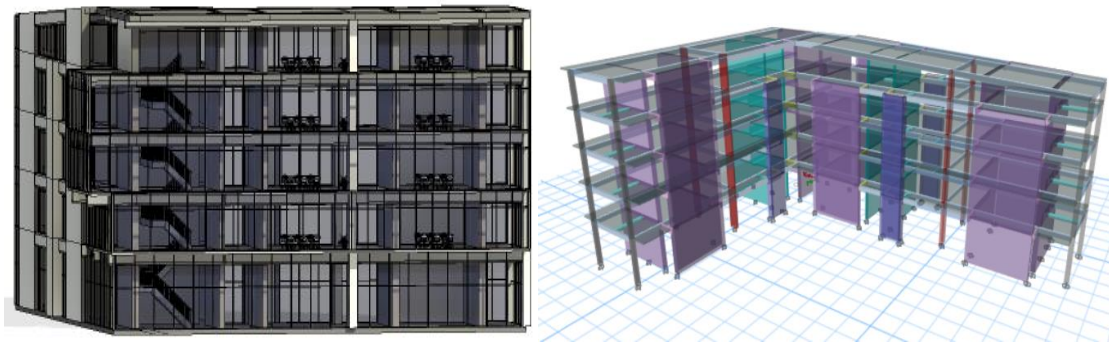




ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών
Τομέας Δομοστατικής

ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΟΥ ΑΠΟΤΥΠΩΜΑΤΟΣ ΚΤΙΡΙΟΥ ΜΕ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ BIM ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΣΤΟ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ



Διπλωματική Εργασία
Σταύρου Ιωάννα-Κωνσταντίνα

Επιβλέπων: Νικόλαος Λαγαρός, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάρτιος 2023

Ευχαριστίες

Ολοκληρώνοντας τις σπουδές μου στη σχολή Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Νίκο Λαγαρό αρχικώς για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με το αντικείμενο της διπλωματικής μου εργασίας, καθώς και για το ειλικρινές ενδιαφέρον του και την πλήρη καθοδήγησή του καθ' όλη τη διάρκεια υλοποίησης της.

Επίσης, ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω στον διδάκτορα κ. Γιώργο Καζάκη για την πολύτιμη βοήθεια του στην επίλυση προβλημάτων που εμφανίζονταν στην πορεία της μελέτης και τη συνεχή υποστήριξη για τη βελτίωση της εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου και τους φίλους μου για τη στήριξη που μου παρείχαν σε όλη τη διάρκεια των ακαδημαϊκών μου χρόνων.

Ιωάννα Σταύρου

Αθήνα, Μάρτιος 2023

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η αυξανόμενη ανησυχία σχετικά με τις εκπομπές του CO₂ έχει εξαπλωθεί σε όλους τους τομείς της ανθρώπινης δραστηριότητας, συμπεριλαμβανομένου και του κατασκευαστικού τομέα. Τα κτίρια είναι υπεύθυνα σήμερα σε ποσοστό 40% περίπου τόσο για την παγκόσμιας κατανάλωσης ενέργειας όσο και για την απελευθέρωση αερίων του θερμοκηπίου. Η Ανάλυση του Κύκλου Ζωής αποτελεί ένα χρήσιμο εργαλείο για την εκτίμηση του αντίκτυπου που έχει μία κατασκευή στο περιβάλλον κατά τη διάρκεια όλου του κύκλου ζωής της. Τα αποτελέσματα της βοηθούν στην εξέλιξη του κατασκευαστικού τομέα και στην αειφόρο ανάπτυξη. Στην παρούσα διπλωματική εργασία αναλύεται η μέθοδος αυτή και στη συνέχεια γίνεται εφαρμογή της, εστιάζοντας στη φάση κατασκευής του κτιρίου, που συνεισφέρει σε σημαντικό ποσοστό στο συνολικό κύκλο ζωής.

Παράλληλα, η πρόοδος της τεχνολογίας και η εξέλιξη των πληροφοριακών συστημάτων των τελευταίων ετών, πυροδότησε σημαντικές μεταβολές στον σχεδιασμό και την υλοποίηση των τεχνικών έργων. Στο πλαίσιο αυτό αρχικά εφαρμόζεται βελτιστοποίηση του δομικού σχεδιασμού με έναν αλγόριθμο που στόχο έχει να ελαχιστοποιήσει τις διαστάσεις των διατομών των δομικών στοιχείων και συνεπώς τον όγκο της κατασκευής. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν παρέχουν πολύτιμα συμπεράσματα για τη σημασία της βελτιστοποίησης στη διαμόρφωση βιώσιμου σχεδιασμού και στον περιορισμό των αέριων εκπομπών που οφείλονται στο δομικό σχεδιασμό. Στη συνέχεια, το κτίριο μοντελοποιήθηκε με χρήση BIM προγράμματος με στόχο να διερευνηθούν τα οφέλη που μπορεί να προσφέρει αυτή η τεχνολογία, καθώς δίνει τη δυνατότητα να υπολογιστούν με ευκολία και ακρίβεια τα δεδομένα που απαιτούνται για την εκτίμηση της ενέργειας που καταναλώνεται και του εκπεμπόμενου CO₂.

ABSTRACT

The growing concern about CO₂ emissions has spread to all human areas, including the construction sector. Buildings are currently responsible for approximately 40% of global energy consumption and greenhouse gas emissions. Life Cycle Analysis is a useful tool for assessing the impact a construction has on the environment during its entire life cycle. Its results help the development of the construction sector and sustainable development. In this diploma thesis, this method is analyzed, and it is applied, focusing on the construction phase of the building which contributes a significant percentage to the overall life cycle.

At the same time, the progress of technology and the development of information systems in recent years has triggered significant changes in the design and implementation of technical projects. In this context, structural optimization is initially applied with an algorithm that aims to minimize the sectional dimensions of structural elements and the volume of the construction. The obtained results provide valuable conclusions on the importance of optimization in the formulation of sustainable design and in the limitation of gaseous emissions due to structural design. The building was then modeled using a BIM program with the aim of exploring the benefits that this technology can offer as it enables the data required to estimate the energy consumed and the CO₂ emitted to be easily and accurately calculated.

ACKNOWLEDGMENTS

The research was supported by the Hellenic Foundation for Research and Innovation (H.F.R.I.) under the “2nd Call for H.F.R.I. Research Projects to support Post-Doctoral Researchers”, IMSFARE project: “Advanced Information Modelling for SAFER structures against manmade hazards”, (Project Number: 00356).

Πίνακας περιεχομένων

1. ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ	1
1.1 ΠΡΟΛΟΓΟΣ	1
1.2 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΚΑΙ ΣΤΟΧΟΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	1
1.3 ΔΟΜΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	2
2. ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΥΚΛΟΥ ΖΩΗΣ	4
2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	4
2.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΥΚΛΟΥ ΖΩΗΣ: ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ.....	5
2.3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΥΚΛΟΥ ΖΩΗΣ ΣΤΟΝ ΚΤΙΡΙΑΚΟ ΤΟΜΕΑ.....	7
2.4 ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΥΚΛΟΥ ΖΩΗΣ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΟ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΑΝΤΙΚΤΥΠΟ(LCEA).....	9
2.5 ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΥΚΛΟΥ ΖΩΗΣ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΙΣ ΕΚΠΟΜΠΕΣ CO ₂ (LCCO _{2A}).....	12
2.6 ΑΔΥΝΑΜΑ ΣΗΜΕΙΑ ΤΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΚΥΚΛΟΥ ΖΩΗΣ.....	14
3. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ	16
4. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΤΙΡΙΑΚΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ (BIM)	23
4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	23
4.2 ΠΡΟΕΛΕΥΣΗ ΚΑΙ ΕΞΕΛΙΞΗ BIM	24
4.3 ΟΦΕΛΗ ΠΟΥ ΑΠΟΡΡΕΟΥΝ ΑΠΟ ΤΟ BIM.....	24
4.4 ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ BIM	27
4.5 BIM ΚΑΙ ΑΕΙΦΟΡΟΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗ	27
4.6 ΔΙΑΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΟΤΗΤΑ	28
4.7 ΤΟ ΠΡΟΤΥΠΟ IFC (Industry Foundation Classes).....	29
5. ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ	31
5.1 ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ	31
5.2 ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ.....	33
6. ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΩΝ	35
6.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	35
6.2 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΚΤΙΡΙΑΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΜΕΛΕΤΗΣ	35
6.3 ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΔΟΜΙΚΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ.....	37
6.3.1 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ OCP.....	37
6.3.2 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ.....	37
6.4 ΣΥΝΔΕΣΗ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΩΝ	43
6.5 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΤΙΡΙΟΥ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ AUTODESK REVIT	45
6.5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	45
6.5.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	45
6.5.3 MATERIALS/ΥΛΙΚΑ	47

6.5.4 ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΡΟΜΕΤΡΗΣΗΣ/ SCHEDULES.....	57
6.5 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΚΥΚΛΟΥ ΖΩΗΣ.....	62
6.6.1 ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ	62
6.6.2 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΕΚΠΟΜΠΩΝ CO ₂	64
6.6.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΤΟΝ ΑΡΧΙΚΟ ΦΟΡΕΑ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΟ ΑΝΤΙΚΤΥΠΟ.....	65
6.6.4 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΕΚΠΟΜΠΩΝ CO ₂ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ ΕΡΓΑΛΕΙΟΥ.....	66
7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	73
7.1 ΣΥΝΟΛΙΚΑ.....	73
7.2 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ.....	74
8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	75

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 2.1: Ανάλυση Κύκλου Ζωής κατά ISO 14040	4
Εικόνα 2.2: Μεθοδολογικό πλαίσιο AKZ κατά ISO	5
Εικόνα 2.3: Όρια συστήματος ανάλυσης κύκλου ζωής των κτιρίων	9
Εικόνα 2.4: Ανάλυση Κύκλου Ζωής ως προς τις εκπομπές του άνθρακα.....	12
Εικόνα 3.1: Διανομή της κατανάλωσης ενέργειας ανά φάση	16
Εικόνα 3.2: Κατανομή της initial embodied energy ανά υλικό.....	17
Εικόνα 3.3: Σύγκριση του συνολικού βάρους χάλυβα με βάση το σύστημα αντίστασης πλευρικού φορτίου	18
Εικόνα 3.4: Εκπομπές CO ₂ για το κάθε δομικό σύστημα.....	18
Εικόνα 3.5: Εκπομπές άνθρακα κάθε φάσης	20
Εικόνα 3.6: Σύγκριση βάρους και δυναμικού πλανητικής υπερθέρμανσης μεταξύ διαφόρων δομικών υλικών	20
Εικόνα 3.7: Διαφοροποίηση πραγματικών ποσοτήτων και προμετρήσεων του προγράμματος Revit	22
Εικόνα 3.8: Διαφοροποιήσεις στη βάση δεδομένων κάθε προγράμματος	22
Εικόνα 4.1: Τα πεδία εφαρμογών της τεχνολογίας BIM.....	23
Εικόνα 4.2: Μοντελοποίηση Κτιριακής Πληροφορίας στον κατασκευαστικό τομέα	26
Εικόνα 4.3: Διάγραμμα απεικόνισης της συνεργασίας των εμπλεκόμενων στην υλοποίηση ενός έργου μέσω της μεθοδολογίας BIM	26
Εικόνα 4.4: Συμβολή ανοικτών προτύπων στην ανεμπόδιτη ανάπτυξη της διαλειτουργικότητας	29
Εικόνα 5.1: Κατηγορίες αλγορίθμων αναζήτησης και βελτιστοποίησης.....	31
Εικόνα 5.2: Εγκλωβισμός σε τοπική βέλτιστη λύση	32
Εικόνα 6.1: Τρισδιάστατη παρουσίαση κτιριακού μοντέλου στο πρόγραμμα Etabs	35
Εικόνα 6.2: Εισαγωγή διατομών δοκών.....	38
Εικόνα 6.3: Εισαγωγή διατομών δοκών.....	39
Εικόνα 6.4: Εισαγωγή διατομών υποστυλωμάτων	39
Εικόνα 6.5: Προσδιορισμός αντικειμενικής συνάρτησης, παραμέτρων και περιορισμών	40
Εικόνα 6.6: Επίλυση με τον αλγόριθμο PQN	41
Εικόνα 6.7: Εξαγωγή του τρισδιάστατου μοντέλου με μορφή IFC αρχείου από το πρόγραμμα Etabs	44
Εικόνα 6.8: Εισαγωγή τρισδιάστατου φορέα με μορφή IFC αρχείου στο πρόγραμμα Autodesk Revit	44
Εικόνα 6.9: Το τυπικό περιβάλλον εργασίας του Autodesk Revit	45
Εικόνα 6.10: Στιγμιότυπο οθόνης του Autodesk Revit για τη γραμμή εργαλείων (ribbon toolbar).....	46
Εικόνα 6.11: Στιγμιότυπο οθόνης του Autodesk Revit για την καρτέλα ιδιοτήτων.....	46
Εικόνα 6.12: Στιγμιότυπο οθόνης του Autodesk Revit για την Καρτέλα Περιήγησης Έργου .	47
Εικόνα 6.13: Στιγμιότυπο οθόνης του Autodesk Revit από τα παράθυρα της Βιβλιοθήκης και Επεξεργασίας Υλικών	48
Εικόνα 6.14: Στιγμιότυπο οθόνης του Autodesk Revit από την επιλογή Edit Type της παλέτας Properties για την επεξεργασία ιδιοτήτων	48

Εικόνα 6.15: Στιγμιότυπο οθόνης του Autodesk Revit από το παράθυρο Επεξεργασίας της κατασκευής των εσωτερικών στρώσεων των εξωτερικών τοιχίων	49
Εικόνα 6.16: Στιγμιότυπο οθόνης του Autodesk Revit από το παράθυρο Επεξεργασίας της κατασκευής των εσωτερικών στρώσεων των εσωτερικών τοιχίων	50
Εικόνα 6.17: Στιγμιότυπο οθόνης του Autodesk Revit από το παράθυρο Επεξεργασίας της κατασκευής των εσωτερικών στρώσεων των εσωτερικών δαπέδων	50
Εικόνα 6.18: Στιγμιότυπο οθόνης του Autodesk Revit από το παράθυρο Επεξεργασίας της κατασκευής των εσωτερικών στρώσεων του βατού δώματος	51
Εικόνα 6.19: Στιγμιότυπο οθόνης του Autodesk Revit από την επιλογή Edit Family της καρτέλας Modify	51
Εικόνα 6.20: Στιγμιότυπο οθόνης του Autodesk Revit από την εντολή Extrusion για την δημιουργία στρώσεων	52
Εικόνα 6.21: Στιγμιότυπο οθόνης του Autodesk Revit από το παράθυρο Επεξεργασίας για τη δημιουργία στρώσεων με τη βοήθεια των εργαλείων του Revit	52
Εικόνα 6.22: Επιλογή υλικού για τις στρώσεις που δημιουργήθηκαν στο Edit Family του Autodesk Revit	53
Εικόνα 6.23: Τύποι Δοκών που σχεδιάστηκαν στο Autodesk Revit	53
Εικόνα 6.24: Τύποι υποστυλωμάτων που σχεδιάστηκαν στο Autodesk Revit.....	54
Εικόνα 6.25: Λεπτομέρεια κάτοψης με Detail Level Fine στο Autodesk Revit	54
Εικόνα 6.26: Στιγμιότυπο οθόνης του Autodesk Revit από την εντολή Wall για τη δημιουργία τοίχων	55
Εικόνα 6.27: Στιγμιότυπο οθόνης του Autodesk Revit από την όψη του κτιρίου, όπου φαίνεται η τοιχοποιία από υαλοστάσιο (Curtain Wall) που χρησιμοποιήθηκε.....	56
Εικόνα 6.28: Στιγμιότυπο οθόνης του Autodesk Revit από το είδος εξωτερικής πόρτας που χρησιμοποιήθηκε	56
Εικόνα 6.29: Στιγμιότυπο οθόνης του Autodesk Revit από την επιλογή Material Takeoff για την προμέτρηση των υλικών	57
Εικόνα 6.30: Στιγμιότυπο οθόνης του Autodesk Revit από το παράθυρο New Material Takeoff, όπου θα γίνει επιλογή του στοιχείου για το οποίο θα γίνει προμέτρηση υλικών ...	58
Εικόνα 6.31: Στιγμιότυπο οθόνης του Autodesk Revit από το παράθυρο Material Takeoff Properties, όπου ορίζονται οι παράμετροι της προμέτρησης υλικών.....	58
Εικόνα 6.32: Στιγμιότυπο οθόνης του Autodesk Revit από το παράθυρο Properties για την επεξεργασία του πίνακα προμέτρησης	59
Εικόνα 6.33: Λεπτομέρεια προμέτρησης υλικών υποστυλωμάτων και δοκών στο Autodesk Revit	59
Εικόνα 6.34: Λεπτομέρεια προμέτρησης υλικών πατωμάτων και τοίχων στο Autodesk Revit	60
Εικόνα 6.35: Λεπτομέρεια προμέτρησης αριθμού υαλοπετασμάτων και όγκου γυαλιού των υαλοπετασμάτων στο Autodesk Revit.....	60
Εικόνα 6.36: Στάδια κύκλου ζωής όπου αποτιμώνται οι εκπομπές CO ₂ από το εργαλείο The Structural Carbon Tool	67
Εικόνα 6.37: Στιγμιότυπο από το περιβάλλον του εργαλείου The Structural Carbon Tool , όπου γίνεται εισαγωγή των υλικών του αρχικού φορέα	68
Εικόνα 6.38: Στιγμιότυπο από το περιβάλλον του εργαλείου The Structural Carbon Tool , όπου γίνεται εισαγωγή των υλικών του βελτιστοποιημένου φορέα	68
Εικόνα 6.39: Λεπτομέρεια περιβάλλοντος του εργαλείου The Structural Carbon Tool , όπου φαίνονται οι εκπομπές CO ₂ σε κάθε στάδιο ζωής του κτιρίου	69

Εικόνα 6.40: Σύγκριση αρχικού και βελτιστοποιημένου φορέα από το εργαλείο The Structural Carbon Tool ως προς τον ενσωματωμένο άνθρακα	70
Εικόνα 6.41: Σύγκριση αρχικού και βελτιστοποιημένου φορέα από το εργαλείο The Structural Carbon Tool ως προς τον ενσωματωμένο άνθρακα ανά στοιχείο	70
Εικόνα 6.42: Σύγκριση αρχικού και βελτιστοποιημένου φορέα από το εργαλείο The Structural Carbon Tool ως προς τον ενσωματωμένο άνθρακα ανά στάδιο του κύκλου ζωής του κτιρίου.....	71
Εικόνα 6.43: Σύγκριση αρχικού και βελτιστοποιημένου φορέα από το εργαλείο The Structural Carbon Tool ως προς τον ενσωματωμένο άνθρακα με στόχους Leti και Riba	71
Εικόνα 6.44: Κατηγορία αρχικού φορέα στην κλίμακα SCORS	72
Εικόνα 6.45: Κατηγορία Βελτιστοποιημένου φορέα στην κλίμακα SCORS	72

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 6-1: Διατομές δοκών αρχικού φορέα	36
Πίνακας 6-2: Διατομές υποστυλωμάτων αρχικού φορέα	37
Πίνακας 6-3: Διατομές δοκών βελτιστοποιημένου φορέα	42
Πίνακας 6-4: Διατομές υποστυλωμάτων βελτιστοποιημένου φορέα	43
Πίνακας 6-5: Αποτελέσματα συνολικής προμέτρησης υλικών από το Autodesk Revit για τα εσωτερικά και εξωτερικά υποστυλώματα	61
Πίνακας 6-6: Αποτελέσματα συνολικής προμέτρησης υλικών από το Autodesk Revit για τα εσωτερικά και εξωτερικά τοιχία του φέροντα οργανισμού	61
Πίνακας 6-7: Αποτελέσματα συνολικής προμέτρησης υλικών από το Autodesk Revit για τις εσωτερικές και εξωτερικές δοκούς	61
Πίνακας 6-8: Αποτελέσματα συνολικής προμέτρησης υλικών από το Autodesk Revit για τα εσωτερικά πατώματα και το βατό δώμα	61
Πίνακας 6-9: Αποτελέσματα συνολικής προμέτρησης υαλοπετασμάτων και όγκου γυαλιού υαλοπετασμάτων από το Autodesk Revit	62
Πίνακας 6-10: Μετατροπή Όγκων σε Μάζα	62
Πίνακας 6-11: Υπολογισμός Ενσωματωμένης Ενέργειας κάθε υλικού του κτιρίου	63
Πίνακας 6-12: Υπολογισμός εκπεμπόμενου διοξειδίου του άνθρακα από κάθε υλικό του κτιρίου	64
Πίνακας 6-13: Ενσωματωμένη ενέργεια και εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα αρχικού φορέα	65
Πίνακας 6-14: Σύγκριση ενσωματωμένης ενέργειας αρχικού και βελτιστοποιημένου φορέα	65
Πίνακας 6-15: Σύγκριση εκπεμπόμενου διοξειδίου του άνθρακα αρχικού και βελτιστοποιημένου φορέα	66

1. ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ

1.1 ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Έχει γίνει πλέον κατανοητό σε παγκόσμιο επίπεδο, από τους απλούς πολίτες μέχρι τις κυβερνήσεις, πως η επιδιωκόμενη ανάπτυξη και βελτίωση του επιπέδου ζωής, προκειμένου να είναι βιώσιμη οφείλει να συνάδει με τις αρχές της διαφύλαξης και της προστασίας του περιβάλλοντος. Συνεπώς, ο κατασκευαστικός κλάδος σήμερα στο πλαίσιο των σύγχρονων καταναλωτικών και βιομηχανοποιημένων κοινωνιών, οι οποίες συνεχώς στοχεύουν στο κέρδος και στην επιτάχυνση των διαδικασιών για τη γρήγορη ανάπτυξη, είναι σημαντικό να στοχεύει ταυτόχρονα και στην αύξηση της ποιότητας του επιδιωκόμενου αποτελέσματος, την παραγωγή λιγότερων αποβλήτων και στην εξασφάλιση βιωσιμότητας. Για την επίτευξη της βιωσιμότητας ένα χρήσιμο και διάσημο εργαλείο είναι η Ανάλυση Κύκλου Ζωής (LCA). Με την εφαρμογή της εκτιμώνται το ποσό ενέργειας που απελευθερώνεται και οι εκπομπές του CO₂, που προέρχονται από όλες τις διαδικασίες που πραγματοποιούνται στον κύκλο ζωής του κτιρίου.

