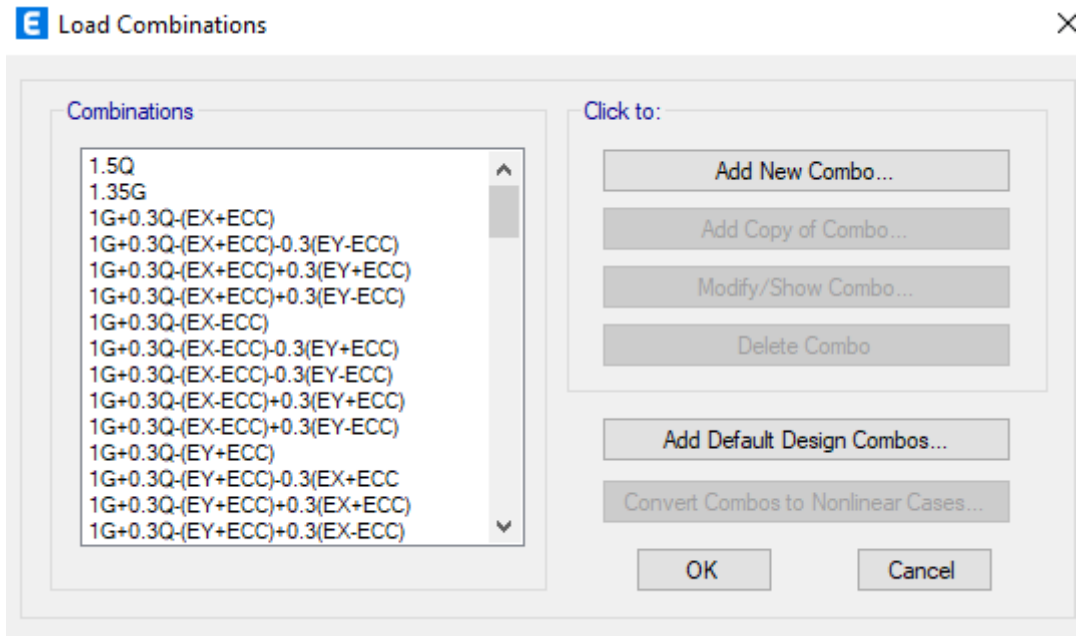
Convergence Tolerance:

Allow Auto Frequency Shifting

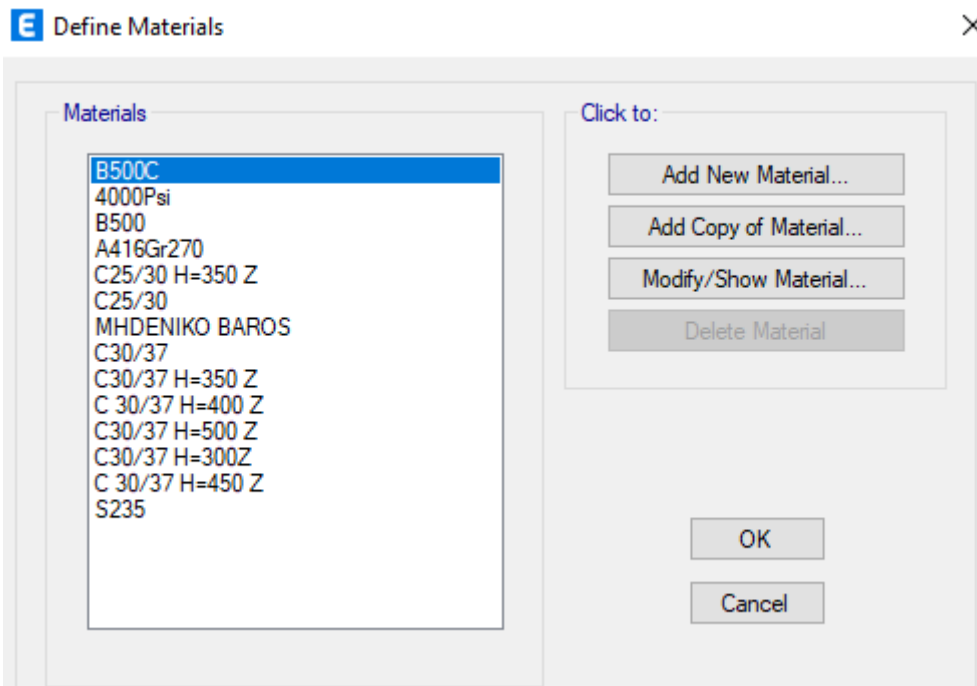
ΠΙΝΑΚΑΣ ΚΑΤΑΧΩΡΗΣΗΣ ΤΩΝ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΕΙΔΩΝ ΦΟΡΤΙΩΝ