Ως τώρα έχουν γίνει πολλές έρευνες που χρησιμοποιούν την LCA και εστιάζουν στη φάση λειτουργίας του κτιρίου, ενώ λιγότερες έχουν γίνει για τη φάση κατασκευής και ακόμα λιγότερες για τη φάση κατεδάφισης. Ωστόσο, το στάδιο της κατασκευής του κτιρίου συνεισφέρει όλο και περισσότερο στον κύκλο ζωής και θα πρέπει να γίνει περαιτέρω έρευνα σχετικά με αυτό. Η βελτιστοποίηση του δομικού σχεδιασμού μπορεί να βοηθήσει στη προσπάθεια εξυγίανσης των κτισμάτων με την μείωση της ενσωματωμένης ενέργειας και του ενσωματωμένου διοξειδίου του άνθρακα των υλικών.

Ταυτόχρονα μέσα σε αυτή την κατάσταση, που έχει διαμορφωθεί, η καινοτόμα τεχνολογία της Μοντελοποίησης Κτιριακής Πληροφορίας (BIM) αποτελεί την απάντηση στους τεχνικούς κλάδους, ώστε να επιτύχουν την αύξηση της ροής δεδομένων και κατά συνέπεια να αναβαθμίσουν την ποιότητα του σχεδιαζόμενου αποτελέσματος. Η τεχνολογία αυτή μπορεί να συνεισφέρει στον αειφόρο σχεδιασμό των κτιρίων αφού ενσωματώνει πληροφορίες που βοηθούν στη διαχείριση και την πρόβλεψη των αποτελεσμάτων του έργου ήδη από τα πρώτα στάδια του κύκλου ζωής του. Συνεπώς, οι συμμετέχοντες έχουν τη δυνατότητα να προχωρήσουν σε ενέργειες που θα βελτιώσουν την κατασκευή ως προς το ενεργειακό της αντίκτυπο.

1.2 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΚΑΙ ΣΤΟΧΟΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται τη χρήση της καινοτόμας τεχνολογίας της Μοντελοποίησης Κτιριακής Πληροφορίας (BIM) και της Βελτιστοποίησης έτσι ώστε να συνδυαστούν με τη μέθοδο της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (LCA) και να προκύψει η ενεργειακή αξιολόγηση του εξεταζόμενου κτιρίου. Αφορά λοιπόν τη βιβλιογραφική αναφορά στα πραγματευόμενα ζητήματα, αλλά και εφαρμογή συγκεκριμένης περίπτωσης μελέτης.

Αντικείμενο της , αποτελεί η σαφής περιγραφή των διαδοχικών βημάτων και διαδικασιών που ακολουθήθηκαν για την τελικό υπολογισμό του αποτυπώματος του κτιρίου στο περιβάλλον, εστιάζοντας στη φάση κατασκευής. Για την Βελτιστοποίηση του δομικού

σχεδιασμού χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα HP OCP , για τη μοντελοποίηση του κτιρίου χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Autodesk Revit και τέλος για την ανάλυση κύκλου ζωής χρησιμοποιήθηκαν τύποι από το θεωρητικό υπόβαθρο, καθώς και το εργαλείο The Structural Carbon Tool.

Στόχος της διπλωματικής εργασίας είναι η αποτίμηση του ενεργειακού αντικτύπου ενός πενταώροφου κτιρίου με χρήση γραφείων, αξιοποιώντας ταυτόχρονα τα πλεονεκτήματα που προσφέρει η βελτιστοποίηση του δομικού σχεδιασμού και η τεχνολογία BIM. Η βελτιστοποίηση του φορέα και η μείωση των διατομών του μέσω αυτής επηρεάζει το στάδιο σχεδιασμού του κτιρίου που γίνεται επηρεάζει όλο και περισσότερο πλέον τον συνολικό κύκλο ζωής και μας επιτρέπει το σχεδιασμό αιεφόρων κατασκευών από τα αρχικά του στάδια. Παράλληλα, η τεχνολογία BIM μας διευκολύνει στη διαχείριση του κτιριακού μοντέλου καθώς προωθεί την διαλειτουργικότητα μεταξύ στατικού και αρχιτεκτονικού προγράμματος καθώς επίσης επιτρέπει το σχεδιασμό ενός μοντέλου που περιέχει πληροφορίες χρήσιμες για την περιβαλλοντική του αποτίμηση.

1.3 ΔΟΜΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

- **Κεφάλαιο 1: Εισαγωγικά**
Γίνεται εισαγωγή στο θέμα το οποίο πραγματεύεται η διπλωματική εργασία. Επίσης περιγράφεται το αντικείμενο, ο στόχος και η διάρθρωση της δομής της εργασίας.
- **Κεφάλαιο 2: Ανάλυση Κύκλου Ζωής**
Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζεται το θεωρητικό υπόβαθρο της ανάλυσης κύκλου ζωής (Life Cycle Assessment), ο τρόπος λειτουργίας της μεθόδου και τα αποτελέσματα που προκύπτουν μέσω αυτής. Επίσης, παρουσιάζεται η εφαρμογή της στο κτιριακό τομέα, παρέχοντας αποτελέσματα σε μορφή κατανάλωσης ενέργειας και σε μορφή εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα CO₂.
- **Κεφάλαιο 3: Βιβλιογραφική Ανασκόπηση**
Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζονται έρευνες που έχουν ήδη πραγματοποιηθεί στον τομέα της ενεργειακής αξιολόγησης χρησιμοποιώντας τη μέθοδο LCA, κάποιες από τις οποίες συνδυάζουν βελτιστοποίηση δομικού σχεδιασμού και χρήση του προγράμματος Revit για τη μοντελοποίηση του κτιρίου.
- **Κεφάλαιο 4: Μοντελοποίηση Κτιριακής Πληροφορίας (BIM)**
Αποτελεί το θεωρητικό υπόβαθρο για την τεχνολογία BIM. Αναφέρονται τα πλεονεκτήματα που παρέχει σε όλο τον κύκλο ζωής των έργων, καθώς και τα αδύναμα σημεία της. Επιπλέον, γίνεται αναφορά στη διαλειτουργικότητα που προωθεί η καινοτόμα αυτή τεχνολογία, η οποία έχει χρησιμοποιηθεί και στην παρούσα διπλωματική.
- **Κεφάλαιο 5: Βελτιστοποίηση**
Γίνεται αναφορά στις στρατηγικές βελτιστοποίησης. Αναλύονται οι αλγόριθμοι βελτιστοποίησης καθώς και το πρόβλημα της βελτιστοποίησης και τα στοιχεία που πρέπει να ορίσουμε για την επίλυση του.

- **Κεφάλαιο 6: Ανάλυση Διαδικασιών**
Αποτελεί το κατ' εξοχήν σημαντικό και ουσιώδες κομμάτι της εργασίας. Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται η ανάλυση και η επίλυση του προβλήματος το οποίο πραγματεύεται η διπλωματική εργασία και η εφαρμογή των λογισμικών. Περιγράφονται αναλυτικά όλα τα στάδια μέχρι και τον υπολογισμό των ζητούμενων μεγεθών , δηλαδή της ενσωματωμένης ενέργειας και των ολικών εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα και παράλληλα παρουσιάζονται και σχολιάζονται τα αποτελέσματα.
- **Κεφάλαιο 7: Συμπεράσματα**
Παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της διπλωματικής εργασίας και κάποιες προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.
- **Κεφάλαιο 8: Βιβλιογραφία**
Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε

2.ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΥΚΛΟΥ ΖΩΗΣ

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η πρόοδος της τεχνολογίας και η εξέλιξη της βιομηχανίας σήμερα έχει βελτιώσει την ποιότητα ζωής των ανθρώπων και έχει ωφελήσει σε μεγάλο βαθμό τις παγκόσμιες κοινωνίες και οικονομίες. Οι σύγχρονοι ρυθμοί ανάπτυξης ωστόσο έχουν οδηγήσει στην όλο και αυξανόμενη ανάγκη κατανάλωσης ενέργειας, η οποία με τη σειρά της συνεπάγεται σημαντικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις, όπως η κλιματική αλλαγή και το φαινόμενο του θερμοκηπίου, καθιστώντας τη μη βιώσιμη. Η υποβάθμιση του περιβάλλοντος αποτελεί σήμερα μια από τις μεγαλύτερες προκλήσεις για την ανθρωπότητα και η ανάγκη της αποτίμησης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των προϊόντων, των διεργασιών και των δραστηριοτήτων οδήγησε στη δημιουργία της έννοιας της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (LCA).

Η ανάλυση μελετά ολόκληρο τον κύκλο ζωής του προϊόντος, της διεργασίας ή της δραστηριότητας, εξαγωγή και βιομηχανοποίηση πρώτων υλών, κατασκευή, μεταφορά, χρήση και συντήρηση του προϊόντος, καθώς και διαχείριση των αποβλήτων. Πρόκειται για ένα εργαλείο περιβαλλοντικής διαχείρισης, αφού ύστερα από την αποτίμηση της επίδρασης που είχε η κατανάλωση ενέργειας σε κάθε στάδιο του κύκλου ζωής μπορούν να παρθούν αποφάσεις προκειμένου να επιτευχθεί περιβαλλοντική αναβάθμιση. (Εικόνα 2.1)

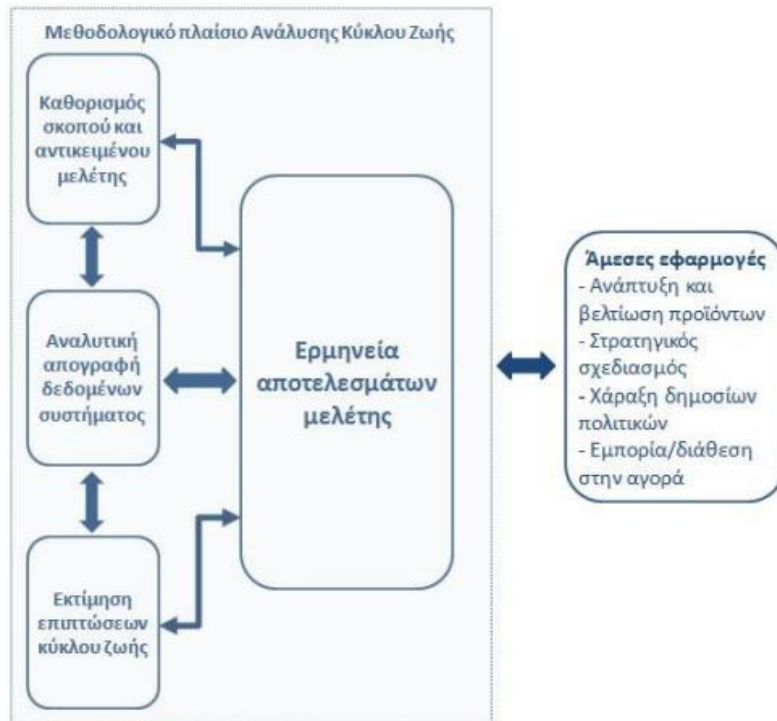


Εικόνα 2.1: Ανάλυση Κύκλου Ζωής κατά ISO 14040

2.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΥΚΛΟΥ ΖΩΗΣ: ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Ο Διεθνής Οργανισμός Τυποποίησης έχει αναπτύξει το πρότυπο ISO 14041 (Εικόνα 2.2), σύμφωνα με το οποίο η εφαρμογή της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής χωρίζεται σε τέσσερα βήματα:

1. Ορισμός στόχου και πεδίου εφαρμογής της μελέτης
2. Απογραφική ανάλυση κύκλου ζωής
3. Εκτίμηση περιβαλλοντικών επιπτώσεων
4. Ερμηνεία



Εικόνα 2.2: Μεθοδολογικό πλαίσιο ΑΚΖ κατά ISO

Πρέπει να σημειωθεί ότι αν και καθένα από τα στάδια συνιστά μία σημαντική διαδικασία ώστε να εξαχθούν συμπεράσματα δεν είναι απαραίτητο να εκτελεστούν ολοκληρωμένα και η αναλυτική απογραφή δεδομένων και η εκτίμηση των επιπτώσεων του κύκλου ζωής για να παρθούν αποφάσεις σχετικά με την ορθολογικότερη χρήση των πρώτων υλών και τις δυνατότητες ενεργειακής βελτίωσης. Η αναλυτική απογραφή των δεδομένων μπορεί να οδηγήσει στην αναγνώριση των δυνατοτήτων αυτών. Πιο συγκεκριμένα τα τέσσερα στάδια της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής περιγράφονται στη συνέχεια:

1. Καθορισμός του στόχου και του πεδίου εφαρμογής της

Η φάση αυτή αναφέρεται στον σαφή καθορισμό και του στόχου και της έκτασης της μελέτης. Ο στόχος αφορά τον λόγο που γίνεται η μελέτη και η επιδιωκόμενη χρήση των αποτελεσμάτων. Στην περίπτωση των δομικών υλικών η Ανάλυση Κύκλου Ζωής διεξάγεται με στόχο την αξιολόγηση και τη σύγκριση των επιπτώσεων που έχουν στο περιβάλλον έτσι ώστε στο μέλλον να υπάρξει βελτίωση των ήδη υπάρχοντων ή δημιουργία νέων με καλύτερες ιδιότητες. Επιπλέον πρέπει να προσδιοριστούν οι πληροφορίες που θα απαιτηθούν για τη διεξαγωγή της μελέτης καθώς και σε ποιο βαθμό ανάλυσης θα γίνει. Σε αυτή τη φάση

συμπεριλαμβάνεται και η δημιουργία του πλαισίου στο οποίο θα πραγματοποιηθεί αυτή η αξιολόγηση, καθορίζοντας το σύστημα, τα όρια, τις απαιτήσεις δεδομένων και τους περιορισμούς. Για την αποφυγή ασαφειών σημαντικός είναι και ο καθορισμός των λειτουργικών μονάδων που θα χρησιμοποιηθούν. Ιδιαίτερα σε συγκριτικές μελέτες οι λειτουργικές μονάδες θα πρέπει να είναι κοινές καθώς θα αποτελέσουν μία βάση για τη σύγκριση των διαφορετικών υποθέσεων και ένα μέτρο αποδοτικότητας των συγκρίσιμων μελετών. Τέλος, μεγάλη προσοχή πρέπει να δίνεται στον προσδιορισμό του στόχου ποιότητας των δεδομένων καθώς η Ανάλυση Κύκλου Ζωής αποτελεί μία ιδιαίτερα πολύπλοκη διαδικασία που τα αποτελέσματά της εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την ποιότητα των δεδομένων της και την ανάγκη να είναι αξιόπιστα και επιστημονικώς τεκμηριωμένα.

2. Εκτίμηση απογραφής κύκλου ζωής

Η φάση αυτή αφορά τον προσδιορισμό και την ποσοτικοποίηση των ροών εισόδου και εξόδου των υλικών, της ενέργειας, του νερού και των αέριων και στερεών ρύπων. Αυτό το είδος της ανάλυσης μπορεί να είναι εξαιρετικά περίπλοκο και μπορεί να περιλαμβάνει δευτερεύουσες διαδικασίες που συνεισφέρουν στην κατασκευή ή παράγουν κάτι το οποίο συμμετέχει στις βασικές διαδικασίες.

Η απογραφή των δεδομένων πρέπει να περιλαμβάνει όλα τα στάδια της ζωής ενός προϊόντος: την απόκτηση των πρώτων υλών, τη βιομηχανική κατεργασία, τη μεταφορά, τη διανομή, τη χρήση, την ανακύκλωση, έως και την τελική απόρριψη. Ωστόσο, η οριοθέτηση του συστήματος ορίζεται από τον εκάστοτε μελετητή και συνεπώς υπάρχει η δυνατότητα να παραλείπονται στάδια ανάλογα και με τον στόχο της μελέτης που έχει οριστεί. Η εκτίμηση απογραφής του κύκλου ζωής προκύπτει εν τέλει από το άθροισμα των επιμέρους αποτελεσμάτων που έχουν προκύψει από τις εμπλεκόμενες διαδικασίες. Για την διευκόλυνση της εκτίμησης αυτής έχουν αναπτυχθεί διεθνώς πολλές βάσεις δεδομένων. Αυτές περιλαμβάνουν τις δημόσιες εθνικές ή περιφερειακές βάσεις δεδομένων, βάσεις δεδομένων της βιομηχανίας και βάσεις δεδομένων συμβούλων, που προσφέρονται συχνά σε συνδυασμό με τα εργαλεία λογισμικού AKZ.

3. Αξιολόγηση των επιπτώσεων του κύκλου ζωής

Στην φάση αυτή γίνεται εκτίμηση των επιπτώσεων του κύκλου ζωής (Life cycle impact assessment) και περιλαμβάνει περιβαλλοντικούς δείκτες και τη βάση για να γίνει ανάλυση των επιδράσεων της εξαγωγής πρώτων υλών και των αποβλήτων ή εκπομπών. Βασική προϋπόθεση για την αξιολόγηση των επιπτώσεων, αποτελεί ο εντοπισμός των κατηγοριών επιπτώσεων, δηλαδή ο εντοπισμός και η ταξινόμησή τους σε σχέση με τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις, για το συγκεκριμένο στόχο και το πεδίο εφαρμογής που εξ αρχής έχει επιλεγεί.

4. Ερμηνεία

Η ερμηνεία των αποτελεσμάτων του κύκλου ζωής (interpretation), είναι η τελευταία φάση της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής. Αναλύονται και αξιολογούνται τα αποτελέσματα των παραπάνω σταδίων με στόχο την επιλογή που θα οδηγήσει σε ελαχιστοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Εκτός αυτού ύστερα από την ερμηνεία των αποτελεσμάτων είναι δυνατός ο εντοπισμός των σπουδαιότερων περιβαλλοντικών επιπτώσεων και τα δεδομένα που συνέβαλαν περισσότερο στα αποτελέσματα της απογραφής του κύκλου και αυτά που μπορούν να προσφέρουν το μεγαλύτερο περιβαλλοντικό όφελος. Στο στάδιο αυτό πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι αβεβαιότητες που μπορεί να προκύψουν είτε λόγω της ποιότητας και

αξιοπιστίας των δεδομένων που συλλέχθηκαν είτε λόγω της ορθότητας του μοντέλου που μελετάται και των τυχόν ελλείψεων του.

2.3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΥΚΛΟΥ ΖΩΗΣ ΣΤΟΝ ΚΤΙΡΙΑΚΟ ΤΟΜΕΑ

Δεδομένης της κατάστασης που έχει διαμορφωθεί το ενεργειακό ζήτημα έχει αναδειχθεί ως πρωταρχικό σε όλους τους τομείς της ανθρώπινης δραστηριότητας, συμπεριλαμβανομένου και του κατασκευαστικού τομέα, καθώς ως βασική βιομηχανία ευθύνεται για το 30%-40% των συνολικών εκπομπών CO₂. Συνεπώς επιτακτική ανάγκη αποτελεί σήμερα η κατασκευή βιώσιμων κτιρίων, τα οποία θα είναι σχεδιασμένα και κατασκευασμένα με τρόπο ώστε να επιτυγχάνεται ενεργειακή απόδοση και να έχει χαμηλές περιβαλλοντικές επιπτώσεις καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής του κτιρίου, συμπεριλαμβανομένου του αποτυπώματος άνθρακα. Στην προσπάθεια αυτής της αειφόρου ανάπτυξης η μέθοδος της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής του κτιρίου μπορεί να παίξει σημαντικό ρόλο συμβάλλοντας στη μείωση του οικολογικού αποτυπώματος.

Η πρώτη εφαρμογή της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής για τα κτίρια, σύμφωνα με την διεθνή βιβλιογραφία, ξεκίνησε στα τέλη της δεκαετίας του 1980 και επικεντρώνονταν αποκλειστικά στον τομέα της ενέργειας. Αργότερα, όπως αναλύουν οι Khasreen et al. και Cabeza et al. στην μελέτη των Roux et al. (2016), μετά την δεκαετία του 2010, η ανάλυση του κύκλου ζωής αρχίζει να χρησιμοποιείται ολοένα και περισσότερο ως βοήθημα και εργαλείο σχεδιασμού για την κατασκευή των τεχνικών έργων, έχοντας όμως σημαντικά διαφορετικούς και διευρυμένους στόχους. Σήμερα η ΑΚΖ χρησιμοποιείται, εκτός από τη διερεύνηση στο τομέα της ενέργειας, για τη βελτίωση των δομικών υλικών κατασκευής, τη δημιουργία βιώσιμων τεχνικών κατασκευών και την πιστοποίηση των κτιρίων.

Η ΑΚΖ, προϋποθέτει την αναγνώριση των εισροών και εκροών για το υπό εξέταση κτίριο. Πιο συγκεκριμένα στην φάση της παραγωγής δομικών υλικών, οι εισροές αναφέρονται στις απαραίτητες πρώτες ύλες για την παραγωγή τους, (π.χ. σκύρα και άμμος για την παραγωγή σκυροδέματος κ.λ.π.) και στην κατανάλωση της απαιτούμενης ενέργειας. Οι εκροές στο περιβάλλον μπορεί να είναι αέριες εκπομπές (σκόνη κλπ.), θόρυβος, παραγωγή στερεών υπολειμμάτων και παραπροϊόντων. Η ενέργεια που απαιτείται και καταναλώνεται στο στάδιο αυτό είναι επίσης συνήθως σημαντικά υψηλή, λόγω της χρήσης μεγάλης ισχύος μηχανημάτων και μεταφορικών μέσων.

Η μεταφορά των δομικών υλικών, σχετίζεται κυρίως με την μεταφορά από τον τόπο εξόρυξης ή επεξεργασίας - παραγωγής στον τόπο της ανέγερσης του κτιρίου, εμπλέκεται όμως συχνά και στα υπόλοιπα στάδια του κύκλου ζωής ενός κτιρίου. Είναι φανερό ότι η απόσταση μεταφοράς των δομικών υλικών σχετίζεται με την ενσωματωμένη ενέργειά τους, ενώ οι μεγάλες αποστάσεις μεταφοράς των υλικών επιβαρύνουν σημαντικά το περιβάλλον, λόγω της καύσης ορυκτών καυσίμων των μέσων μεταφοράς.

Η κατασκευή - ανέγερση του κτιρίου, αναφέρεται κυρίως στις διεργασίες που γίνονται στο εργοτάξιο και είναι μια διαδικασία που περιλαμβάνει την επεξεργασία των υλικών (κοπή, συναρμολόγηση κλπ.) καθώς και την τοποθέτηση και ενσωμάτωση των δομικών υλικών σε ένα κτίριο. Στη φάση αυτή δημιουργούνται απόβλητα και παραπροϊόντα των διαφόρων κατασκευών, τα οποία και αποτελούν σοβαρό περιβαλλοντικό πρόβλημα. Πρόκειται κυρίως για μη βιο-αποδομήσιμα αδρανή υλικά τα οποία είναι ανακυκλώσιμα και περιέχουν αδρανή κοκκώδη υλικά (σκυρόδεμα, τούβλα, ασφαλτος, γυαλί, κλπ.), απορρίμματα ξυλείας, χάλυβα,

σίδηρο και μη σιδηρούχα μέταλλα, χαρτί, αλουμίνιο, πλαστικά, κλπ. Τα απόβλητα αυτά κατά την ανέγερση, παράγονται συνήθως εξαιτίας της αναποτελεσματικής διαχείρισης στο χώρο εγκατάστασης του εργοταξίου και το μεγαλύτερο μέρος τους είναι περιττό. Σχετικά με την απαιτούμενη ενέργεια στο στάδιο της ανέγερσης, αυτή αφορά τα υγρά καύσιμα και την ενέργεια (ηλεκτρική ενέργεια) για την λειτουργία των μηχανημάτων ή μηχανών κάθε είδους.

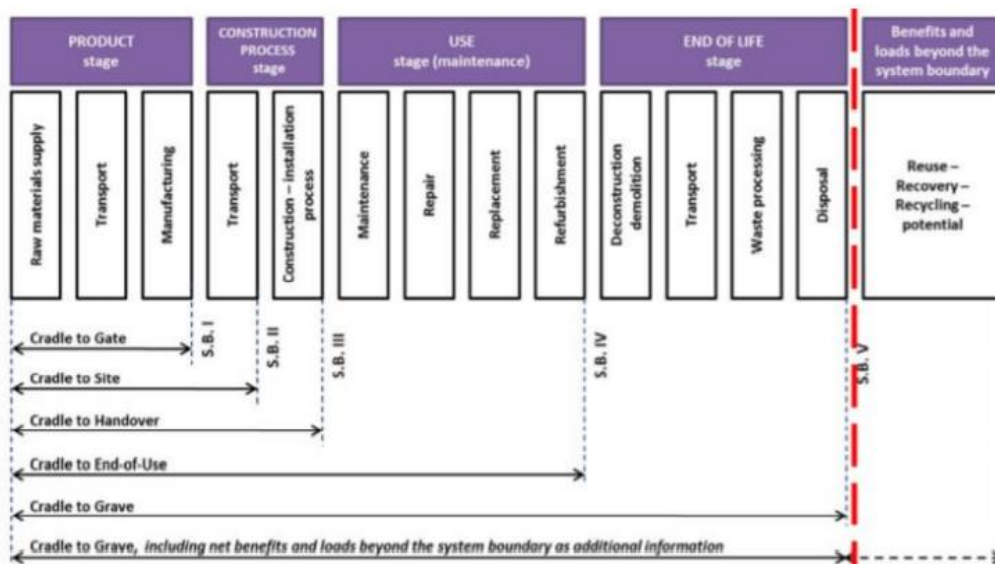
Στη φάση της λειτουργίας του κτιρίου και κατά τις περιοδικές ανακαινίσεις και συντηρήσεις που θα υποστεί μέχρι το τέλος της ζωής του, υπάρχουν εισροές υλικών και πόρων. Πρέπει να σημειωθεί ότι κατά τη διάρκεια του σταδίου λειτουργίας η κατανάλωση των πόρων είναι στενά συνδεδεμένη με το είδος και την επιλογή των υλικών. Ορισμένα υλικά μπορεί να έχουν υψηλή αρχική ενσωματωμένη ενέργεια, αλλά έχουν χαμηλές απαιτήσεις συντήρησης. Ωστόσο, άλλα υλικά μπορεί να είναι το αντίστροφο. Η τελική απόφαση θα παρθεί από τον χρήστη του κτιρίου. Η σωστή επιλογή των υλικών μπορεί να επηρεάσει όχι μόνο την έκταση και τη διάρκεια της συντήρησης, αλλά μπορεί επίσης να έχει βλαβερές συνέπειες για τους χρήστες και το περιβάλλον σε όλη τη διάρκεια της ζωής του κτιρίου. Τέτοιες οργανικές ενώσεις βλαβερές για το περιβάλλον, εμπεριέχονται στους χρωματισμούς, τις προστατευτικές επικαλύψεις, τα διαλυτικά και οι ενώσεις των προϊόντων καθαρισμού και των υγρών ψυκτικών. Η ενέργεια κατά τη διάρκεια του σταδίου λειτουργίας, αναφέρεται στη χρήση των ορυκτών καυσίμων για την εξασφάλιση των συνθηκών άνεσης του κτιρίου ή στην χρήση ενέργειας (ηλεκτρικής) για την λειτουργία των ενσωματωμένων μηχανημάτων.

Κατά την τελική φάση της αποδόμησης - κατεδάφισης του κτιρίου παράγονται απόβλητα που απορρίπτονται στη γη ή τον αέρα. Σημαντικό είναι να χρησιμοποιούνται ανακυκλώσιμα υλικά κατά την κατασκευή ώστε να μην μετατραπούν κατά την απόρριψη σε τοξικά απόβλητα. Επίσης, τα φυσικά υλικά είναι γενικά χαμηλότερης ενσωματωμένης ενέργειας και επιπέδων τοξικότητας σε σχέση με τα τεχνητά υλικά.

Όπως προαναφέρθηκε δεν είναι αναγκαίο όλες οι αναλύσεις να περιλαμβάνουν όλα τα στάδια μελέτης. Ο IEA (International Energy Agency) προτείνει διάφορους τύπους συστημικών ορίων (system boundaries), ώστε να είναι δυνατή η ανάλυση μόνο ενός μέρους του κύκλου ζωής της κατασκευής (Εικόνα 2.3). Αυτά είναι τα εξής :

- System Boundary Cradle to Gate: Περιλαμβάνει μόνο το στάδιο παραγωγής των υλικών του κτιρίου. Πιο συγκεκριμένα, αφορά την ενέργεια που απαιτήθηκε για την εξόρυξη των πρώτων υλών, τη μεταφορά τους στο εργοστάσιο και τη βιομηχανοποίηση τους.
- System Boundary Cradle to Site: Αυτός ο τύπος περιλαμβάνει την ενέργεια που απαιτήθηκε για όλες τις διαδικασίες του τύπου Cradle to Gate και επιπλέον την ενέργεια που απαιτήθηκε για τη μεταφορά των υλικών στο εργοτάξιο
- System Boundary Cradle to Handover: Συνυπολογίζει την ενέργεια που απαιτήθηκε για όλες τις δραστηριότητες που έγιναν πριν το κτίριο παραδοθεί για χρήση, συνεπώς προστίθενται στην ποσότητα που έχει υπολογισθεί από τον τύπο Cradle to Site η ποσότητα ενέργειας κατά τη διάρκεια κατασκευής
- System Boundary Cradle to End of Life: Προστίθενται όλες οι ενεργειακές εισροές μέχρι την κατεδάφιση του κτιρίου, συνυπολογίζοντας και τις ενεργειακές ανάγκες για συντήρηση, επιδιόρθωση, αντικατάσταση υλικών, καθώς και τις καθημερινές λειτουργικές ανάγκες.

- System Boundary Cradle to Grave: Συνοπολογίζονται στα προηγούμενα οι ενεργειακές εισροές για την κατεδάφιση του κτιρίου, τη μεταφορά τους σε υγειονομικούς τάφους και την επεξεργασία των λυμάτων.



Εικόνα 2.3: Όρια συστήματος ανάλυσης κύκλου ζωής των κτιρίων

Στον κατασκευαστικό τομέα οι περισσότερες έρευνες που έχουν γίνει είναι αναφορικά με τη φάση λειτουργίας της κατασκευής (operating energy) ενώ λίγες είναι αυτές που αφορούν τον ενσωματωμένο άνθρακα και τη φάση κατασκευής και ακόμα λιγότερες αυτές που αφορούν τη φάση κατεδάφισης. Το ποσοστό που καταλαμβάνει η ενσωματωμένη ενέργεια σε σχέση με την ολική αυξάνεται συνεχώς, αφού τόσο η διαδικασία της εξόρυξης επιδρά δραστικά στο περιβάλλον όσο και τα υλικά που χρησιμοποιούνται. Συνεπώς είναι επιτακτική ανάγκη όλο και περισσότερες έρευνες να επικεντρώνονται σε αυτό το κομμάτι για να διερευνηθούν οι βέλτιστες λύσεις όσον αφορά την επιλογή των υλικών. Η Ανάλυση Κύκλου Ζωής είναι ένα εργαλείο που μπορεί να βοηθήσει να εξαχθούν συμπεράσματα και να ερμηνευθούν.

2.4 ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΥΚΛΟΥ ΖΩΗΣ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΟ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΑΝΤΙΚΤΥΠΟ (LCEA)

Η ανάλυση κύκλου ζωής μίας κατασκευής, ως προς το ενεργειακό της αντίκτυπο (LCEA) είναι μια απλοποιημένη εκδοχή του κλασικού LCA η οποία επικεντρώνεται στην αξιολόγηση των ενεργειακών εισροών που απαιτούνται στις διαφορετικές φάσεις-στάδια του κύκλου ζωής μιας κατασκευής. Συνεπώς το σύνολο του LCEA των κτιρίων περιλαμβάνει τα στάδια της παραγωγής υλικών, της κατασκευής, της λειτουργίας και της κατεδάφισης, τα οποία περιγράφονται αναλυτικά στη συνέχεια :

Φάση Κατασκευής: Πρόκειται για το σύνολο της ενέργειας που απαιτήθηκε κατά την κατασκευή (ενσωματωμένη ενέργεια/ embodied energy). Η ενσωματωμένη ενέργεια χωρίζεται σε δύο κατηγορίες :

- Αρχικά απαιτούμενη ενέργεια (initial energy) ,η οποία περιλαμβάνει την απαιτούμενη ενέργεια για την παραγωγή των πρώτων υλών, τη μεταφορά τους στο εργοτάξιο και την ανέγερση της κατασκευής και προκύπτει από τα υλικά που χρησιμοποιούνται σε όλη τη διάρκεια λειτουργίας του εργοταξίου. Υπολογίζεται από τη σχέση:

$$E_{emb,initial} = \sum_1^i \alpha_i \times m_i \quad (2.1)$$

όπου:

α : συντελεστής ενεργειακής επιβάρυνσης σε MJ/kg

m : μάζα δομικού υλικού σε kg

- Επαναλαμβανόμενη ενσωματωμένη ενέργεια (recurring energy), δηλαδή η ενέργεια που απαιτείται σε βάθος χρόνου μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής, καθώς κάποια υλικά έχουν χρόνο ζωής μικρότερο του χρόνου ζωής του κτιρίου και με την πάροδο του χρόνου απαιτούν αντικατάσταση. Πιο συγκεκριμένα περιλαμβάνει την ενέργεια που καταναλώνεται για την συντήρηση, επισκευή, αποκατάσταση, ανακαίνιση ή αντικατάσταση υλικών κατά τη διάρκεια ζωής του κτιρίου. Υπολογίζεται από τη σχέση:

$$E_{emb,recurring} = \sum_1^i \alpha_i \times m_i \times R_f \quad (2.2)$$

όπου:

R_f : συντελεστής αντικατάστασης

Συνεπώς η συνολική ενσωματωμένη ενέργεια προκύπτει από το άθροισμα των επιμέρους σύμφωνα με την εξίσωση (2.3) :

$$E_{embodied} = E_{emb,initial} + E_{emb,recurrent} \quad (2.3)$$

Φάση Λειτουργίας: Η ενέργεια που καταναλώνεται κατά την φάση λειτουργίας της κατασκευής είναι η ενέργεια που απαιτείται για την πραγματοποίηση όλων των καθημερινών λειτουργιών που πραγματοποιούνται σ' αυτή, όπως για παράδειγμα θέρμανση, ψύξη, εξαερισμός, φωτισμός και όλες οι άλλες συσκευές που υπάρχουν στο κτίριο μας. Σε αυτή την φάση αντιστοιχεί η μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας για τα συμβατικά κτίρια και η ενέργεια που καταναλώνεται για θέρμανση και ηλεκτρισμό εκτιμάται να είναι υπεύθυνη για το 80-90% των επιπτώσεων που αφορούν την κλιματική αλλαγή και την αύξηση της οξύτητας της ατμόσφαιρας. Υπολογίζεται από την εξίσωση (2.4):

$$E_{operation} = EOA \times L_b \quad (2.4)$$

όπου,

$E_{operation}$ η ενέργεια που καταναλώνεται κατά τη φάση λειτουργίας

E_{OA} η ετήσια λειτουργική ενέργεια

L_b η διάρκεια ζωής του κτιρίου

Σύμφωνα με τους (Chau, Leung, & Ng, 2015) ο υπολογισμός των αναγκών λειτουργικής ενέργειας ενός κτιρίου πραγματοποιείται με τρεις διαφορετικές μεθόδους. Η πρώτη προσέγγιση βασίζεται στην πρόσβαση σε ενεργειακούς λογαριασμούς και στην πραγματοποίηση ενεργειακών ελέγχων σε υφιστάμενα κτίρια. Στη δεύτερη προσέγγιση, χρησιμοποιούνται βάσεις δεδομένων καταναλώσεων από οργανισμούς όπως ο IEA(International Energy Agency) στις ΗΠΑ. Η εκτίμηση μέσω αυτών των δεδομένων βασίζεται κυρίως στη διαθεσιμότητα τους όσο και στον προσδιορισμό των κλιματικών συνθηκών και της χρήσης του κτιρίου. Η τελευταία προσέγγιση γίνεται με τη χρήση εφαρμογών ενεργειακής προσομοίωσης που λαμβάνουν υπόψη τις κλιματικές συνθήκες, τη συμπεριφορά των κατοίκων, το σχήμα η την κατεύθυνση του κτιρίου, τον τύπο των συστημάτων παροχής ενέργειας κ.α. Τα προγράμματα αυτά χρησιμοποιούν κυρίως δυο τεχνικές προσέγγισης (Ahsrae, 2005), τη steady state που βασίζεται σ ένα σταθερό ενεργειακό πλάνο κατανάλωσης (π.χ. DOE-2) και τη δυναμική μέθοδο (dynamic method) που είναι πιο περίπλοκη αλλά μπορεί να χειριστεί αρκετά περίπλοκες συνθήκες (π.χ. BLAST, EnergyPlus, ESP-r, TRNSYS).

Φάση Κατεδάφισης: Στο τέλος της λειτουργικής ζωής του κτιρίου, η ενέργεια που απαιτείται για την κατεδάφιση και τη μεταφορά των υλικών σε εγκαταστάσεις ανακύκλωσης υπολογίζεται ως από την εξίσωση (2.5):

$$E_{demolition} = E_{damage} + E_{transportation} \quad (2.5)$$

όπου,

$E_{demolition}$ η ενέργεια κατεδάφισης του κτιρίου

E_{damage} η ενέργεια καταστροφής του κτιρίου

$E_{transportation}$ η ενέργεια μεταφοράς υλικού

Τελικώς, η **συνολική ενέργεια κύκλου ζωής** του κτιρίου υπολογίζεται από την εξίσωση (2.6) από το άθροισμα των επιμέρους σταδίων (φάση κατασκευής, φάση λειτουργίας, φάση κατεδάφισης):

$$E = E_{extraction} + E_{manufacture} + E_{onsite} + E_{operation} + E_{demolition} + E_{recycling} + E_{disposal} \quad (2.6)$$

όπου,

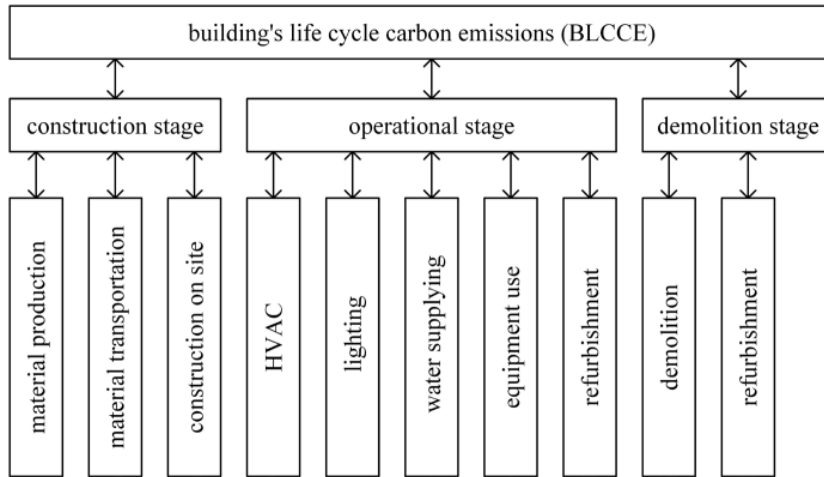
E η ενέργεια που καταναλώθηκε καθ' όλη τη διάρκεια ζωής της κατασκευής

E_i η ενέργεια που καταναλώθηκε σε κάθε φάση του κύκλου ζωής ξεχωριστά

2.5 ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΥΚΛΟΥ ΖΩΗΣ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΙΣ ΕΚΠΟΜΠΕΣ CO₂ (LCCO₂A)

Με τη μέθοδο LCCO₂A μπορούμε να υπολογίσουμε αναλυτικά τις εκπομπές του διοξειδίου του άνθρακα σε όλες τις φάσεις ζωής του κτιρίου (Εικόνα 2.4). Οι συνολικές εκπομπές CO₂ υπολογίζονται με την παρακάτω εξίσωση (2.7) :

$$CO_2 = CO_{2_{extraction}} + CO_{2_{manufacture}} + CO_{2_{onsite}} + CO_{2_{operation}} + CO_{2_{demolition}} + CO_{2_{recycling}} + CO_{2_{disposal}} \quad (2.7)$$



Εικόνα 2.4: Ανάλυση Κύκλου Ζωής ως προς τις εκπομπές του άνθρακα

Ενσωματωμένες εκπομπές CO₂

Οι ενσωματωμένες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα προέρχονται από την εξόρυξη πρώτων υλών, από τη μεταφορά τους στη βιομηχανία και την παραγωγή των δομικών υλικών. Επίσης, στον υπολογισμό τους δεν λαμβάνονται υπόψη μόνο οι εκπομπές που απελευθερώνει ο ορυκτός άνθρακας κατά τη διαδικασία παραγωγής των δομικών υλικών (fossil carbon emissions) , αλλά και αυτές που απελευθερώνονται από τις χημικές αντιδράσεις κατά τη βιομηχανική διαδικασία (process carbon emissions).

$$CO_{2_{embodied}} = CO_{2_{fossil}} + CO_{2_{process}} \quad (2.8)$$

Οι εκπομπές του ορυκτού άνθρακα (fossil carbon emissions) μπορούν να υπολογιστούν με δύο μεθόδους:

Η πρώτη μέθοδος υπολογίζει τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα κάθε υλικού με τον πολλαπλασιασμό της ενέργειας που απαιτήθηκε για την παραγωγή του με έναν κατάλληλο συντελεστή που η τιμή του εξαρτάται από το εκάστοτε ορυκτό καύσιμο.

$$CO_{2_{fossil}} = e_i \times \beta_i \times m_i \quad (2.9)$$

όπου,

β_i ο μέσος συντελεστής εκπομπής διοξειδίου του άνθρακα για την παραγωγή του υλικού

m_i η μάζα του δομικού υλικού

e_i η περιεχόμενη ενέργεια σε κάθε υλικό.

Στη δεύτερη μέθοδο οι εκπομπές υπολογίζονται απευθείας πολλαπλασιάζοντας την ποσότητα του κάθε υλικού επί ένα συντελεστή εκπομπών που αντιστοιχεί στο καθένα, οι οποίοι προκύπτουν από διάφορες έρευνες και υπάρχουν σε λίστες δεδομένων.

$$CO_{2_{fossil}} = \sum_1^i \rho_i \times m_i \quad (2.10)$$

όπου,

ρ_i ο συντελεστής εκπομπής διοξειδίου του άνθρακα του υλικού

m_i η μάζα του δομικού υλικού

Οι εκπομπές CO_2 που απελευθερώνονται από τις χημικές αντιδράσεις που συντελούνται κατά τη βιομηχανική διαδικασία παραγωγής των δομικών υλικών καταλαμβάνουν μεγάλο μέρος των συνολικών εκπομπών σε ποσοστό που ανέρχεται στο 16%. Ανάλογα με το είδος του υλικού και τη διαδικασία που ακολουθείται οι εκπομπές εκτιμώνται με διαφορετικό τρόπο. Ωστόσο το μεγαλύτερο μέρος των εκπομπών αυτών οφείλεται κατά κύριο λόγο στη διαδικασία παραγωγής τσιμέντου και χάλυβα. Η διαδικασία που ακολουθείται ονομάζεται διαπύρωση. Μέσω αυτής μετατρέπεται με μία χημική αντίδραση ο ασβεστόλιθος σε τσιμέντο, οξείδιο του ασβεστίου και διοξείδιο του άνθρακα σε πολύ υψηλή θερμοκρασία. Η ποσότητα του άνθρακα που εκπέμπεται κατά τη διαδικασία βιομηχανοποίησης του τσιμέντου υπολογίζεται κατά το μοντέλο των Pommer & Pade:

$$CO_{2_{calcination}}(kg) = \beta \times m_{cement} \times \rho_{clinker} \quad (2.11)$$

όπου,

β το διοξείδιο του άνθρακα που εκπέμπεται ανά kg παραγόμενου κλίνκερ, έχει τιμή 0.51

m_{cement} η μάζα σε kg του τσιμέντου που χρησιμοποιήθηκε στην κατασκευή

$\rho_{clinker}$ το ποσοστό κλίνκερ που περιέχει το τσιμέντο

Η ίδια αντίδραση χρησιμοποιείται και κατά τη διαδικασία παραγωγής χάλυβα οπλισμού. Ο Hong εκτίμησε ότι για κάθε τόνο παραγόμενου χάλυβα παράγονται 0.426 τόνοι διοξειδίου του άνθρακα.