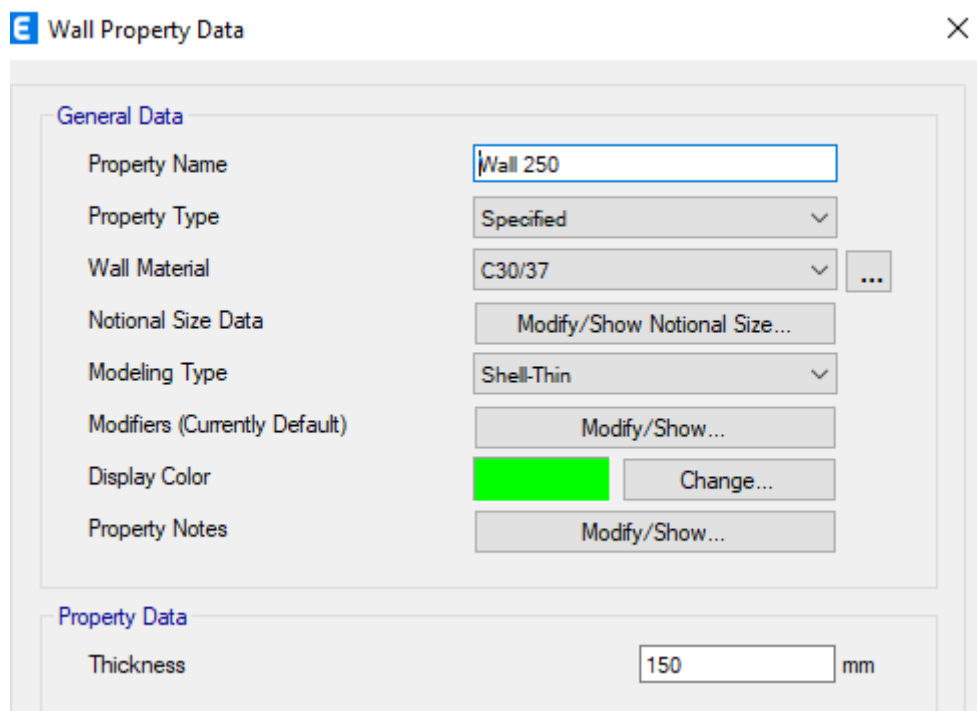
ΠΙΝΑΚΑΣ ΚΑΤΑΧΩΡΗΣΗΣ ΜΟΡΦΗΣ ΤΩΝ ΦΟΡΤΙΩΝ



ΠΙΝΑΚΑΣ ΤΩΝ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΣΥΝΔΙΑΣΜΩΝ ΦΟΡΤΙΩΝ



ΠΙΝΑΚΑΣ ΟΡΙΣΜΟΥ ΥΛΙΚΩΝ



ΠΙΝΑΚΑΣ ΚΑΤΑΧΩΡΗΣΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΠΟΥ ΑΦΟΡΟΥΝ ΤΟΥΣ ΤΟΙΧΟΥΣ



<b>General Data</b>		
Property Name	<input type="text" value="B25X40"/>	
Material	C30/37 <input type="button" value="..."/>	
Notional Size Data	<input type="button" value="Modify/Show Notional Size..."/>	
Display Color	<input type="button" value="Change..."/>	
Notes	<input type="button" value="Modify/Show Notes..."/>	
<b>Shape</b>		<b>Property Modifiers</b> <input type="button" value="Modify/Show Modifiers..."/> Currently Default
Section Shape	Concrete Rectangular <input type="button" value="v"/>	
<b>Section Property Source</b>		
Source: User Defined		<b>Reinforcement</b> <input type="button" value="Modify/Show Rebar..."/>
<b>Section Dimensions</b>		
Depth	<input type="text" value="400"/> mm	
Width	<input type="text" value="250"/> mm	