Εκπομπές CO_2 κατά τη φάση λειτουργίας

Στη φάση λειτουργίας του κτιρίου εξακολουθούν να εκπέμπονται ρύποι στο περιβάλλον. Η έκθεση του κτιρίου στις περιβαλλοντικές συνθήκες οδηγεί σε χημικές αντιδράσεις των υλικών με κυρίαρχες την οξείδωση των μετάλλων και την ενανθράκωση του σκυροδέματος. Αυτό εξαρτάται από την απροστάτευτη επιφάνεια του σκυροδέματος που έρχεται σε επαφή με τον ατμοσφαιρικό αέρα, την σύσταση του τσιμέντου που χρησιμοποιήθηκε για την

παρασκευή του σκυροδέματος, την σχετική υγρασία, την θερμοκρασία του περιβάλλοντος και τις συνθήκες έκθεσης.

Επίσης, οι εκπομπές CO₂ κατά τη φάση λειτουργίας εξαρτώνται κατά βάση από την ενέργεια που απαιτείται για ψύξη, θέρμανση και ηλεκτρισμό. Οι εκπομπές λόγω της χρήσης του κτιρίου λοιπόν υπολογίζονται από τους κατασκευαστές σύμφωνα με δεδομένα που έχουν προκύψει από έρευνες και με κριτήριο να καλύπτουν τις ανάγκες του καταναλωτή. Πλέον γίνονται προσπάθειες μείωσης των εκπομπών και κατανάλωσης ενέργειας στο στάδιο αυτό με συστήματα κλιματισμού – θέρμανσης - εξαερισμού (HVAC systems), τα λειτουργικά μεσα του φωτισμού (Lighting) και άλλες εφαρμογές χρήσης εντός του κτιρίου (Running appliances).

Εκπομπές CO₂ κατά τη φάση κατεδάφισης

Πρόκειται για τις εκπομπές από τη διαδικασία κατεδάφισης, τη μεταφορά των υλικών και την επεξεργασία των στερεών αποβλήτων. Ο υπολογισμός τους διαφέρει για κάθε διαδικασία. Η μεταφορά των υλικών στο χώρο επεξεργασίας τους λαμβάνεται υπόψη ο αριθμός των μέσων μεταφοράς, ο συντελεστής επιπλήσματος, ο όγκος και το βάρος των υλικών αλλά και οι εκπομπές των όχημα των κατά τη μεταφορά. Επιπλέον, θα μπορούσαν να προστεθούν και οι ρύποι που θα παραχθούν μετά από κάποιο χρονικό διάστημα με την αποικοδόμηση της ύλης μετά την απόθεση των αποβλήτων σε χωματερές και χώρους υγειονομικής ταφής.

2.6 ΑΔΥΝΑΜΑ ΣΗΜΕΙΑ ΤΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΚΥΚΛΟΥ ΖΩΗΣ

Αν και η Ανάλυση Κύκλου Ζωής αποτελεί ένα σημαντικό εργαλείο για τη διαχείριση του περιβάλλοντος ταυτόχρονα παρουσιάζει και κάποιες αδυναμίες. Αρχικά όπως αναφέρθηκε η διαδικασία εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ποιότητα των δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν για την υλοποίηση της. Τα δεδομένα στην καταγραφή του κύκλου ζωής είναι συχνά μη ολοκληρωμένα ή ανακριβή κυρίως διότι οι πηγές που είναι απαραίτητες για την απόκτηση υψηλής ποιότητας δεδομένων είναι μη διαθέσιμες. Ταυτόχρονα, οι βάσεις δεδομένων διαφέρουν ανάλογα με τις τοπικές συνθήκες και όταν δεν είναι επαρκώς προσδιορισμένες και αντί αυτών χρησιμοποιούνται παγκόσμιες ή δεδομένα που έχουν προταθεί από παρόμοιες έρευνες το αποτέλεσμα που προκύπτει δεν είναι ακριβές και πιθανώς να είναι και λανθασμένο. Για την εξάλειψη της αδυναμίας της αυτής όμως έχουν αναπτυχθεί διάφορα εργαλεία που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να αξιολογηθεί η εγκυρότητα μιας ενιαίας LCA και τη μεταβλητότητα των πολλαπλών LCA για το ίδιο θέμα. Ένα τέτοιο εργαλείο είναι η «κυρίαρχη ανάλυση» μέσω του οποίου μπορεί να αναδειχθεί ποια φάση του κύκλου ζωής έχει τη μεγαλύτερη περιβαλλοντική επίπτωση. Άλλα είναι η ανάλυση ευαισθησίας και η ανάλυση αβεβαιότητας.

Μία ακόμα αδυναμία της ΑΚΖ είναι το γεγονός ότι λαμβάνει υπόψιν της μόνο το περιβάλλον και όχι την οικονομία και τα κοινωνικά ζητήματα. Η βιωσιμότητα σαν έννοια είναι αλληλένδετη τόσο με το περιβάλλον όσο και την οικονομία και την κοινωνία. Ωστόσο, η ανάλυση εφόσον έχει ως βασικό άξονα την αξιολόγηση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος τις δύο αυτές έννοιες δεν τις συμπεριλαμβάνει. Τα οικονομικά κριτήρια ενώ είναι δυνατόν να ποσοτικοποιηθούν συνήθως αυτό δε συμβαίνει, αφού δεν τίθεται ως στόχος της. Από την άλλη πλευρά τα κοινωνικά ζητήματα είναι τόσο πολύπλευρα που δεν μπορούν να ποσοτικοποιηθούν συνεπώς είναι ανέφικτο να τα ποσοτικοποιήσουμε και να τα εισάγουμε στην διαδικασία. Κατά συνέπεια δεν μπορούμε να αξιολογήσουμε το πόσο το προϊόν, η

δραστηριότητα ή η διαδικασία που μελετάται μπορεί να επηρεάσει τη βιωσιμότητα αφού τα αποτελέσματα παρουσιάζουν μόνο ένα μέρος της συνολικής εικόνας.

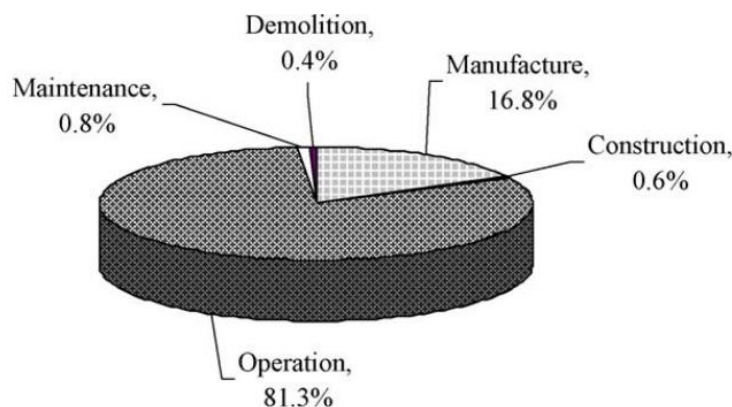
3. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται ορισμένες μελέτες που πραγματεύονται την αξιολόγηση του κύκλου ζωής διάφορων τύπων κτιρίων. Ορισμένες από τις μελέτες αυτές συνδύασαν την Ανάλυση Κύκλου Ζωής του κτιρίου με τη βελτιστοποίηση του δομικού σχεδιασμού, ώστε να διερευνηθούν πως την επηρεάζει, και άλλες με την τεχνολογία BIM και κυρίως με τη χρήση του λογισμικού Autodesk Revit, προκειμένου να αναδείξει τις δυνατότητες που προσφέρει. Η ανάλυση των μελετών που εξετάστηκαν επικεντρώνεται κυρίως στη φάση κατασκευής και τα υλικά και κατά δεύτερο λόγο στη φάση λειτουργίας, καθώς εκεί επικεντρώνεται και το σύνολο της παρούσας εργασίας. Σκοπός της εξέτασης των παρακάτω επιστημονικών άρθρων είναι η επιπλέον ανάδειξη της σημαντικότητας τόσο της βελτιστοποίησης όσο και της τεχνολογίας Μοντέλων Δομικών Πληροφοριών (BIM) στο σχεδιασμό του κτιρίου, ο οποίος θα συντελέσει καθοριστικό ρόλο για τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις που θα έχει εν τέλει το εκάστοτε κτίριο.

“Life Cycle Energy Assessment of a Typical Office Building in Thailand” (Kofoworola & Gheewala, 2009)

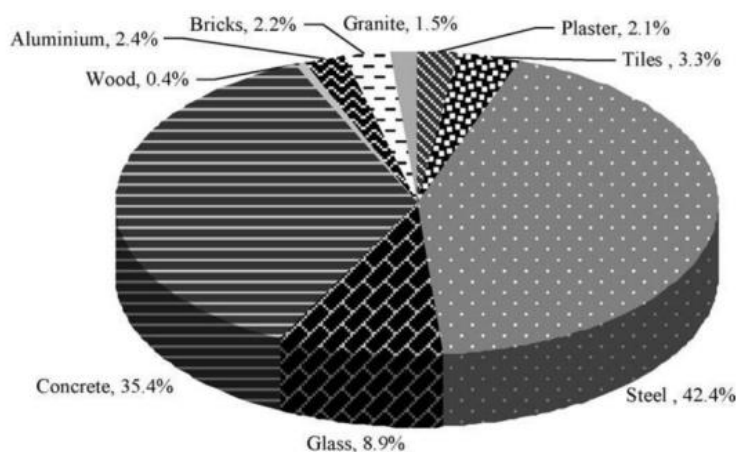
Στη συγκεκριμένη μελέτη αναλύθηκε ένα τυπικό κτίριο γραφείων στην Ταϊλάνδη χρησιμοποιώντας την Ανάλυση Κύκλου Ζωής της Ενέργειας (LCEA). Πρόκειται για ένα κτίριο 38 ορόφων στην Bangkok εμβαδού 60000 m², για την ανέγερση του οποίου χρησιμοποιήθηκε κατά κύριο λόγο σκυρόδεμα και διακοσμητικός τοίχος πρόσοψης με υαλοπετάσματα. Στόχος της είναι να παρέχει πληροφορίες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως μία βάση για την αναβάθμιση της νομοθεσίας για την ενεργειακή απόδοση των κτιρίων της Ταϊλάνδης αλλά και να μελετήσει τη σημασία κάθε φάσης του κύκλου ζωής του κτιρίου, όπου τονίζεται και η σπουδαιότητα της ενσωματωμένης ενέργειας και προτείνονται λύσεις μείωσης της.

Πιο συγκεκριμένα τα αποτελέσματα της μεθόδου LCEA που χρησιμοποίησε η έρευνα έδειξαν ότι η φάση λειτουργίας κυριαρχεί στον κύκλο ζωής του κτιρίου με ποσοστό 81%. Ωστόσο επισημαίνεται και η σημασία της ενσωματωμένης ενέργειας στη φάση κατασκευής σε ποσοστό 17% (Εικόνα 3.1).



Εικόνα 3.1: Διανομή της κατανάλωσης ενέργειας ανά φάση

Όσον αφορά την ενσωματωμένη ενέργεια που απαιτείται για την κατασκευή όλων των οικοδομικών υλικών υπολογίστηκε 375 TJ , τα οποία αντιστοιχούν σε 6,8 GJ/m². Η τιμή αυτή βρίσκεται σε εύρος των τιμών που προκύπτουν και από άλλες σχετικές έρευνες 3,4 – 19,0 GJ/m². Στην ενσωματωμένη ενέργεια κυρίαρχο ρόλο έπαιξε ο χάλυβας, ο οποίος αντιπροσώπευε το 42,4% της αρχικής ενσωματωμένης ενέργειας και το σκυρόδεμα, το οποίο αντιπροσώπευε περίπου το 35%. (Εικόνα 3.2)



Εικόνα 3.2: Κατανομή της initial embodied energy ανά υλικό

Επίσης, η μέση ετήσια κατανάλωση για 50 χρόνια λειτουργίας του κτιρίου υπολογίστηκε 0,86 GJ/m². Συνεπώς, η σύγκριση ενσωματωμένης και λειτουργικής ενέργειας του κτιρίου κατά τη διάρκεια της ζωής του έδειξε ότι η ενσωματωμένη είναι το 15% της λειτουργικής.

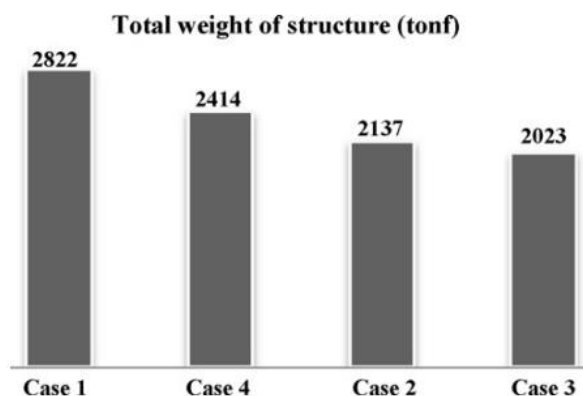
Τέλος, το άρθρο κάνει λόγο για τρόπους εξοικονόμησης ενέργειας που αφορούν κυρίως τη φάση λειτουργίας . Μεταξύ άλλων αναφέρεται η σημασία της ανακύκλωσης των οικοδομικών υλικών που αφορά την αρχική ενσωματωμένη ενέργεια και που μπορεί να συμβάλλει σε επιπλέον εξοικονόμηση ενέργειας κατά 8,9%. Συγκεκριμένα αναφέρεται ότι η επαναχρησιμοποίηση, η σύνθλιψη και η επαναχρησιμοποίηση των υλικών του σκυροδέματος μετά τη φάση κατεδάφισης ενός κτιρίου ωφελούν στην μείωση της ενέργειας που θα απαιτηθεί για την εξόρυξη και την επεξεργασία νέων αδρανών υλικών.

“LCA application in the optimum design of high rise steel structures”(Cho, Kim, Hong, & Kim, 2012)

Στη συγκεκριμένη μελέτη χρησιμοποιείται η βελτιστοποίηση του δομικού σχεδιασμού, ως τρόπος για τη μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα και των αερίων του θερμοκηπίου. Η εφαρμογή της γίνεται σε ένα πολυώροφο μεταλλικό κτίριο στη Νότια Κορέα, του οποίου ο αρχικός σχεδιασμός δεν διέθετε σύστημα πλευρικής αντίστασης και έχει μοντελοποιηθεί με τρεις διαφορετικές μορφές δομικών συστημάτων με αντίσταση σε πλευρικά φορτία. Η δομικός σχεδιασμός βελτιστοποιείται με κριτήριο την ισοδύναμη

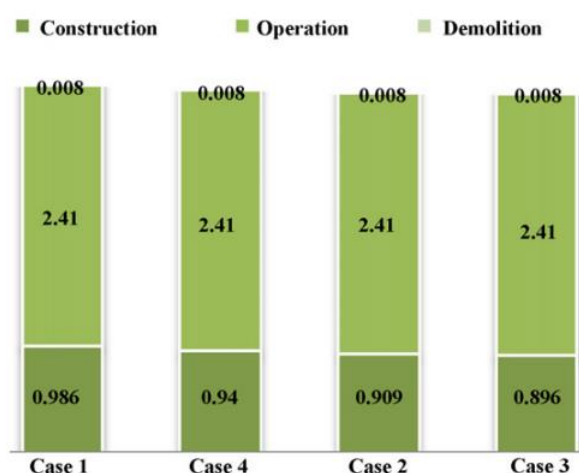
επιτρεπόμενη πλευρική μετατόπιση. Επιπλέον, χρησιμοποιείται εργαλείο LCA, προκειμένου να διερευνηθούν οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

Τα αποτελέσματα του δομικού σχεδιασμού έδειξαν ότι το μοντέλο αναφοράς είχε τη μέγιστη ποσότητα χάλυβα ενώ τα μοντέλα με πλευρική αντίσταση είχε το ελάχιστον. Συνεπώς, ένα δομικό σύστημα πλευρικής αντίστασης σε ένα πολυώροφο κτίριο μπορεί να μειώσει τα συνολικά βάρη του χάλυβα και άλλων υλικών που χρησιμοποιούνται στη διαδικασία παραγωγής (Εικόνα 3.3).



Εικόνα 3.3: Σύγκριση του συνολικού βάρους χάλυβα με βάση το σύστημα αντίστασης πλευρικού φορτίου

Με δεδομένα τα βάρη του χάλυβα που προέκυψαν από την στατική ανάλυση και τη χρήση προγράμματος LCA για τη μελέτη του κύκλου ζωής του CO₂ βγήκαν τα αποτελέσματα που εμφανίζονται παρακάτω στην εικόνα 3.4. Από αυτά φαίνεται ότι οι εκπομπές του CO₂ στη φάση κατασκευής μειώθηκαν.



Εικόνα 3.4: Εκπομπές CO₂ για το κάθε δομικό σύστημα

Συνεπώς, η επιλογή του δομικού συστήματος έχει σημαντικό αντίκτυπο στη συνολική ποσότητα των χρησιμοποιούμενων υλικών και κατ' επέκταση στις εκπομπές ρύπων στο περιβάλλον. Επομένως, οι μελέτες θα πρέπει να εξετάζουν εκτενέστερα τη φάση σχεδιασμού του κτιρίου, καθώς υπάρχουν πολλοί παράμετροι σε αυτή τη φάση που μπορούν να συμβάλλουν θετικά στην αειφόρο ανάπτυξη.

“Sustainable structural design of tall buildings based on embodied energy” (Foraboschi, Mercanzin, & Trabucco, 2014)

Στη συγκεκριμένη έρευνα έγινε μελέτη πολυώροφου κτιρίου με πυρήνα από οπλισμένο σκυρόδεμα και άκαμπτα πλαίσια κατασκευασμένα είτε από οπλισμένο σκυρόδεμα είτε από χάλυβα. Η δομή αναφοράς είναι διαστασιολογημένη για διαφορετικό πλήθος ορόφων, μεταξύ 20 και 70 ορόφων. Στη συνέχεια, υπολογίζεται η ενσωματωμένη ενέργεια κάθε κτιρίου.

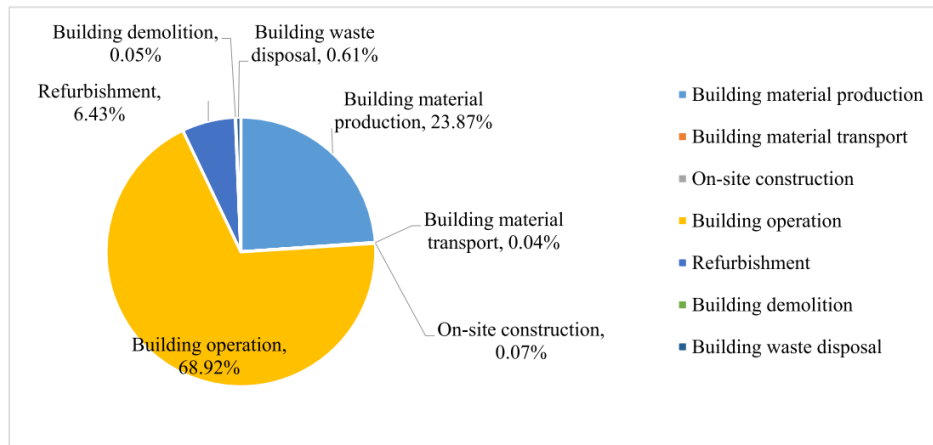
Το αποτέλεσμα της έρευνας δείχνει πως το ύψος της κατασκευής δεν επηρεάζει την ενσωματωμένη ενέργεια, γεγονός που καθιστά τα πολυώροφα κτίρια βιώσιμα. Επιπλέον, αποδεικνύουν ότι η ενσωματωμένη ενέργεια εξαρτάται κυρίως από το σύστημα δαπέδων και από το ότι ο χάλυβας καταναλώνει περισσότερη ενσωματωμένη ενέργεια από το οπλισμένο σκυρόδεμα. Αυτό συμβαίνει καθώς ο χάλυβας αποτελεί ελαφρύτερο υλικό από το σκυρόδεμα και οι τύποι δαπέδων, και κατά συνέπεια τα κτίρια, με ελαφρύτερα υλικά καταναλώνουν περισσότερη ενσωματωμένη ενέργεια. Ως τρόπος αντιμετώπισης προτείνεται η αύξηση των υποστυλωμάτων που όμως θα δυσκόλευαν την αρχιτεκτονική του κτιρίου.

Building-information-modeling enabled life cycle assessment, a case study on carbon footprint accounting for a residential building in China (Xining Yang, Mingming Hu, Jiangbo Wu, Bin Zhao, 2017)

Η συγκεκριμένη μελέτη επιδιώκει να αναδείξει τις δυνατότητες της τεχνολογίας BIM σε μία Ανάλυση Κύκλου Ζωής. Μελετά ένα κτίριο κατοικιών δύο ορόφων από τούβλο και μπετόν εμβαδού 423,4 στο χωριό Baiguoba της Κίνας. Το κτίριο έχει διάρκεια ζωής 50 χρόνια ωστόσο λαμβάνεται και ως δεδομένο στη μελέτη ότι θα ανακαινιστεί μετά από 15 με 30 χρόνια λειτουργίας, όπως συνήθίζεται στην Κίνα λόγω της βελτίωσης του βιωτικού επιπέδου.

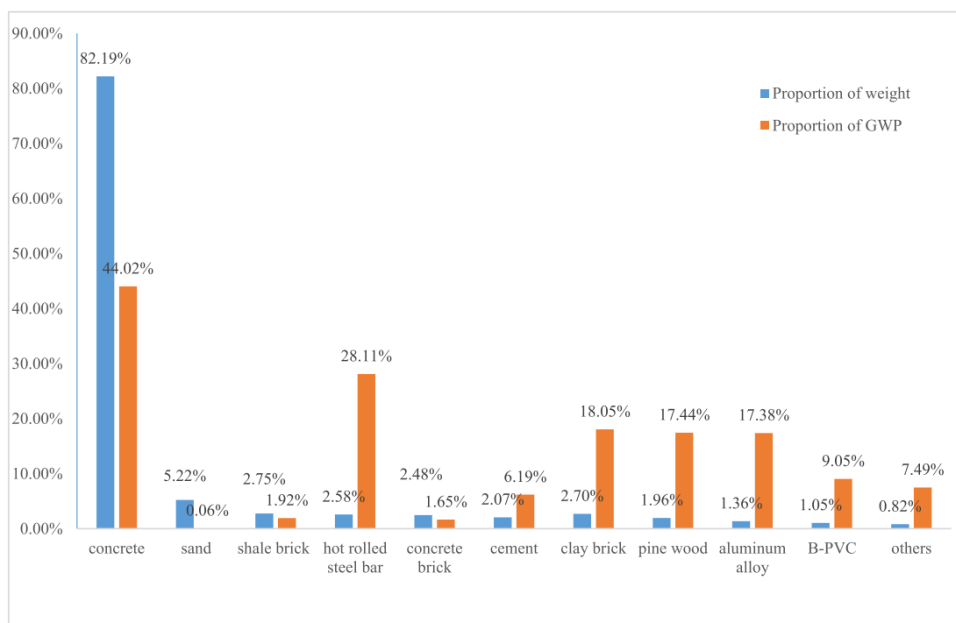
Προκειμένου να υπολογίσει το αποτύπωμα του διοξειδίου του άνθρακα χρησιμοποιεί αρχικά το Autodesk Revit 2015 για τη δημιουργία του μοντέλου και το λογισμικό BIM5D για τον υπολογισμό των ποσοτήτων των οικοδομικών υλικών, των καυσίμων και των ομάδων μηχανημάτων. Στη συνέχεια, προσομοιώνεται η φάση λειτουργίας στο DesignBuilder για τον υπολογισμό της κατανάλωσης ενέργειας έτσι ώστε να υπολογιστεί το αποτύπωμα του άνθρακα στη φάση λειτουργίας με έμμεσο τρόπο. Τέλος, για να υπολογιστεί το τελικό αποτύπωμα γίνεται χρήση ενός κινέζικου λογισμικού LCA, το eBalance, και κινέζικη βάση δεδομένων του κύκλου ζωής των κτιρίων.

Όσον αφορά τα αέρια του θερμοκηπίου στον κύκλο ζωής η μελέτη διαπίστωσε ότι σε μεγαλύτερο βαθμό συνεισφέρουν η φάση λειτουργίας και η φάση παραγωγής υλικών με ποσοστό 68,92% και 23,87% αντίστοιχα. Έπειτα, συνεισφέρουν οι ανακαινίσεις με ποσοστό 6,43%. (Εικόνα 3.5) Συνεπώς, αυτές οι τρεις αποτελούν τις πιο κρίσιμες φάσεις στον κύκλο ζωής των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα.



Εικόνα 3.5: Εκπομπές άνθρακα κάθε φάσης

Επιπλέον, όσον αφορά τα υλικά και το διοξείδιο που εκπέμπουν διαπιστώθηκε ότι αν και ποσότητα που εκπέμπει το σκυρόδεμα είναι ανάλογη με το ποσοστό βάρους που έχει στην κατασκευή δεν ισχύει με όλα τα υλικά αυτό. Για παράδειγμα, η άμμος αποτελεί το 5,22% του συνολικού βάρους ενώ συνεισφέρει μόνο κατά 0,06% στις εκπομπές. Αντίθετα, η αναλογία βάρους των ράβδων χάλυβα θερμής έλασης είναι μόνο 2,58% αλλά παράγει 28,11% αέρια θερμοκηπίου. (Εικόνα 3.6) Το ίδιο παρατηρήθηκε και με άλλα υλικά όπως ο πηλός, το τούβλο, το ξύλο και αλουμινίου. Συνεπώς, οι σχεδιαστές θα πρέπει να λαμβάνουν τα παραπάνω υπόψη τους και να παίρνουν προσεκτικές αποφάσεις για την επιλογή των δομικών υλικών. Παράλληλα, κάποια υλικά θα μπορούσαν να αντικατασταθούν και από άλλα με πιο χαμηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα.



Εικόνα 3.6: Σύγκριση βάρους και δυναμικού πλανητικής υπερθέρμανσης μεταξύ διαφόρων δομικών υλικών

Τέλος, σχετικά με την τεχνολογία BIM και το Revit η μελέτη αναφέρει ότι επιτρέπει την δημιουργία ενός ολοκληρωμένου μοντέλου που περιέχει πληροφορίες από όλους τους τομείς του κατασκευαστικού τομέα που συμμετέχουν στο έργο, καθιστώντας έτσι την αξιολόγηση του κύκλου ζωής πιο ακριβής και αποτελεσματική. Παράλληλα, οι πίνακες με τις ιδιότητες των υλικών του Autodesk Revit παρέχουν πολλές πληροφορίες για το υλοποιούμενο έργο και μπορούν να ρυθμιστούν εύκολα, ενώ μέσω του Revit μπορούν να παραχθούν και πίνακες για τον υπολογισμό των ποσοτήτων των υλικών ανάλογα με τις παραμέτρους που επιλέγουμε. Επισημαίνεται τέλος, η σύνδεση και διαλειτουργικότητα μεταξύ λογισμικών που υποστηρίζει η τεχνολογία BIM και στη συγκεκριμένη περίπτωση η σύνδεση με λογισμικό LCA εξαλείφει σημαντικά την ανάγκη για χειρονακτική εισαγωγή δεδομένων και επιταχύνει σημαντικά τη διαδικασία μελέτης της LCA.

BIM-BASED LCA APPROACH APPLIED ON A CASE STUDY (Kamar Aljundi, Fernanda Rodrigues, Armando Pinto, Ana Cláudia Dias)

Στόχος του συγκεκριμένου επιστημονικού άρθρου είναι να ερευνηθεί αν το BIM μπορεί να βοηθήσει την Ανάλυση Κύκλου Ζωής να γίνει πιο αποδοτική στον υπολογισμό των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, έτσι ώστε να χρησιμοποιείται σε μεγαλύτερο βαθμό από την κατασκευαστική βιομηχανία ιδιαίτερα στο στάδιο του σχεδιασμού. Αναλύεται το κτίριο του Τμήματος Τέχνης του Πανεπιστημίου Aveiro στην Πορτογαλία με τρεις εναλλακτικές δομικές λύσεις (σύμμικτη, μεταλλική και κατασκευή από σπλισμένο σκυρόδεμα). Πρόκειται για ένα κτίριο τεσσάρων ορόφων με κάτοψη συνολικού εμβαδού 1600 m² με όψεις που αποτελείται στο μεγαλύτερο ποσοστό από υαλοπίνακες και με διάρκεια ζωής 50 έτη. Ωστόσο λόγω της σημασίας του κτιρίου αναμένεται να έχει μεγαλύτερο κύκλο ζωής και μελετάται για 100 χρόνια, πράγμα που συνεπάγεται είτε την χρήση υψηλότερης κατηγορίας σκυροδέματος είτε τη συντήρηση του κάθε 50 χρόνια ζωής.

Στην προσπάθεια να διερευνηθούν οι δυνατότητες του BIM το πρόβλημα προσεγγίζεται με δύο διαφορετικούς τρόπους: παραδοσιακή διαδικασία LCA με χρήση του λογισμικού LCA SimaPro και LCA με χρήση προγράμματος BIM LCA Tally, το οποίο αποτελεί προέκταση του Revit. Και στις δύο προσεγγίσεις χρησιμοποιήθηκε το Autodesk Revit για τη μοντελοποίηση του τρισδιάστατου φορέα και την προμέτρηση υλικών με τη λειτουργία Material Takeoff. Οπότε το εργαλείο BIM θα αξιολογηθεί ως προς τη βάση δεδομένων, τα πρότυπα και τη διαλειτουργικότητα. Αρχικά, επισημαίνονται κάποιες διαφορές μεταξύ των ποσοτήτων του Revit και αυτών που προκύπτουν από την λίστα των υλικών του κατασκευαστή (Εικόνα 3.7). Επιπλέον, επισημαίνονται οι διαφορές μεταξύ της βάσης δεδομένων κάθε προγράμματος όσο και των πραγματικών κατασκευαστικών προϊόντων (Εικόνα 3.8).

Elements and their functional units	Bill of quantities	Revit quantities	Difference
Steel columns and beams (kg) ⁽¹⁾	389482	379437	2.5 %
Reinforced concrete piles (m)	1059	1030	2.82 %
Reinforced concrete elevator box (m ³)	17.81	17.91	-0.55 %
Reinforced concrete in columns (m ³)	3.86	3.68	4.66%
Reinforced concrete bearing walls (m ³)	177.97	187.31	-4.98 %
Reinforced concrete in collaborative slabs (m ³) ⁽²⁾	328.97	345.93	-4.90%
Haircol 59S steel part of the collaborative slabs (kg) ⁽²⁾	21959	23092	-4.90%
Reinforced concrete in solid slabs (m ³)	389.59	407	-4.27%
Formwork (m ²) ⁽³⁾	N.A.	Foundations: 2458.11 Beams: 1231 Slabs: 1275 Columns: 41	N.A.
Painting (m ²)	7617	8048	-5.35%

Εικόνα 3.7: Διαφοροποίηση πραγματικών ποσοτήτων και προμετρήσεων του προγράμματος Revit

Material name	Designed material	Material in SimaPro	Material in Tally
Concrete in collaborative slabs	C20/25, XC3+XS1	C20 with a density of 2335 kg/m ³	C20/25, XC3+XS1 with a density of 2181 kg/m ³
Concrete in solid slabs	C35/45, XC4+XS3+XA2	C35 with a density of 2315 kg/m ³	C35/C45, XC4+XS3+XA2 with a density of 2220 kg/m ³
Concrete in foundations	C35/45, XC4+XS3+XA2	C35 with a density of 2315 kg/m ³	C35/C45, XC4+XS3+XA2
Concrete for 100 years design	C45/50, XC4+XS3+XA2	C50 with a density of 2300 kg/m ³	C50 with a density of 2280 kg/m ³
Steel	Hot rolled Steel	Steel, hot rolled, low alloyed steel	Hot rolled steel S275
Wood	Plywood	Plywood, outdoor use	Exterior grade plywood, US
Painting	Epoxy with zinc Acrylic	Only zinc coating Acrylic	Only epoxy Acrylic

Εικόνα 3.8: Διαφοροποιήσεις στη βάση δεδομένων κάθε προγράμματος

Ωστόσο, ως συμπέρασμα εξάγεται ότι αυτή η διαφορά στη βάση δεδομένων των προγραμμάτων είναι δικαιολογημένη, καθώς το SimaPro χρησιμοποιεί την Ecoinvent που λαμβάνει υπόψη τις ευρωπαϊκές χώρες ενώ το Tally την Gabi που λαμβάνει υπόψη τις αμερικάνικες πληροφορίες σχετικά με τα υλικά και τις διαδικασίες. Ωστόσο και τα δύο προγράμματα έφτασαν στα ίδια συμπεράσματα σχετικά με τη δομή του κτιρίου που συμβάλλει περισσότερο στις περιβαλλοντικές επιπτώσεις και τον κύκλο ζωής του έργου που είναι αποδοτικότερος.

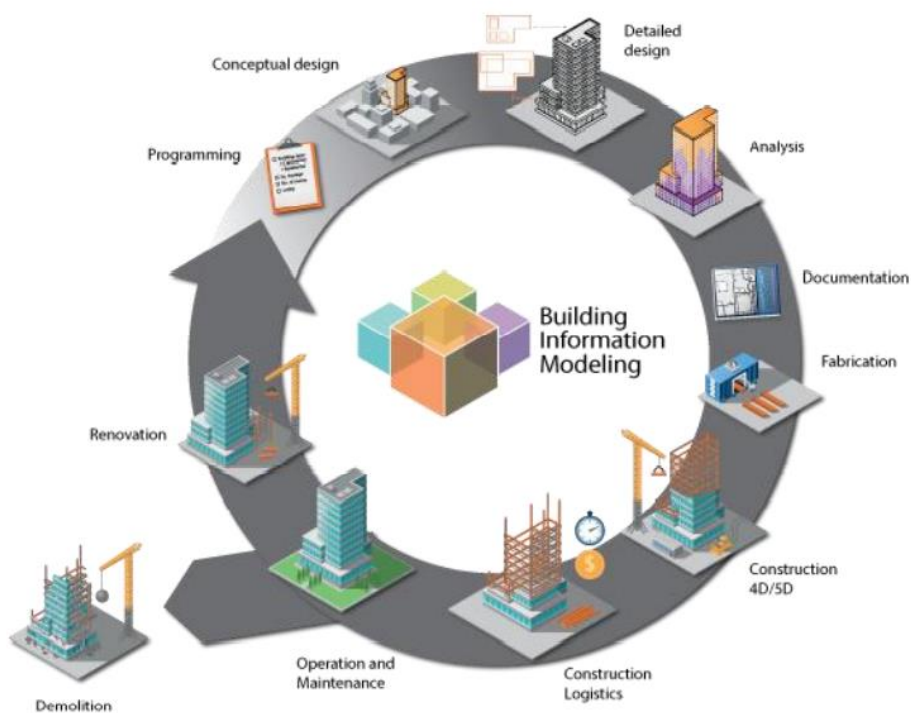
Επιπλέον, η χρήση της τεχνολογίας BIM συνέβαλε και στις δύο προσεγγίσεις αφού ήταν απαραίτητο για το σχεδιασμό του φορέα και τον εναλλακτικών του λύσεων σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα. Χωρίς το BIM η διαδικασία σχεδιασμού όλων των λύσεων δεν θα μπορούσε να γίνει πλήρως καθώς αποτελεί μια ιδιαίτερα δύσκολη διαδικασία. Παράλληλα, με το Revit μετρήθηκαν και για τις δύο προσεγγίσεις οι ποσότητες των υλικών και συνεπώς δεν απαιτήθηκε χειρονακτική μέτρηση των υλικών που αποτελεί μια ιδιαίτερα χρονοβόρα διαδικασία.

4. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΤΙΡΙΑΚΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ (BIM)

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο δομικός κλάδος αποτελεί κινητήρια δύναμη της οικονομίας των χωρών με αποτέλεσμα να δίνει ώθηση στην πρόοδο και την ευημερία. Κατά την ετήσια αναφορά της European Construction Industry Federation (FIEC) το 2017, η οικονομία των κατασκευών αποτελεί το 9% του ακαθάριστου εγχώριου προϊόντος (Gross Domestic Product - GDP) της Ευρώπης, ύψους σχεδόν 1,3 τρισεκατομμυρίων ευρώ και προβλέπεται αλματώδης συνεχής ανάπτυξη τα επόμενα χρόνια. Προκειμένου λοιπόν να επιτευχθεί ευημερία του κλάδου και κατ' επέκταση της κοινωνίας είναι σημαντική η εναρμόνιση των παραδοσιακών τακτικών διαχείρισης έργων με τις καινοτόμες τεχνολογίες.

Η τεχνολογία BIM αποτέλεσε μια κοινή «γλώσσα» επικοινωνίας στον κλάδο των μελετών και των κατασκευών που βελτιώνει τον προγραμματισμό και τον σχεδιασμό σε όλα τα στάδια υλοποίησης τεχνικών έργων. Η Διεθνής Επιτροπή Προτύπων BIM (National BIM Standards Committee – NBIMS) , ορίζει το building information modeling ως «μια ολοκληρωμένη ψηφιακή αναπαράσταση των φυσικών και λειτουργικών χαρακτηριστικών μιας υποδομής. Ένα μοντέλο BIM αποτελεί μια πηγή πληροφοριών για ένα κτίριο – υποδομή, δημιουργώντας έτσι μια αξιόπιστη βάση για λήψη βελτιωμένων αποφάσεων σε όλο τον κύκλο ζωής, που είναι διαθέσιμη από τα πιο πρώιμα στάδια της σχεδιαστικής σύλληψης έως την κατεδάφιση». (Εικόνα 4.1)



Εικόνα 4.1: Τα πεδία εφαρμογών της τεχνολογίας BIM

4.2 ΠΡΟΕΛΕΥΣΗ ΚΑΙ ΕΞΕΛΙΞΗ BIM

Η 3D μοντελοποίηση ξεκίνησε από τις αρχές του 1970, βασισμένη σε τεχνολογίες τύπου CAD, που χρησιμοποιήθηκαν σε πολλές βιομηχανίες. Η τεχνολογία αυτή προσέφερε ευκολία σε επίπεδο σχεδιασμού και τροποποίησης, χωρίς ωστόσο να προσφέρει τη διαδραστικότητα μεταξύ των σχεδίων και τη δυνατότητα κάθε τροποποίηση σε ένα σχέδιο να ανανεώνει αυτόματα και τα σχετιζόμενα σε αυτό σχέδια. Ο όρος «κτιριακό μοντέλο» με τη σημασία που αποδίδεται και σήμερα στον όρο χρησιμοποιήθηκε αρχικά από κείμενα στα μέσα του 1980. Χρησιμοποιήθηκε σε κείμενα που αναφέρονταν στο λογισμικό που εφαρμόζοταν για τη λειτουργία του αεροδρομίου του Heathrow, του Simon Ruffle το 1985, του Robert Aish το 1986, καθώς και της εταιρείας GMW Computer Ltd, η οποία ανέπτυξε το λογισμικό RUCAPS. Ο όρος «Μοντέλο κτιριακής πληροφορίας», εμφανίστηκε για πρώτη φορά το 1992 σε κείμενο του G.A van Nederveen and F. P. Tolman.

Παρολ' αυτά, ο όρος "Building Information Model" (BIM) έγινε ευρέως γνωστός αργότερα όταν η εταιρεία Autodesk έθεσε σε κυκλοφορία το λογισμικό με όνομα «Μοντελοποίηση Κτιριακής Πληροφορίας». Με την εφαρμογή της τεχνολογίας BIM από τις εταιρείες Autodesk, Graphisoft και Bentley Systems, καθώς και άλλων συμμετεχόντων στην αγορά, ο Jerry Laiserin έδωσε δημοσιότητα στον όρο αναφερόμενος στην «αναπαράσταση της κατασκευαστικής διαδικασίας για την διευκόλυνση της ανταλλαγής και διαλειτουργικότητας των πληροφοριών σε ψηφιακή μορφή». Η διευκόλυνση της ανταλλαγής πληροφοριών σε ψηφιακή μορφή και της διαλειτουργικότητας, είχε διαδοθεί προγενέστερα υπό διαφορετικό τίτλο από την εταιρεία Graphisoft με τον χαρακτηρισμό «Εικονική κατασκευή», και από την εταιρεία Bentley Systems με τον χαρακτηρισμό «Ενσωματωμένα στο έργο μοντέλα» και τελικά από την Autodesk υπό τον χαρακτηριστικό τίτλο «Μοντελοποίηση κτιριακής πληροφορίας».

Έκτοτε, το λογισμικό του BIM εισάχθηκε στην κατασκευαστική βιομηχανία σαν ένα μέσο ώστε να βελτιωθεί η αποτελεσματικότητα, να μειωθούν τα κόστη και προκειμένου να λειτουργήσει σαν ένα συνολικό βοήθημα διαχείρισης κατά τη διάρκεια όλων των φάσεων της κατασκευής.

4.3 ΟΦΕΛΗ ΠΟΥ ΑΠΟΡΡΕΟΥΝ ΑΠΟ ΤΟ BIM

Η χρήση του BIM καλύπτει όλο τον κύκλο ζωής ενός τεχνικού έργου από τη σύλληψη της αρχικής ιδέας και του πλάνου σχετικά με το έργο έως και την ολοκλήρωση της κατασκευής, προσφέροντας πληθώρα πλεονεκτημάτων στον προγραμματισμό και τη διαχείριση του. Πιο συγκεκριμένα τα πλεονεκτήματά του είναι τα εξής:

- **Αύξηση παραγωγικότητας**

Το BIM αποτελεί μια ενιαία βάση δεδομένων στην οποία συγκεντρώνεται όλη η διαθέσιμη πληροφορία για κάθε στάδιο του έργου και έχουν πρόσβαση όλοι οι άμεσα και έμμεσα εμπλεκόμενοι. Οποιαδήποτε τροποποίηση γίνει είναι άμεσα αντιμετωπίσιμη καθώς το μοντέλο ενημερώνεται αυτόματα και οι τροποποιήσεις γίνονται σε όλα τα επιμέρους σχέδια που περιλαμβάνει. Συνεπώς, αποφεύγονται άμεσα τυχόν λάθη και δεν απαιτείται επιπλέον χρόνος ώστε να γίνουν χειροκίνητα οι απαιτούμενες αλλαγές.