ΠΙΝΑΚΑΣ ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΟΜΩΝ

<b>General Data</b>		
Property Name	<input type="text" value="CHS200/8"/>	
Material	S235 <input type="button" value="..."/>	
Display Color	<input type="button" value="Change..."/>	
Notes	<input type="button" value="Modify/Show Notes..."/>	
<b>Shape</b>		<b>Property Modifiers</b> <input type="button" value="Modify/Show Modifiers..."/> Currently Default
Section Shape	Steel Pipe <input type="button" value="v"/>	
<b>Section Property Source</b>		
Source: User Defined		<b>Reinforcement</b> <input type="button" value="Modify/Show Rebar..."/>
<b>Section Dimensions</b>		
Outside Diameter	<input type="text" value="200"/> mm	
Wall Thickness	<input type="text" value="8"/> mm	

ΠΙΝΑΚΑΣ ΚΥΚΛΙΚΩΝ ΔΙΑΤΟΜΩΝ

**E** Concrete Frame Design Preferences for Eurocode 2-2004

	Item	Value
01	Design Code	Eurocode 2-2004
02	Country	CEN Default
03	Combinations Equation	Eq. 6.10
04	Reliability Class	Class 2
05	Second Order Method	Nominal Stiffness
06	Multi-Response Case Design	Step-by-Step - All
07	Number of Interaction Curves	24
08	Number of Interaction Points	11
09	Consider Minimum Eccentricity?	Yes
10	Design for B/C Capacity Ratio?	Yes
11	Ignore Beneficial Pu for Beam Design?	No
12	Theta0 (ratio)	0,005
13	GammaS (steel)	1,15
14	GammaC (concrete)	1,5
15	GammaCE (concrete modulus)	1,2
16	AlphaCC (compression)	1
17	AlphaCT (tension)	1
18	AlphaLCC (lightweight compression)	0,85

ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΠΛΑΙΣΙΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ ΤΟΝ ΕΥΡΩΚΩΔΙΚΑ 2

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5<sup>ο</sup>: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

### 5.1 Συμπεράσματα

Όπως προαναφέρθηκε στην εισαγωγή, σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι να αναδειχθεί η βελτιστοποίηση των κατασκευών, οι θετικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις αυτής και τα άμεσα οικονομικά οφέλη που απορρέουν από την εφαρμογή της. Για τον σκοπό αυτόν δημιουργήθηκε ένα ερωτηματολόγιο, με σκοπό να συλλέξουμε πληροφορίες από αρμόδιους φορείς που να σχετίζονται με την Δομική Βελτιστοποίηση και την απορρόφησή αυτής στον κατασκευαστικό κλάδο.

Όπως είδαμε και στο **κεφάλαιο 3**, ύστερα από την ανάλυση των αποτελεσμάτων, προέκυψαν ορισμένα συμπεράσματα γύρω από το θέμα που μελετάμε. Ο στόχος της διαδικασίας αυτής ήταν να προβληματίσουμε τους αποδέκτες μας, να αναλογιστούν αν θα ήταν ωφέλιμο για αυτούς αλλά και για την συλλογική κατασκευαστική κοινότητα η υιοθέτηση μιας τέτοιας καινοτόμου μεθόδου, που στόχο έχει μόνο την δημιουργία ενός πιο ολοκληρωμένου αποτελέσματος. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν έδειξαν πως αυτό επετεύχθη, γεγονός που φαίνεται από την εκτενέστερη ανάλυση του 3<sup>ου</sup> κεφαλαίου. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι και η δήλωση διαθεσιμότητας ως προς την πραγματοποίηση ενός **Proof of Concept**.