- **Σχεδιαστικά και Τεχνικά Οφέλη**

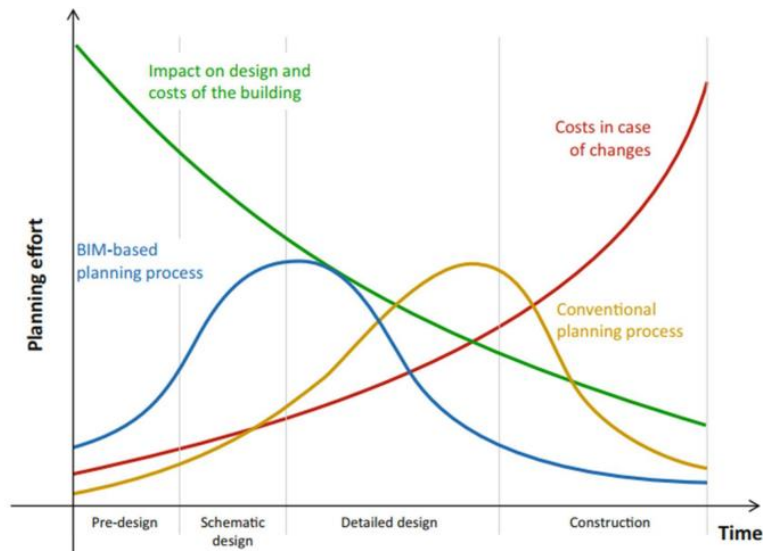
Το BIM διαφέρει από τα προγράμματα CAD λόγω του ότι ενσωματώνει πληροφορίες που ποικίλουν από γεωμετρικά χαρακτηριστικά, χωρική πληροφορία, ανάλυση φωτός, γεωγραφικές πληροφορίες, ποσότητες, κόστη, επιχρίσματα, βαθμολογία πυροπροστασίας και πολλά ακόμα. Αποτελεί συνεπώς μια ψηφιακή αναπαράσταση φυσικών και λειτουργικών χαρακτηριστικών του έργου. Ως αναφορά το σχεδιασμό επιτρέπει τη γρηγορότερη και ακριβέστερη οπτικοποίηση του σχεδίου. Δημιουργούνται εξ αρχής τα 3D μοντέλα με τρισδιάστατο σχεδιασμό και όχι από σύνθεση πολλών δισδιάστατων σχεδίων, ενώ ταυτόχρονα σε οποιαδήποτε φάση της σχεδιαστικής διαδικασίας μπορεί να γίνει εξαγωγή τόσο 3D σχεδίων όσο και 2D οποιασδήποτε άποψης του τρισδιάστατου σχεδίου με απόλυτη ακρίβεια. Παράλληλα τα σχέδια αυτά εμπεριέχουν όλες τις απαραίτητες διαστασιολογικές πληροφορίες. Συνεπώς, είναι εφικτός σε κάθε φάση σχεδιασμού ο ποσοτικός καθορισμός επιφανειών και αντικειμένων, με σκοπό τη χρήση τους για την εκτίμηση του κόστους και τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης της κατασκευής από πολύ αρχικά στάδια.

- **Οφέλη στον προγραμματισμό**

Μέσω της σύνδεσης του BIM μοντέλου με κατάλληλο εργαλείο χρονικού προγραμματισμού είναι δυνατή η προσομοίωση της κατασκευαστικής διαδικασίας σε συνάρτηση με το χρόνο, ώστε να διαχωριστεί σε φάσεις και να συντονιστούν και να προγραμματιστούν οι εργασίες που πρέπει να γίνουν. Επίσης, γίνεται καλύτερος προγραμματισμός των προμηθειών, αφού σε κάθε φάση του σχεδιασμού οι ποσότητες των υλικών που απαιτούνται υπολογίζονται αυτόματα και μπορούν να παραγγελθούν και να μεταφερθούν ακριβώς στην ώρα τους αυξάνοντας έτσι την αποδοτικότητα των εργασιών. Αυτό είναι πολύ χρήσιμο και για τους άμεσα υπεύθυνους για την εκτέλεση και τη συντήρηση του έργου.

- **Μείωση κόστους**

Οι πιθανές συγκρούσεις μεταξύ των μοντέλων των διαφορετικών ομάδων εντοπίζονται και αντιμετωπίζονται πριν την κατασκευή όπου το χρονικό και οικονομικό κόστος είναι πολύ μεγαλύτερο. Επιπλέον, η δυνατότητα προγραμματισμού και ακριβέστερης πρόβλεψης των αποτελεσμάτων ήδη από πολύ αρχικά στάδια μειώνει σημαντικά τα απόβλητα και την πιθανότητα αποτυχίας του χρονοδιαγράμματος και δίνει καλύτερη εικόνα του συνολικού προϋπολογισμού της κατασκευής. Χαρακτηριστικά συνηθισμένες υπερβάσεις κόστους κατά 15-30% και τυπικά περιθώρια κινδύνου 20% ή περισσότερο, απεικονίζουν τα αναμενόμενα απόβλητα που προκαλούνται από τις παραδοσιακές κατασκευαστικές διαδικασίες. Αντίθετα, οι επαναλαμβανόμενες διαδικασίες παραγωγής, αποφέρουν συνήθως μόνο 2-3% απόβλητα.



Εικόνα 4.2: Μοντελοποίηση Κτιριακής Πληροφορίας στον κατασκευαστικό τομέα

- **Συνεργασία και Αλληλεπίδραση Εμπλεκόμενων**

Παρ' όλα τα διαδικαστικά πλεονεκτήματα που βγαίνουν μέσα από την προηγμένη τεχνολογία και τις αποδοτικότερες λειτουργίες, η πραγματική αξία του BIM βρίσκεται στην «υπεραξία» θα λέγαμε που προδίδει. Η υπεραξία αυτή αναφέρεται σε όλες εκείνες τις δυνατότητες συνέργειας και σχέσης τόσο μεταξύ των εμπλεκόμενων επαγγελματιών, όσο και μεταξύ επαγγελματία – πελάτη. (Εικόνα 4.3) Η υπεραξία αυτή φαίνεται σε κάθε στάδιο. Το BIM αποτελεί ουσιαστικά μια πλατφόρμα διεπιστημονικής συνεργασίας και επικοινωνίας που επιτρέπει στον χρήστη – πελάτη και στους εμπλεκόμενους επαγγελματίες να συμμετέχουν ενεργά στη μελέτη και το σχεδιασμό του έργου από πολύ νωρίς. Οι ενδιαφερόμενοι μπορούν να παρακολουθούν την πορεία του κόστους, να εξετάσουν σχεδιαστικές στρατηγικές – επιλογές και να εκτιμήσουν την ενεργειακή απόδοση, πολύ γρήγορα και από τα πρώτα στάδια της μελέτης. Με την εφαρμογή της πρακτικής BIM διευκολύνονται γενικά διαδικασίες και αναλύσεις που έως τώρα ήταν πολύ περίπλοκες, χρονοβόρες και ακριβές κατά την πραγματοποίησή τους.



Εικόνα 4.3: Διάγραμμα απεικόνισης της συνεργασίας των εμπλεκόμενων στην υλοποίηση ενός έργου μέσω της μεθοδολογίας BIM

4.4 ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ BIM

Παρά τα ποικίλα πλεονεκτήματα που προσφέρει η μέθοδος BIM στον κατασκευαστικό τομέα, παράλληλα ως καινοτόμα τεχνολογία αντιμετωπίζει και πολλούς διαταγμούς και προβληματισμούς από τους άμεσα και έμμεσα εμπλεκόμενους και η διάδοση του δε γίνεται με τον αναμενόμενο ρυθμό.

Καταρχάς, οι παραδοσιακές τακτικές διαχείρισης των έργων έχουν υπάρξει αποκρυσταλλωμένες για αρκετές δεκαετίες. Για να επιτευχθεί αποτελεσματική εφαρμογή του BIM απαιτούνται ριζικές αλλαγές στις πρακτικές εργασίας, στις δεξιότητες του προσωπικού και στις σχέσεις με τους πελάτες και λοιπούς συμμετέχοντες, καθώς και στις συμβατικές απαιτήσεις. Η ανάγκη αυτή δυσχεραίνεται από το γεγονός ότι οι ομάδες έργων αποτελούνται από μέλη με διαφορετικό επίπεδο γνώσης και κατανόησης της νέας τεχνολογίας. Για να εργάζονται όλοι οι συμμετέχοντες στο ίδιο μοντέλο και να υπάρχει σωστή συνεργασία απαιτείται κατανάλωση χρόνου και χρήματων για την επαρκή κατάρτιση, πράγμα ιδιαίτερα δύσκολο ιδιαίτερα σε μικρές αγορές που δεν υπάρχει μεγάλο απόθεμα χρημάτων. Ταυτόχρονα σημαντικό ρόλο παίζει και η μη ενιαία αποδοχή των καινοτομιών από το σύνολο του κατασκευαστικού κλάδου.

Συνεπώς, συνήθως οδηγούμαστε σε μερική εφαρμογή του BIM που οδηγεί σε ασυμβατότητες και προβλήματα στη μεταφορά όλης της πληροφορίας. Η πληροφορία που χάθηκε πρέπει να συμπληρωθεί, πράγμα που απαιτεί επιπλέον χρόνο και ταυτόχρονα περιλαμβάνει την πιθανότητα να γίνουν λάθη και να υπάρξουν ανακρίβειες. Ένας επιπλέον λόγος είναι η αντιμετώπιση της μεθόδου ως αναξιόπιστη και ο φόβος για τυχόν ανακρίβειών και ατελών πληροφοριών.

Τέλος το μεγάλο κόστος για την εφαρμογή της τεχνολογίας BIM αποτελεί σημαντικό τροχοπέδη, αφού τόσο οι εταιρείες δεν είναι θετικές στη διάθεση χρημάτων για την απόκτηση, την αναβάθμιση του εξοπλισμού και την εκπαίδευση των εργαζομένων, όσο και οι πελάτες δείχνουν αδιαφορία και απροθυμία να πληρώσουν για αυτήν την παροχή.

4.5 BIM ΚΑΙ ΑΕΙΦΟΡΟΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗ

Οι περισσότερες βιώσιμες στρατηγικές που μπορούν να ενσωματωθούν στα κτήρια κατά το σχεδιασμό των κατασκευών λειτουργούν μεταξύ τους σωρευτικά και αλληλένδετα. Υλοποιώντας πολλές και διαφορετικές βιώσιμες στρατηγικές συνδυαστικά μεταξύ τους, τα οφέλη αυξάνονται εκθετικά σε αντίθεση απ' ότι αν υλοποιηθούν κάποιες στρατηγικές μεμονωμένα. Με τις παραδοσιακές πρακτικές, απαιτείται τεράστια ανθρώπινη προσπάθεια για να αναλυθεί ένα κτίριο ενεργειακά και να εξαχθούν κάποια σχετικά συμπεράσματα για την ενεργειακή συμπεριφορά και να γίνει μια εκτίμηση της απόδοσης του κτιρίου. Συνεπώς συνήθως η όλη διαδικασία γίνεται χρονοβόρα, ακριβή και δεν περιλαμβάνει όλες τις απαραίτητες πληροφορίες για μια ολιστική ανάλυση. Παράλληλα, με τις συμβατικές μεθόδους αυτό είναι εφικτό μόνο μετά την ολοκλήρωση της μελέτης, όπου οι επιλογές βελτίωσης της ενεργειακής απόδοσης είναι πλέον περιορισμένες.

Σε αυτό το περιορισμό είναι που έρχεται και δίνει λύση το BIM με τις τεχνολογίες προσομοίωσης και αναλύσεων που ενσωματώνει, στις οποίες μπορεί να υποβάλει τα μοντέλα. Η πιο κρίσιμη στιγμή για την επιλογή των βιώσιμων στρατηγικών που θα ακολουθηθούν για ένα κτήριο είναι τα στάδια του σχεδιασμού του σε περιβάλλον Η/Υ. Το BIM, έχοντας τη δυνατότητα ενσωμάτωσης πολύ-επιστημονικών πληροφοριών σε ένα μοντέλο, δίνει στους διαφορετικούς κλάδους του σχεδιασμού, την ευκαιρία συνεργασίας και

συνδυασμού στην ενσωμάτωση των βιώσιμων στρατηγικών στο κάθε τομέα, καθ' όλη τη διάρκεια της σχεδιαστικής φάσης. Μέσω του BIM οι σχεδιαστές έχουν τη δυνατότητα να υλοποιήσουν όσες επαναλήψεις χρειάζονται σε πολύ λίγο χρόνο μέσω προσομοιώσεων και αναλύσεων τους στο τρισδιάστατο μοντέλο, ώστε να καταλήξουν στους αποδοτικότερους συνδυασμούς στρατηγικών για κάθε περίπτωση κατασκευής

Επεκτείνοντας την χρήση του BIM σε αναλύσεις, δίνεται η δυνατότητα έρευνας στρατηγικών για εξοικονόμηση πόρων (π.χ. νερό, ενέργεια, υλικά κλπ) και να επιτευχθούν οι «πράσινοι στόχοι» του έργου και να βελτιστοποιηθεί ο σχεδιασμός και τα συστήματα. Τα μοντέλα BIM μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε συνδυασμό με αναλυτικά εργαλεία για ενεργειακή μελέτη, αναλύσεις φωτός, ηλιακές μελέτες και άλλα, προσφέροντας ποσοτικοποιημένα αποτελέσματα πολύ γρήγορα και κατά τη διάρκεια της σχεδιαστικής και μελετητικής διαδικασίας, πριν ακόμα οριστικοποιηθούν τα σχέδια.

Παρόλο που οι δυνατότητες και οι εφαρμογές του BIM στον πράσινο σχεδιασμό ακόμα αναπτύσσονται ραγδαία, υπάρχουν αρκετά case studies και χρήστες οι οποίοι καταθέτουν ότι αποτελεί βασικό εργαλείο για green projects. Ο κυριότερος αντίκτυπος της εφαρμογής του BIM έχει βρεθεί στους παρακάτω τομείς:

- Ολοκληρωμένος σχεδιασμός (Integrated Design)

Προσφέροντας μια ολοκληρωμένη οπτική του κτιρίου και των συστημάτων του, δίνεται η δυνατότητα βελτιωμένης αντίληψης των σχεδιαστικών αποφάσεων, αμεσότερη επικοινωνία με τον πελάτη και τους εμπλεκόμενους επαγγελματίες και εξερεύνηση ανώτερων σχεδιαστικών εναλλακτικών για τη βελτιστοποίηση του σχεδίου (design optimization).

- Ολιστικά αποτελέσματα (Integrated outputs)

Τα αποτελέσματα των αναλύσεων για την απόδοση του κτιρίου και των συστημάτων του, ενημερώνονται άμεσα από τις σχεδιαστικές αλλαγές δίνοντας τη δυνατότητα καλύτερης λήψης αποφάσεων.

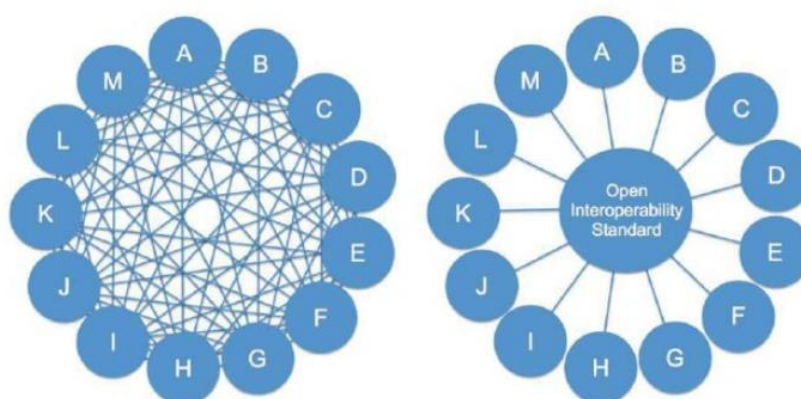
Γενικότερα έχουν παρατηρηθεί και σημαντικά οφέλη της χρήσης του BIM και σε μικρής κλίμακας έργα όπως ανακαινίσεις και πράσινες αναπλάσεις. Επίσης είναι δυνατή η εφαρμογή του για διεξαγωγή μετρήσεων ενεργειακής απόδοσης σε πραγματικό χρόνο (performance monitoring) που θα αποτελούσε πολύ χρήσιμη σύγκριση με τις εκτιμήσεις κατά τη μελετητική διαδικασία.

4.6 ΔΙΑΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΟΤΗΤΑ

Ο κεντρικός πυρήνας του BIM δεν είναι η γεωμετρία αλλά οι πληροφορίες που συνδέονται με αυτό. Επομένως, για να θεωρηθεί επιτυχημένη η χρήση της τεχνολογίας BIM πρέπει οι χρήστες του να μπορούν να έρθουν ανεμπόδιστα σε επαφή με τις πληροφορίες. Η διαλειτουργικότητα ορίζεται ως η ικανότητα των συστημάτων ηλεκτρονικών υπολογιστών να ανταλλάσσουν και να χρησιμοποιούν πληροφορίες με άλλα συστήματα ηλεκτρονικών υπολογιστών χωρίς περιορισμούς και χωρίς απώλεια δεδομένων. Στο πλαίσιο του BIM, η διαλειτουργικότητα μπορεί να υποστηριχθεί με χρήση πληροφοριών οι οποίες έχουν τέτοια μορφή ώστε να είναι αναγνώσιμες από μηχανές, με σκοπό να διευκολύνουν την επικοινωνία και τη συνεργασία. Είναι βασική προϋπόθεση να επιτρέπεται και να διευκολύνεται η συνεργασία μεταξύ επαγγελματιών από διαφορετικούς τομείς στον κατασκευαστικό κλάδο. Χωρίς πλήρη διαλειτουργικότητα δεν μπορεί να αναμένεται κανένα όφελος ούτε για την αποδοτικότητα ούτε για την αποτελεσματικότητα της συνεργασίας, καθώς αυξάνεται η πιθανότητα για λάθη και ασυμβατότητες που είτε δε μπορούν να διορθωθούν αν έχει ήδη ληφθεί απόφαση, είτε αποτελεί μια χρονοβόρα διαδικασία.

Εκτός από την ικανότητα ανταλλαγής πληροφοριών μεταξύ δύο ή περισσότερων συστημάτων πληροφορικής, η σημασιολογική διαλειτουργικότητα είναι η δυνατότητα αυτόματης ερμηνείας των πληροφοριών που ανταλλάσσονται με νόημα και ακρίβεια, ώστε να παράγονται χρήσιμα αποτελέσματα από τους τελικούς χρήστες και των δύο συστημάτων. Για να επιτευχθεί σημασιολογική διαλειτουργικότητα, και οι δύο πλευρές πρέπει να αναφέρονται σε ένα κοινό μοντέλο αναφοράς ανταλλαγής πληροφοριών.

Ωστόσο, ένα εμπόδιο που συναντάται σήμερα και δεν επιτρέπει την ανάπτυξη της διαλειτουργικότητας είναι η ελλιπής διαλειτουργικότητα. Αυτή μπορεί να δημιουργήσει προβλήματα και απώλεια δεδομένων κατά τη διάρκεια των διαδικασιών ανταλλαγής. Για να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα αυτό είναι επιτακτική η ανάγκη για υιοθέτηση ανοικτών προτύπων που θα παρέχουν στρατηγικές συνεργασίας μεταξύ των εμπλεκόμενων σε κάθε έργο.(Εικόνα 4.4)



Εικόνα 4.4: Συμβολή ανοικτών προτύπων στην ανεμπόδιση ανάπτυξη της διαλειτουργικότητας

4.7 ΤΟ ΠΡΟΤΥΠΟ IFC (Industry Foundation Classes)

Το 1995 η εταιρεία Autodesk στην προσπάθεια της να προωθήσει τη διαλειτουργικότητα στην κατασκευαστική βιομηχανία οργάνωσε μία συμμαχία δώδεκα εταιρειών, η οποία ονομάστηκε αρχικά Διεθνή Συμμαχία Διαλειτουργικότητας (International Alliance for Interoperability - IAI) και ύστερα το Γενάρη του 2008 μετονομάστηκε σε BuildingSMART. Κοινό όραμα των εταιρειών ήταν να επιτευχθεί μια εύκολη συνεργασία μεταξύ των χρηστών της κατασκευαστικής βιομηχανίας, μέσω της ανάπτυξης συγκεκριμένων προτύπων που θα βοηθούν στην ανταλλαγή πληροφορίας.

Τότε, διαμορφώθηκε το σημαντικότερο ίσως πρότυπο για την ανταλλαγή δεδομένων και διαμοιρασμού ψηφιακής πληροφορίας μεταξύ των BIM μοντέλων στους τομείς της Αρχιτεκτονικής, της Μηχανικής και των Κατασκευών, το Industry Foundation Classes (IFC). Είναι δομημένο με βάση το καθιερωμένο πρότυπο ISO 16739-1:2018 που αφορά τον

διαμοιρασμό των πληροφοριών στον κατασκευαστικό κλάδο και στη διαχείριση εγκαταστάσεων και από τότε γίνονται συνεχείς αναβαθμίσεις για να συμβαδίζει με τις ανάγκες που προκύπτουν με την εξέλιξη της τεχνολογίας.

Το πρότυπο IFC είναι ένα ανοιχτό BIM μοντέλο δεδομένων καλύπτει την απαιτούμενη μορφή και τη δομή που συνδυάζει γεωμετρικά και σημασιολογικά χαρακτηριστικά που περιγράφουν όλη τη διάρκεια ζωής των κτιρίων. Τα δεδομένα αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν, να αναλυθούν και να επεξεργαστούν με διαφορετικούς τρόπους σε διαφορετικά λογισμικά. Επιτρέπουν επίσης την απρόσκοπτη ανταλλαγή ψηφιακών δεδομένων μεταξύ των συμμετεχόντων καθ' όλο τον κύκλο ζωής του έργου καθώς και στη διαχείριση του από τους χρήστες. Αναπτύχθηκε από την BuildingSMART και αποτελεί μια κοινή βάση που επιτρέπει στους χρήστες όλα τα ανωτέρω.

Για να γίνει εύκολα κατανοητή η λειτουργία του IFC θα πρέπει κανείς να αναλογιστεί ότι υπάρχει ένα αρχικό ψηφιακό μοντέλο κτιρίου δημιουργημένο από κάποιον αρχιτέκτονα με ένα συγκεκριμένο λογισμικό. Αυτό το μοντέλο θα μοιραστεί στις επιμέρους μελετητικές ομάδες των διαφόρων ειδικοτήτων (πχ. στατικού, μηχανολόγους κλπ) ώστε να εκπονήσουν τις δικές τους μελέτες, με τα δικά τους εξειδικευμένα λογισμικά διαφορετικά από αυτό του αρχικού μοντέλου. Για να μπορέσουν να χρησιμοποιήσουν το αρχικό μοντέλο σαν υπόβαθρο τροποποιούνται και εξάγονται όλες οι πληροφορίες σε μορφή IFC ώστε να μπορούν διαβαστούν από το εκάστοτε λογισμικό της κάθε ειδικότητας. Τα αρχεία IFC δεν είναι επεξεργάσιμα απλά μεταφέρουν πληροφορίες και διευκολύνουν την χρήση μεταξύ διαφορετικών λογισμικών. Έτσι όλες οι επιμέρους μελέτες εξάγονται σε IFC και συναρμόζονται στο αρχικό ψηφιακό μοντέλο για να γίνει η σύνθεση του τελικού. Σε αυτό το σημείο είναι που μπορεί να γίνει και ο αυτόματος εντοπισμός προβλημάτων συμβατότητας μεταξύ των επιμέρους μελετών.