Ύστερα από την υλοποίηση ενός PoC, κατέληξα στην αποτύπωση των αποτελεσμάτων, στο **κεφάλαιο 4**. Η βελτιστοποίηση είναι η διαδικασία ανάπτυξης μιας δραστηριότητας με τον βέλτιστο τρόπο, όσο το δυνατόν πιο αποτελεσματικά, με το ελάχιστο πόσο πόρων και σε συντομότερο δυνατό χρονικό διάστημα. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν φάνηκε να είναι σύμφωνα με τον ορισμό της βελτιστοποίησης που μόλις ανέφερα. Για να εξαχθούν τα αποτελέσματα, έγινε χρήση του Etabs, ενός πολύ χρήσιμου εργαλείου, που προσεγγίζει πολύ ικανοποιητικά τις στατικές μελέτες δομικών στοιχείων. Ο αλγόριθμος που χρησιμοποιήθηκε ονομάζεται αλγόριθμος PQN. Η ανάλυση του βρίσκεται επίσης στο κεφάλαιο 4, όπου καταγράφεται λεπτομερώς όλη η διαδικασία που ακολουθήθηκε από το αρχικό ως το τελικό στάδιο.

## 5.2 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Το υπό μελέτη φαινόμενο, εντάσσεται γενικότερα στα περιβαλλοντικά και οικονομικά ζητήματα και απασχολεί αρκετά την επιστημονική κοινότητα. Η κατασκευαστική βιομηχανία κάνει προσπάθειες να εστιάσει στην μείωση του κόστους και του βάρους της κατασκευής καθώς και σε ένα ικανοποιητικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα, εξασφαλίζοντας όμως την ποιότητα και την ασφάλεια στο ίδιο επίπεδο. Όπως είδαμε και παραπάνω, ο πιο άμεσος τρόπος για να εξασφαλίσει τα τελευταία είναι η εφαρμογή της μεθόδου της Δομικής Βελτιστοποίησης με την αυτοματοποιημένη της μορφή. Το συμπέρασμα που διεξάγεται, ύστερα από την περαιτέρω ανάλυση, είναι πως ο κατασκευαστικός κλάδος δεν είναι πλήρως ενημερωμένος για τις λειτουργίες αλλά και για τα οφέλη που απορρέουν από την εφαρμογή μιας τέτοιας καινοτόμου μεθόδου, γι' αυτό και δεν εξετάζει την ιδέα αυτήν με μεγαλύτερη αποφασιστικότητα. Για την βελτίωση του ζητήματος αυτού, προτείνω την συντονισμένη ενημέρωση για το υπό μελέτη φαινόμενο, από κατάλληλα καταρτισμένους ανθρώπους, με σκοπό να γνωρίσουν την αξία του, οι άμεσα ενδιαφερόμενοι. Έτσι, θα έχουμε άμεσα θετικά αποτελέσματα τόσο στο περιβαλλοντικό όσο και στο οικονομικό αποτύπωμα. Η ελλιπής πρόσβαση στις σωστές πληροφορίες δημιουργεί με την σειρά του ελλιπής ενημέρωση, ενώ η καθοδήγηση από κάποιον που ήδη ασχολείται και δημιουργεί θετικά αποτελέσματα, το αντίθετο. Τέλος, συστήνεται η δημιουργία ενός κοινού εργαλείου BIM για δομικό, αρχιτεκτονικό και μηχανολογικό σχεδιασμό με σκοπό την διευκόλυνση της επικοινωνίας των κλάδων για την δημιουργία ενός πιο ολοκληρωμένου αποτελέσματος.

## BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Banga, S., Gehani, H., Bhilare, S., Patel, S., & Kara, L. (2018). 3d topology optimization using convolutional neural networks. *ArXiv Preprint ArXiv:1808.07440*.
- Bean, F., De, M., Tsakiris, A., Farrell, T., Morgado, D., Abergel, T., Staniszewski, A., Evans, M., Yu -Pacific, S., Lemmet, S., Sapoval, Y.-L., Meyer -French, R., Otto, M., Auclair, F., & Environment, C. G.-U. (n.d.). » *ACKNOWLEDGEMENTS The report benefited from important contributions from colleagues including: A number of reviewers provided valuable input and feedback to this report, including.*
- Bendsøe, M. P. (1989). Optimal shape design as a material distribution problem. *Structural Optimization, 1*, 193–202.
- Bendsøe, M. P. (1995). *Optimization of structural topology, shape, and material* (Vol. 414). Springer.
- Bendsøe, M. P., Ben-Tal, A., & Zowe, J. (1994). Optimization methods for truss geometry and topology design. *Structural Optimization, 7*, 141–159.
- Christensen, P. W., & Klarbring, A. (2008). *An introduction to structural optimization* (Vol. 153). Springer Science & Business Media.
- Ding, Y. (1986). Shape optimization of structures: a literature survey. *Computers & Structures, 24*(6), 985–1004.
- Haftka, R. T., & Gürdal, Z. (2012a). *Elements of structural optimization* (Vol. 11). Springer Science & Business Media.
- Haftka, R. T., & Gürdal, Z. (2012b). *Elements of structural optimization* (Vol. 11). Springer Science & Business Media.
- Haslinger, J., & Mäkinen, R. A. E. (2003). *Introduction to shape optimization: theory, approximation, and computation*. SIAM.
- Kamat, M. P. (1993). *Progress In Astronautics and Aeronautics: Structural Optimization: Status and Promise* (Vol. 150). Aiaa.
- Kirsch, U. (2012). *Structural optimization: fundamentals and applications*. Springer Science & Business Media.
- Lagaros, N. D. (2018). The environmental and economic impact of structural optimization. *Structural and Multidisciplinary Optimization, 58*(4), 1751–1768.  
<https://doi.org/10.1007/s00158-018-1998-z>
- Lee, K. S., & Geem, Z. W. (2004). A new structural optimization method based on the harmony search algorithm. *Computers & Structures, 82*(9–10), 781–798.

- Liu, W., Li, R., Sun, J. Z., Wang, J., Tsai, J., Wen, W., Kohlmann, A., & Williams, P. M. (2006). PQN and DQN: algorithms for expression microarrays. *Journal of Theoretical Biology*, 243(2), 273–278.
- Mohammadi, B., & Pironneau, O. (2004). Shape optimization in fluid mechanics. *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 36, 255–279.
- Seyranian, A. P., Lund, E., & Olhoff, N. (1994). Multiple eigenvalues in structural optimization problems. *Structural Optimization*, 8, 207–227.
- Sobieszczanski-Sobieski, J., & Haftka, R. T. (1997). Multidisciplinary aerospace design optimization: survey of recent developments. *Structural Optimization*, 14, 1–23.
- Sokolowski, J., Zolésio, J.-P., Sokolowski, J., & Zolesio, J.-P. (1992). *Introduction to shape optimization*. Springer.
- Spillers, W. R., & MacBain, K. M. (2009). *Structural optimization*. Springer Science & Business Media.
- Xie, Y. M., & Steven, G. P. (1993). A simple evolutionary procedure for structural optimization. *Computers & Structures*, 49(5), 885–896.
- Xie, Y. M., Steven, G. P., Xie, Y. M., & Steven, G. P. (1997). *Basic evolutionary structural optimization*. Springer.
- Yang, J., & Soh, C. K. (1997). Structural optimization by genetic algorithms with tournament selection. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 11(3), 195–200.
- Zhou, M., & Rozvany, G. I. N. (1992). DCOC: an optimality criteria method for large systems Part I: theory. *Structural Optimization*, 5, 12–25.
- Zhou, M., & Rozvany, G. I. N. (1993a). DCOC: an optimality criteria method for large systems Part II: algorithm. *Structural Optimization*, 6, 250–262.
- Zhou, M., & Rozvany, G. I. N. (1993b). DCOC: an optimality criteria method for large systems Part II: algorithm. *Structural Optimization*, 6, 250–262.
- Ροντογιάννης, Σ. (2023). *Τοπολογική Βελτιστοποίηση Οπίσθιου Ψαλιδιού Μοτοσυκλέτας*.