Συγκεκριμένα, το IFC είναι ένα τυποποιημένο μοντέλο δεδομένων που κωδικοποιεί, με λογικό και αναγνωρίσιμο τρόπο:

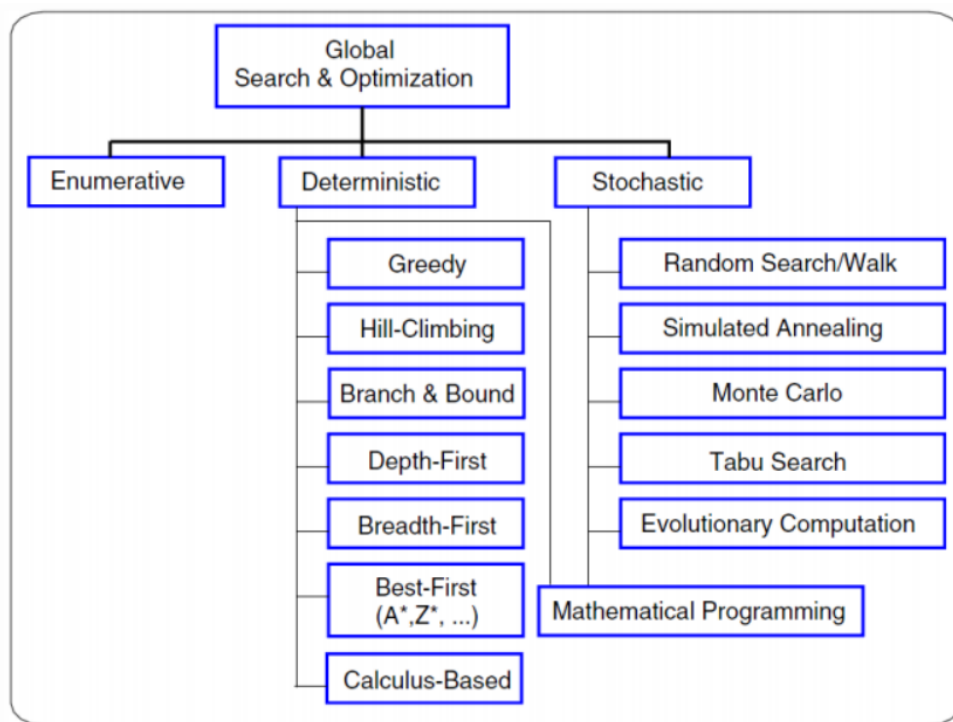
- Την ταυτότητα και τη σημασιολογία των αντικειμένων (όνομα, αναγνώσιμο μοναδικό αναγνωριστικό, τύπο αντικειμένου ή λειτουργία, κ.α.)
- Τα χαρακτηριστικά και τις ιδιότητες των αντικειμένων (όπως υλικό, χρώμα και θερμικές ιδιότητες, κ.α.)
- Τις σχέσεις των αντικειμένων (συμπεριλαμβανομένων τοποθεσιών, συνδέσεων και ιδιοκτησίας, κ.α.)
 - Τον τύπο των αντικειμένων (στήλες, πλάκες, κ.α.)
 - Αφηρημένες έννοιες (απόδοση, κοστολόγηση)
 - Διαδικασίες (εγκατάσταση, λειτουργίες, κ.α.)
 - Ανθρώπους (ιδιοκτήτες, σχεδιαστές, εργολάβοι, προμηθευτές, κ.α.)

5. ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ

5.1 ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ

Για την επίλυση προβλημάτων βελτιστοποίησης χρησιμοποιούνται αλγόριθμοι ολικής αναζήτησης (global search algorithms) ή διαφορετικά αλγόριθμοι βελτιστοποίησης (optimization algorithms). Οι αλγόριθμοι αυτοί είναι ικανοί να βρίσκουν βέλτιστές λύσεις μέσα σε μεγάλους και συνεχείς χώρους καταστάσεων, με τη χρήση ποικίλων και αυτοματοποιημένων μεθόδων οι οποίες θα εξεταστούν παρακάτω. Διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες, με βασικότερες τις δύο τελευταίες:

- αριθμητικοί αλγόριθμοι (enumerative)
- ντετερμινιστικοί αλγόριθμοι (deterministic)
- στοχαστικοί αλγόριθμοι (stochastic)

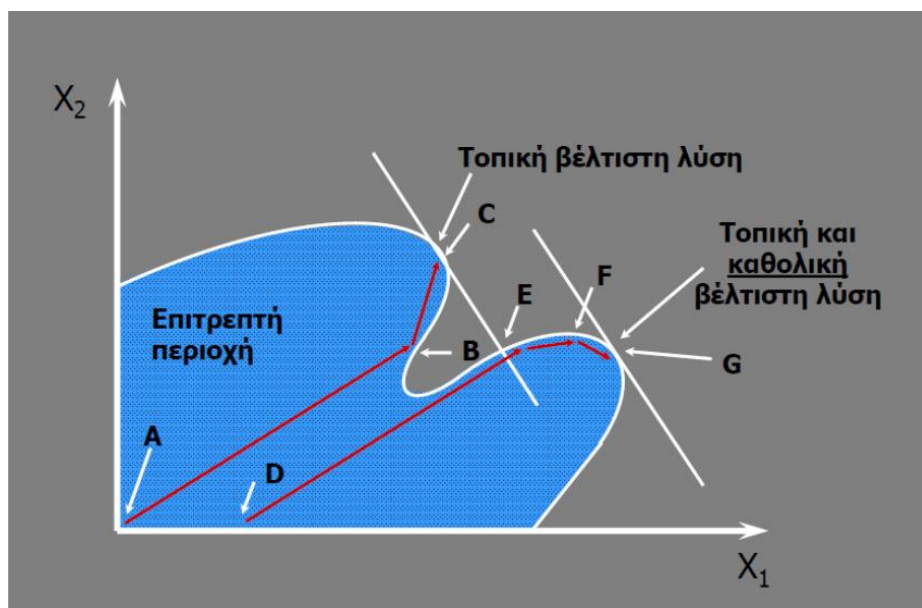


Εικόνα 5.1: Κατηγορίες αλγορίθμων αναζήτησης και βελτιστοποίησης

Οι αριθμητικοί αλγόριθμοι αν και θεωρητικά είναι ντετερμινιστικοί, διαχωρίζονται από αυτούς διότι δεν χρησιμοποιούν ευρετικές τεχνικές (heuristics). Αποτελούν την απλούστερη μεθοδολογία ανεύρεσης λύσης αφού υπολογίζουν και αξιολογούν όλες τις πιθανές λύσεις του χώρου αναζήτησης, γεγονός που μειώνει τις πιθανότητες σε σύνθετα προβλήματα, να έχουμε λύση σε αποδεκτό χρόνο.

Οι ντετερμινιστικοί αλγόριθμοι ή αλλιώς αιτιοκρατικοί, λειτουργούν αποκτώντας γνώση του πεδίου καταστάσεων και χρησιμοποιώντας την για να καθορίσουν την βέλτιστη λύση. Στους ντετερμινιστικούς αλγόριθμους ουσιαστικά δεν υφίσταται το στοιχείο της τυχαιότητας κι

αυτό πρακτικά σημαίνει ότι όταν εφαρμόζεται στο αρχικό μοντέλο το ίδιο διάνυσμα σχεδιασμού, θα πάρουμε το ίδιο τελικό αποτέλεσμα. Έτσι δημιουργείται η πιθανότητα ο αλγόριθμος να παγιδευτεί στο τοπικό ελάχιστο και να μην βρει την πραγματικά βέλτιστη λύση (Εικόνα 5.2).



Εικόνα 5.2: Εγκλωβισμός σε τοπική βέλτιστη λύση

Η στοχαστική βελτιστοποίηση σε αντίθεση με τις ντετερμινιστικές μεθόδους βελτιστοποίησης, περιλαμβάνει διαδικασίες που επιτρέπουν το στοιχείο της τυχαιότητας να εμφανιστεί. Έτσι ακόμα και με τις ίδιες αρχικές συνθήκες προκύπτουν διαφορετικά μοντέλα σχεδιασμού. Οι στοχαστικοί αλγόριθμοι, με τη χρήση συνδυαστικών μεθόδων βελτιστοποίησης βασιζόμενων σε πιθανότητες αναζητήσεις, εμφανίζουν μεγαλύτερη πιθανότητα για την εύρεση του καθολικού βέλτιστου. Οι ντετερμινιστικοί αλγόριθμοι παρουσιάζουν ένα ικανοποιητικό ρυθμό σύγκλισης χωρίς όμως βεβαιότητα για το αποτέλεσμα. Σε αντίθεση, οι τεχνικές βελτιστοποίησης της συνδυαστικής βελτιστοποίησης παρουσιάζουν μια καλύτερη καθολική συμπεριφορά σε σχέση με τις μαθηματικές μεθόδους προγραμματισμού, απλά χρειάζονται περισσότερο χρόνο για να συγκλίνουν. Το κύριο χαρακτηριστικό των συνδυαστικών μεθόδων είναι η πιο διευρυμένη εξερεύνηση πεδίου λύσεων, η οποία αυξάνει την πιθανότητα εντοπισμού και ανάδειξης του ολικού ελαχίστου. Διάσημες μέθοδοι επίλυσής, όπως οι γενετικοί αλγόριθμοι που εφευρέθηκαν από τον John Holland τη δεκαετία του '60 με σκοπό τη μελέτη των εξελικτικών μοντέλων της φύσης και την εισαγωγή τους στους ηλεκτρονικούς υπολογιστές, καθώς και οι στρατηγικές εξέλιξης (Rechenberg, 1973), μιμούνται τη 105 βιολογική εξέλιξη και συνδυάζουν τη μέθοδο της επιβίωσης του ισχυρότερου. Εκτός από την καθαρά στοχαστική ή καθαρά αιτιοκρατική διαδικασία, υβριδικά συστήματα έχουν εισαχθεί προκειμένου να συνδυαστούν τα πλεονεκτήματα των δύο μεθόδων για ένα καλύτερο αποτέλεσμα.

Οι πιο σύγχρονες μορφές αλγορίθμων εντάσσονται στις κατηγορίες των

- ευρετικών (heuristic)
- μεταευρετικών (metaeurestic)

Πολλά από τα προβλήματα βελτιστοποίησης που εμφανίζονται είναι NP-hard , προβλήματα δηλαδή για τα οποία πιστεύεται ότι δε μπορούν να βρεθούν βέλτιστες λύσεις στα πλαίσια ενός πολυωνυμικού υπολογιστικού χρονικού ορίου. Για τα προβλήματα αυτά ,χρησιμοποιούνται προσεγγιστικές μέθοδοι, οι οποίες δίνουν βέλτιστες λύσεις σε σχετικά γρήγορο χρονικό διάστημα. Οι αλγόριθμοι τέτοιου τύπου ονομάστηκαν ευρετικοί.

Τα τελευταία χρόνια οι ερευνητές επικέντρωσαν το ενδιαφέρον τους σε μια νέα κατηγορία αλγορίθμων που ονομάστηκαν μεταευρετικοί (metaeurestics). Ο όρος αυτός εισήχθη από τον Glover θέλοντας να περιγράψει “μία ανώτερη στρατηγική η οποία καθοδηγεί και τροποποιεί άλλους ευρετικούς αλγορίθμους ώστε να παράγουν λύσεις πέρα από τις λύσεις που παράγονται κατά τη διαδικασία του Αλγορίθμου Επαναληπτικής Βελτίωσης». Ένας μεταευρετικός αλγόριθμος είναι ένα σύνολο από αλγοριθμικές έννοιες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να προσδιορίσουν ευριστικές μεθόδους κατάλληλες για ένα ευρύ σύνολο από διαφορετικά προβλήματα. Η χρήση και η ανάπτυξη των αλγορίθμων αυτών έχει αυξήσει την ικανότητα εύρεσης ποιοτικών λύσεων σε δύσκολα προβλήματα μέσα σε λογικό χρόνο. Σε αντίθεση με τους ντετερμινιστικούς διαχειρίζονται ένα πλήθος από λύσεις ταυτόχρονα. Το θετικό τους είναι ότι έχουν μεγαλύτερες πιθανότητες να εντοπίσουν την περιοχή της καθολικά βέλτιστης λύσης, αφού λόγω του τυχαματικού τους χαρακτήρα δεν εγκλωβίζονται σε τοπικά ελάχιστα. Ωστόσο, απαιτούν μεγάλο πλήθος υπολογισμών της αντικειμενικής συνάρτησης.

5.2 ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Η αντιμετώπιση του προβλήματος γίνεται μεμονωμένα, βελτιστοποιώντας ορισμένες ιδιότητες του συστήματος με τη χρήση των κατάλληλων παραμέτρων. Η κλασική προσέγγιση τέτοιων προβλημάτων βασίζεται στη χρήση μίας αντικειμενικής συνάρτησης (objective function) η οποία δηλώνει τη συσχέτιση των μεταβλητών ενός προβλήματος ώστε να καθορίζουν την τιμή του τελικού μεγέθους. Όλοι οι παράμετροι σχεδιασμού και οι περιορισμοί του προβλήματος περιλαμβάνονται σε αυτή τη συνάρτηση η οποία μαθηματικά ορίζεται ως εξής:

$$Opt(\min/\max) F(x) , x \in S$$

$$Subject\ to\ g_j(x) < 0 , j = 1, 2, \dots, m$$

$$\text{και } h_i(x) = 0 , i = m + 1, m + 2, \dots, t$$

όπου,

$z(x)$ η αντικειμενική συνάρτηση (objective function)

x αποτελεί διάνυσμα των παραμέτρων σχεδιασμού με πεδίο ορισμού το S (design space)

$g(x)$ είναι η συνάρτηση περιορισμού ανισότητας

$h(x)$ είναι η συνάρτηση περιορισμού ισότητας

Επομένως για τη διατύπωση του προβλήματος (formulation) υπάρχουν τρεις βασικές συνιστώσες που πρέπει οριστούν:

1. οι μεταβλητές σχεδιασμού
2. η αντικειμενική συνάρτηση
3. οι συναρτήσεις περιορισμών

Μεταβλητές σχεδιασμού ονομάζονται οι παράμετροι, των οποίων οι τιμές πρέπει οπωσδήποτε να οριστούν ώστε να θεωρείται πλήρης ο σχεδιασμός. Η επιλογή των κατάλληλων παραμέτρων βάση των οποίων θα γίνει η βελτιστοποίηση και κατ' επέκταση η κατάλληλη διαμόρφωσή του προβλήματος είναι το σημαντικότερο βήμα για να κριθεί επιτυχημένη η διαδικασία βελτιστοποίησής. Ουσιαστικά ως μεταβλητή ορίζεται κάθε μέγεθος που υπεισέρχεται στο πρόβλημα αναφοράς.

Προκειμένου να γίνει η βελτιστοποίησή και να βρεθεί ποια τιμή σε κάθε παράμετρο προσφέρει το καλύτερο αποτέλεσμα, πρέπει με κάποιο κριτήριο να συγκρίνουμε τους συνδυασμούς των λύσεων και να καταλήξουμε στον αποδοτικότερο. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιείται η αντικειμενική συνάρτηση, την οποία εμείς οι ίδιοι ορίζουμε όταν διατυπώνουμε το πρόβλημα, περιλαμβάνει όλες τις παραμέτρους σχεδιασμού και η ελαχιστοποίηση ή η μεγιστοποίησή της αποτελεί στόχο της εκάστοτε βελτιστοποίησης. Ανάλογα με το πόσες συναρτήσεις υπάρχουν το πρόβλημα καλείται single-objective αν υπάρχει μόνο μία ή multi-objective αν υπάρχουν περισσότερες.

Ο σχεδιασμός του προβλήματος δεν θα ήταν πλήρης χωρίς τη χρήση των κατάλληλων περιορισμών που καθιστούν μια λύση εφικτή και εφαρμόσιμη ή ανέφικτη και αυτοί οι περιορισμοί εκφράζονται με τη βοήθεια συναρτήσεων (συνήθως ανισώσεων). Οι περιορισμοί αποκλείουν τιμές που θα μπορούσαν να δοθούν στις παραμέτρους και να τις καταστήσουν μη πραγματικές και αντίθετες στο ρόλο τους, για παράδειγμα το ύψος μιας πλάκας να πάρει μηδενική ή και αρνητική τιμή. Σε κάθε πρόβλημα υπάρχουν διαφορετικοί περιορισμοί πέρα από τους φυσικούς και λογικούς και προσαρμόζονται στις απαιτήσεις του προβλήματος και του χρήστη. Για τα κατασκευαστικά προβλήματα οι κύριοι περιορισμοί καθορίζονται από κανονιστικές διατάξεις και την κρίση του μηχανικού

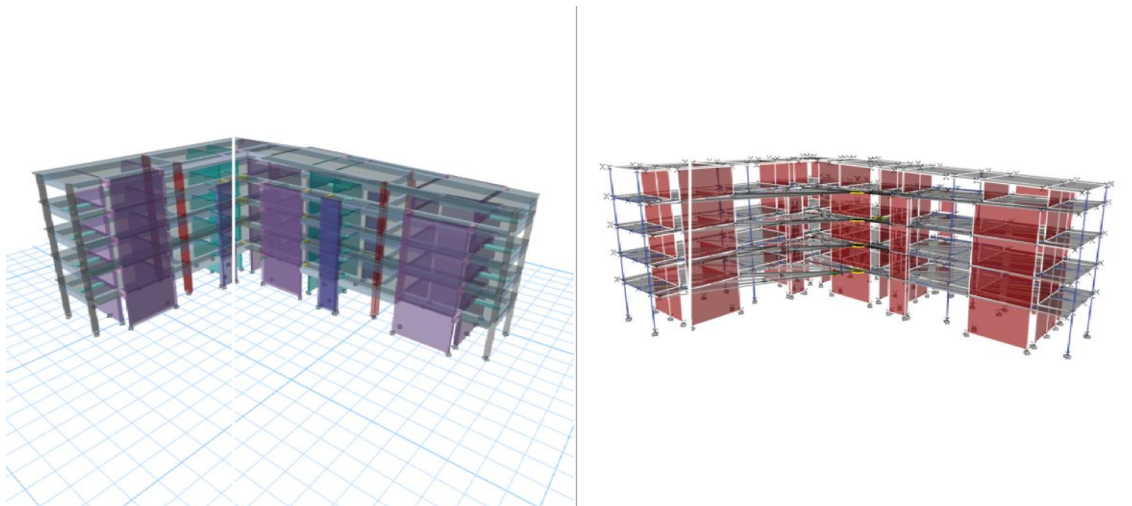
6. ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΩΝ

6.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία στοχεύει στη μελέτη του περιβαλλοντικού αποτυπώματος ενός κτιριακού μοντέλου. Συγκεκριμένα επιδιώκεται να διερευνηθεί το πώς η βελτιστοποίηση του δομικού σχεδιασμού του φορέα θα επηρεάσει το ενεργειακό αντίκτυπο του κτιρίου στη διάρκεια του κύκλου ζωής του καθώς και να παρουσιαστεί η σπουδαιότητα της τεχνολογίας BIM, αφού μέσω αυτής μπορούμε να προσθέσουμε στο κτιριακό μοντέλο πλήθος πληροφοριών που βοηθούν στην ενεργειακή αποτίμηση.

Συνεπώς, αρχικά, πραγματοποιείται βελτιστοποίηση του δομικού σχεδιασμού με το πρόγραμμα OCP. Στη συνέχεια, το μοντέλο εισάγεται στο πρόγραμμα Revit Architecture, ώστε να γίνει επιπλέον μοντελοποίηση του, όπως προσθήκη υλικών, και προμέτρηση της ποσότητας των υλικών της κατασκευής. Οι ποσότητες αναλύονται τόσο με τις μεθόδους που παρουσιάστηκαν στο θεωρητικό υπόβαθρο όσο και με το εργαλείο The Structural Carbon Tool και εξάγουμε αποτελέσματα σχετικά με την εκπεμπόμενη ενέργεια και διοξείδιο του άνθρακα στην ατμόσφαιρα, κυρίως στη φάση κατασκευής του κτιρίου.

6.2 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΚΤΙΡΙΑΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΜΕΛΕΤΗΣ

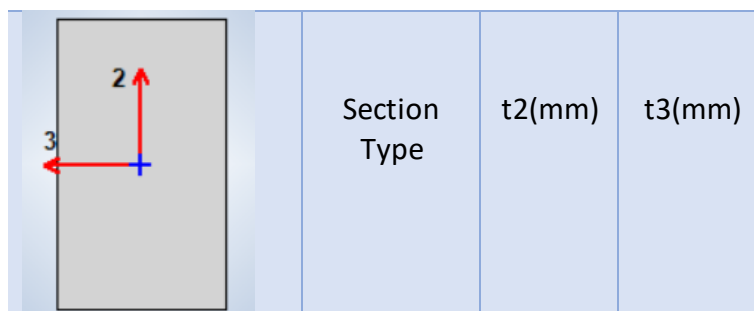


Εικόνα 6.1: Τρισδιάστατη παρουσίαση κτιριακού μοντέλου στο πρόγραμμα Etabs

Πρόκειται για κτίριο με χρήση γραφείων συνολικού εμβαδού 3792m^2 και ύψους 18 μέτρων που αποτελείται από ισόγειο και τέσσερις ορόφους ύψους 4.50m και 3.40m αντίστοιχα. Η στατική του επίλυση έχει γίνει στο στατικό πρόγραμμα Etabs και ακολουθεί τις διατάξεις του Ευρωκώδικα 2. Τα δομικά του στοιχεία έχουν υπολογιστεί για ποιότητα σκυροδέματος C35/45, C30/37 και χάλυβα B500C. Σύμφωνα με την προσομοίωση του μοντέλου στο λογισμικό ο φέρων οργανισμός αποτελείται από έντεκα κατηγορίες δοκών και δύο κατηγορίες υποστυλωμάτων. Όλες οι διατομές των στοιχείων του κτιρίου που εξετάζεται είναι

ορθογωνικές και οι διαστάσεις καθεμιάς παρουσιάζονται αναλυτικά στους πίνακες 6-1 και 6-2 που ακολουθούν. Όπου t2 είναι το πλάτος (width) και t3 το βάθος (depths) όπως ορίζονται και από το πρόγραμμα Etabs.

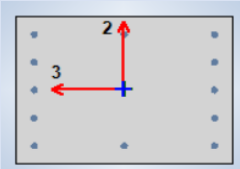
Δοκοί



B2560	rectangular	350	800
B3050	rectangular	400	700
B3550	rectangular	500	700
B3560	rectangular	500	800
HB6020	rectangular	800	300

Πίνακας 6-1: Διατομές δοκών αρχικού φορέα

Υποστυλώματα

	Section Type	t2	t3
---	--------------	----	----

COL3550	rectangular	700	500
COL3590	rectangular	1200	500

Πίνακας 6-2: Διατομές υποστυλωμάτων αρχικού φορέα

6.3 ΒΕΛΤΙΣΟΠΟΙΗΣΗ ΔΟΜΙΚΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

6.3.1 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ OCP

Για τη διαδικασία της βελτιστοποίησης χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα OCP (Optimization Computing Platform), το οποίο αναπτύχθηκε στον Τομέα Δομοστατικής και Αντισεισμικών Ερευνών από τον κ. Λαγαρό (Lagaros, 2014) και υποστηρίχθηκε ως προϊόν από την εταιρεία ACE Hellas. Η πλατφόρμα OCP είναι ικανή να επιλύει δομικά προβλήματα βελτιστοποίησης και να εντοπίζει τον καθολικά βέλτιστο σχεδιασμό. Χρησιμοποιώντας υπολογιστικές μεθόδους επόμενης γενιάς (μεταεριστικούς αλγόριθμους, σταδιακή δυναμική ανάλυση και παράλληλο προγραμματισμό) μπορεί και διαχειρίζεται μεγάλο πλήθος λύσεων ταυτόχρονα. Ο κύριος στόχος της είναι να αποτελέσει ένα εργαλείο πληροφορικής για τη μελέτη κατασκευών με ασφαλή και οικονομικό γνώμονα μέσα σε ένα πλαίσιο αξιόπιστο τεχνολογικά και οικονομικά προσιτό. Η OCP βασίζεται στις διαδικασίες σχεδιασμού του Ευρωκώδικα και λειτουργεί ως εργαλείο βελτιστοποίησης (optimization tool) σε δομικά προσομοιώματα που αναπτύσσονται στα προγράμματα ανάλυσης SAP2000, SCADAPro και Etabs.

6.3.2 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ

Η μελέτη επικεντρώνεται σε πρόβλημα βελτιστοποίησης που αφορά διαστασιολόγηση (size optimization), όπου συνήθως στόχος είναι η ελαχιστοποίηση του βάρους του φορέα υπό ορισμένους περιορισμούς ανάλογα με τους κανονισμούς που διέπουν την εκάστοτε κατασκευή.

Η διαμόρφωση του προβλήματος της βελτιστοποίησης σύμφωνα με την εξίσωση που ορίστηκε στο θεωρητικό υπόβαθρο προϋποθέτει αρχικά τον ορισμό των μεταβλητών σχεδιασμού, δηλαδή των στοιχείων που μεταβάλλουν την αντικειμενική συνάρτηση. Στο

συγκεκριμένο πρόβλημα εξαρτάται από τις διατομές δοκών και υποστυλωμάτων. Εισάγουμε λοιπόν τις τιμές του κτιριακού μοντέλου που παρουσιάστηκαν παραπάνω. Για κάθε διατομή είναι σημαντικό να ορίσουμε επίσης τα όρια αναζήτησης του βέλτιστου μεγέθους των διατομών. Συνεπώς, ορίζουμε τα όρια στα μεγέθη των διατομών (“lower bound”, “upper bound”) και η πυκνότητα αναζήτησης χρησιμοποιώντας το κατάλληλο βήμα(“step”).

```
{
  "formulate" : {
    "components" : {
      "B2560" : {
        "type" : "rectangle",
        "variables" : {
          "t2" : {
            "value" : "0.35",
            "lower_bound" : "0.1",
            "upper_bound" : "0.8",
            "step" : "0.05"
          },
          "t3" : {
            "value" : "0.8",
            "lower_bound" : "0.2",
            "upper_bound" : "1.2",
            "step" : "0.05"
          }
        }
      },
      "B3050" : {
        "type" : "rectangle",
        "variables" : {
          "t2" : {
            "value" : "0.4",
            "lower_bound" : "0.1",
            "upper_bound" : "0.8",
            "step" : "0.05"
          },
          "t3" : {
            "value" : "0.7",
            "lower_bound" : "0.2",
            "upper_bound" : "1.2",
            "step" : "0.05"
          }
        }
      }
    }
  }
}
```

Εικόνα 6.2: Εισαγωγή διατομών δοκών

```

    "B3550" : {
      "type" : "rectangle",
      "variables" : {
        "t2" : {
          "value" : "0.5",
          "lower_bound" : "0.1",
          "upper_bound" : "0.8",
          "step" : "0.05"
        },
        "t3" : {
          "value" : "0.7",
          "lower_bound" : "0.2",
          "upper_bound" : "1.2",
          "step" : "0.05"
        }
      }
    },
    "B3560" : {
      "type" : "rectangle",
      "variables" : {
        "t2" : {
          "value" : "0.5",
          "lower_bound" : "0.1",
          "upper_bound" : "0.8",
          "step" : "0.05"
        },
        "t3" : {
          "value" : "0.8",
          "lower_bound" : "0.2",
          "upper_bound" : "1.2",
          "step" : "0.05"
        }
      }
    }
  }
}

```

Εικόνα 6.3: Εισαγωγή διατομών δοκών

```

    "COL3550" : {
      "type" : "rectangle",
      "variables" : {
        "t2" : {
          "value" : "0.7",
          "lower_bound" : "0.1",
          "upper_bound" : "1",
          "step" : "0.05"
        },
        "t3" : {
          "value" : "0.5",
          "lower_bound" : "0.2",
          "upper_bound" : "0.8",
          "step" : "0.05"
        }
      }
    },
    "COL3590" : {
      "type" : "rectangle",
      "variables" : {
        "t2" : {
          "value" : "1.2",
          "lower_bound" : "1",
          "upper_bound" : "1.8",
          "step" : "0.05"
        },
        "t3" : {
          "value" : "0.5",
          "lower_bound" : "0.1",
          "upper_bound" : "0.8",
          "step" : "0.05"
        }
      }
    }
  },
}

```

Εικόνα 6.4: Εισαγωγή διατομών υποστυλωμάτων

Μετά τον ορισμό των μεταβλητών σχεδιασμού είναι απαραίτητο να οριστεί η αντικειμενική συνάρτηση. Η βελτιστοποίηση του σχεδιασμού πραγματοποιήθηκε με αντικειμενική συνάρτηση την ελαχιστοποίηση του κόστους (“material cost”). Το μέγεθος των διατομών των δομικών στοιχείων καθορίζει την ποσότητα που χρησιμοποιείται για τη μόρφωση του φορέα και κατ’ επέκταση το κόστος του υλικού. Επομένως, ο βέλτιστος σχεδιασμός επιτυγχάνεται με την ελαχιστοποίηση του μεγέθους των διατομών των δομικών στοιχείων (“size optimization”). Επίσης, γίνεται ο καθορισμός των περιορισμών, ο οποίος γίνεται με κριτήρια του μηχανικού-μελετητή και προσφέρουν περατότητα στη διαδικασία εύρεσης των βέλτιστων λύσεων. Οι περιορισμοί στο παρόν πρόβλημα βελτιστοποίησης ορίστηκαν με βάση τις κανονιστικές διατάξεις του Ευρωκώδικα 2 όπως αυτές αναπτύσσονται εντός του λογισμικού Etabs. (Εικόνα 6.5)

```

"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"
}

```

Εικόνα 6.5: Προσδιορισμός αντικειμενικής συνάρτησης, παραμέτρων και περιορισμών

Η μεθοδολογία επίλυσης και εύρεσης της βέλτιστης λύσης πραγματοποιείται με τη χρήση του αλγορίθμου PQN (Projected Quasi-Newton). (Εικόνα 6.6) 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. Τα διαφορικά όμως που απαιτούνται στον αλγόριθμο Quasi-Newton, εδώ προσεγγίζονται με πεπερασμένες διαφορές. Πρόκειται για μια απ’ τις πιο διάσημες μεθόδους μη-γραμμικής αριθμητικής βελτιστοποίησης η οποία βασίζεται στην εύρεση τοπικών ακροτάτων της αντικειμενικής συνάρτησης και στην αναζήτηση των βέλτιστων λύσεων γύρω από αυτά. Σύμφωνα με τον Νεύτωνα, η συνάρτηση, τοπικά, γύρω από το ακρότατο μπορεί να προσεγγιστεί ως δευτέρου βαθμού, απαιτώντας κατά την υπολογιστική διαδικασία μόνο την εύρεση πρώτων και δευτέρων παραγώγων. Η Quasi Newton εξέλιξε τη μέθοδο, παραμερίζοντας τον υπολογισμό των δευτέρων παραγώγων, απλοποιώντας ακόμα περισσότερο τη διαδικασία εύρεσης βέλτιστης λύσης.

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.

Εν ολίγοις, η Implicit filtering επεκτείνει την μέθοδο αναζήτησης συντεταγμένων, την απλούστερη δυνατή προσέγγιση στη βελτιστοποίηση, 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.

Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα των αλγορίθμων που χρησιμοποιούν τη μέθοδο PQN είναι η μείωση του υπολογιστικού κόστους σε περιπτώσεις όπου η χρήση άλλων μαθηματικών μεθόδων απαιτούν μεγάλο υπολογιστικό κόστος προκειμένου να δημιουργήσουν τις παραγώγους της αντικειμενικής συνάρτησης. Ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης εφαρμόζει μια επαναληπτική υπολογιστική διαδικασία, με αποτέλεσμα ο χρόνος εύρεσης της βέλτιστης να αυξάνεται σημαντικά. Ένα κτίριο διαθέτει χιλιάδες βαθμούς ελευθερίας και απαιτεί αρκετό χρόνο ανάλυσης ακόμα και στο περιβάλλον ενός λογισμικού προσομοίωσης. Επομένως, η μείωση του υπολογιστικού κόστους είναι ένα κρίσιμο ζήτημα για τη βελτιστοποίηση των κατασκευών.

```
"algorithms" : {
  "projected_quasi_newton" : {
    "type" : "unconstrained",
    "algorithm_params" : {
      "max_num_iter" : "20",
      "max_fun_eval" : "1000",
      "max_cuts" : "5",
      "tolerance" : "1"
    }
  }
}
```

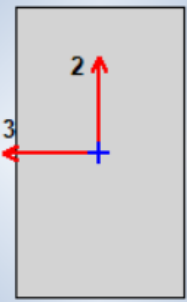
Εικόνα 6.6: Επίλυση με τον αλγόριθμο PQN

Η πλατφόρμα "OCP" σχεδιάστηκε για να προσαρμόζει τη μέθοδο της βελτιστοποίησης σε δομικά προσομοιώματα που αναπτύσσονται στο λογισμικό "ETABS" και λειτουργεί εντός του περιβάλλοντός του ως εργαλείο βελτιστοποίησης. Αφού δημιουργήθηκε το προσομοίωμα

στο λογισμικό , εφαρμόστηκε η βελτιστοποίηση σε κάθε μοντέλο με χρήση του αλγορίθμου PQN ορίζοντας ως αντικειμενική συνάρτηση το κόστος του υλικού και προσδιορίζοντας το βήμα αναζήτησης, τα άνω και τα κάτω όρια του μεγέθους των διατομών, εντός των οποίων θα εντοπιστεί η βέλτιστη λύση. Έτσι προέκυψε ο βέλτιστος σχεδιασμός των διατομών των δομικών μας στοιχείων προκειμένου να έχουμε το ελάχιστο δυνατό κόστος υλικών χωρίς να παραβιάζονται οι περιορισμοί μας οι οποίοι περιγράφονται παραπάνω.

Όσον αφορά την αντικειμενική συνάρτηση η αρχική της τιμή ήταν 35774.43€ και τελικά προέκυψε 10974.77€ συνεπώς σημειώθηκε βελτίωση του αρχικού σχεδιασμού σε ποσοστό 69,32%. Επίσης, ο βέλτιστος σχεδιασμός έδωσε τις διαστάσεις που παρουσιάζονται στους πίνακες 6-3 και 6-4. Παρατηρούμε ότι μετά τη βελτιστοποίηση με βάση το κόστος των υλικών οι διατομές των δοκών και των υποστυλωμάτων μειώθηκαν. Τα τοιχεία και οι πλάκες δεν υπέστησαν αλλαγές.

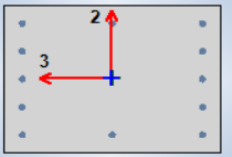
Δοκοί

	Section Type	t2(mm)	t3(mm)
--	--------------	--------	--------

B2560	rectangular	300	700
B3050	rectangular	300	650
B3550	rectangular	198	550
B3560	rectangular	212	457
HB6020	rectangular	550	250

Πίνακας 6-3: Διατομές δοκών βελτιστοποιημένου φορέα

Υποστυλώματα

	Section Type	t2(mm)	t3(mm)
---	--------------	--------	--------

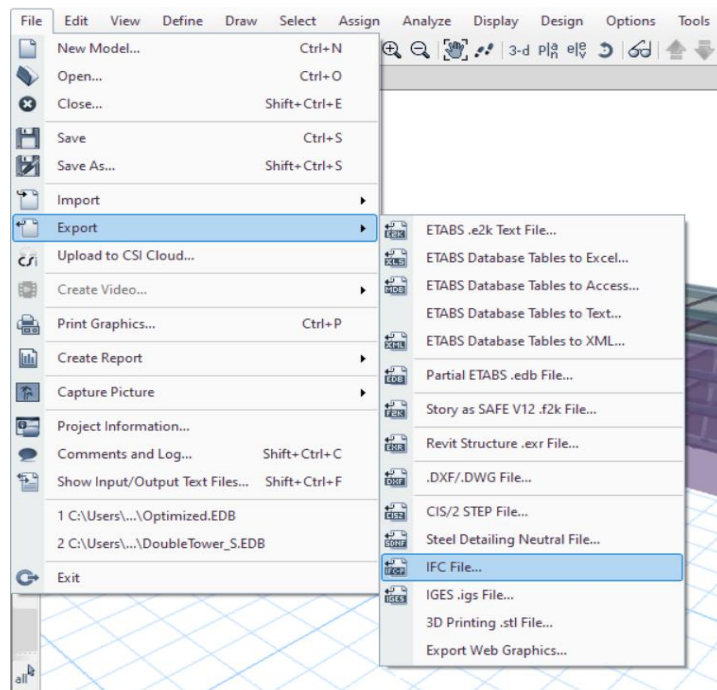
COL3550	rectangular	325	400
COL3590	rectangular	1000	300

Πίνακας 6-4: Διατομές υποστυλωμάτων βελτιστοποιημένου φορέα

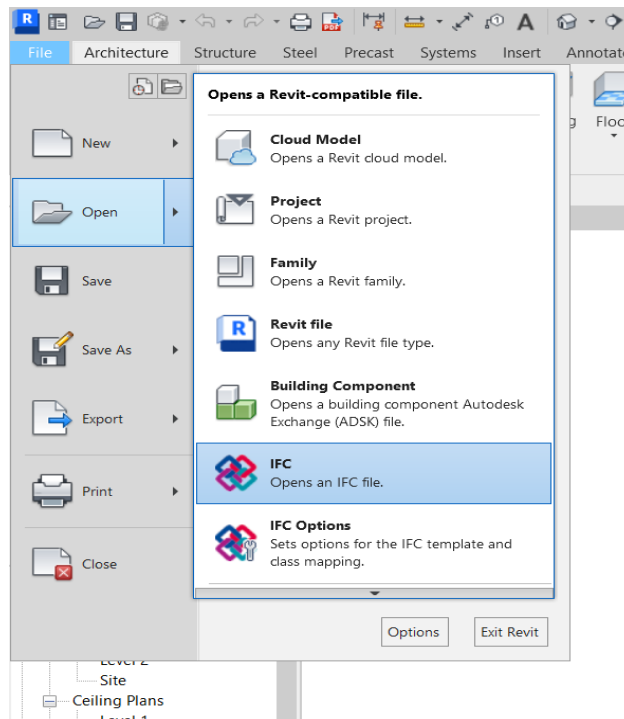
6.4 ΣΥΝΔΕΣΗ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Η σύνδεση μεταξύ του στατικού προγράμματος Etabs και του αρχιτεκτονικού προγράμματος Revit Architecture γίνεται μέσω αρχείου IFC, αφού και τα δύο προγράμματα είναι συμβατά με αρχεία αυτής της μορφής. Αυτό μας διευκολύνει στην εισαγωγή του τρισδιάστατου φορέα από το στατικό πρόγραμμα στο αρχιτεκτονικό ώστε να το επεξεργαστούμε, να τοποθετήσουμε υλικά και να υπολογίσουμε τις ποσότητες του. Μέσω του αρχείου αυτού δεν εισάγεται το μοντέλο με τη μορφή απλών γραμμών αλλά με τη μορφή αντικειμένων, τα οποία περιέχουν ταυτόχρονα όλη την πληροφορία που υπήρχε σχετικά με αυτά στο στατικό πρόγραμμα, όπως η ποιότητα του σκυροδέματος του φέροντα οργανισμού, τα φορτία που επιβάλλονται κλπ. Συνεπώς, το μοντέλο λαμβάνεται έτοιμο προς επεξεργασία και δεν χρειάζεται να το σχεδιάσουμε εξ' αρχής εξοικονομώντας έτσι χρόνο και ταυτόχρονα αποφεύγοντας πιθανά λάθη.

Αρχικά στο πρόγραμμα Etabs στην καρτέλα File γίνεται εξαγωγή του Project με την επιλογή Export σε μορφή IFC αρχείου, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 6.7. Στη συνέχεια για να εισαχθεί στο Revit από την καρτέλα File του προγράμματος με την επιλογή Open ανοίγεται το αρχείο που έχει αποθηκευτεί στον υπολογιστή(Εικόνα 6.8).



Εικόνα 6.7: Εξαγωγή του τρισδιάστατου μοντέλου με μορφή IFC αρχείου από το πρόγραμμα Etabs



Εικόνα 6.8: Εισαγωγή τρισδιάστατου φορέα με μορφή IFC αρχείου στο πρόγραμμα Autodesk Revit

6.5 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΤΙΡΙΟΥ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ AUTODESK REVIT

6.5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το Revit αποτελεί ένα πρόγραμμα BIM της εταιρείας Autodesk, που χρησιμοποιείται για τη μοντελοποίηση της κτιριακής πληροφορίας, βοηθώντας συνεπώς τόσο τον σχεδιασμό όσο και τον προγραμματισμό ενός έργου. Διαθέτει μία βάση δεδομένων, η οποία εμπεριέχει πληροφορίες σχετικά με το κάθε στοιχείο του κτιριακού μοντέλου. Καθώς γίνεται η σχεδίαση συλλέγονται πληροφορίες για το έργο και γίνεται συγχρονισμός τους σε όλες τις απόψεις του έργου, στις κατόψεις, στις όψεις, στις τομές καθώς και στις προμετρήσεις ποσοτήτων και υλικών.

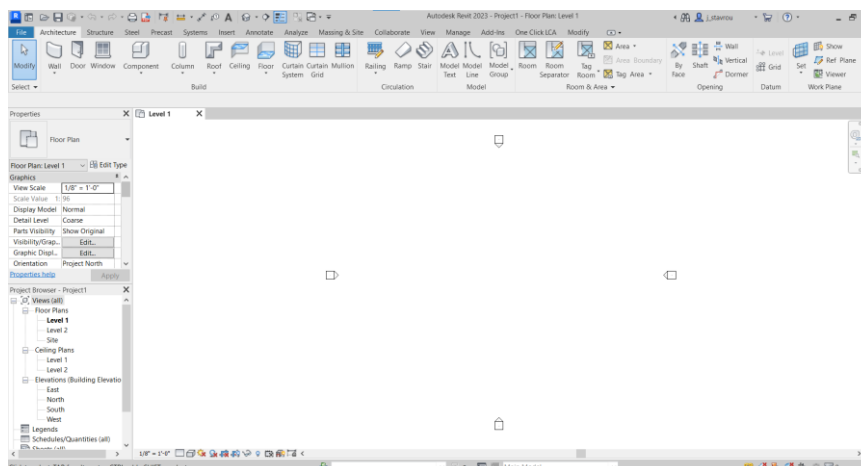
Αυτό συνεπάγεται την ικανότητα του λογισμικού να ενημερώνει για τις αλλαγές ολόκληρο το μοντέλο και αυτό αποτελεί και το βασικό στοιχείο της δυναμικής του προγράμματος. Για όποια αλλαγή προκύψει δεν απαιτείται ο χρήστης να ενημερώσει όλα τα σχέδια. Έτσι το Revit προσφέρει μεγάλη παραγωγικότητα και ταχύτητα στο σχεδιασμό της μελέτης.

Επιπλέον, η κοινή βάση δεδομένων κάνει το Revit να διαφέρει από το AutoCAD, όπου ο σχεδιασμός τόσο σε 2D όσο και σε 3D γίνεται με απλές γραμμές. Στο Revit κάθε κτιριακό μοντέλο αντιπροσωπεύει μια ολόκληρη μελέτη, καθώς κάθε στοιχείο του είναι ένα μοντελοποιημένο αντικείμενο που περιέχει πληροφορίες σχετικά με αυτό.

Τέλος, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω το Revit υποστηρίζει το πρότυπο IFC, που προάγει τη διαλειτουργικότητα. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μεγάλα έργα όπου συμμετέχουν και επεμβαίνουν πολλοί χρήστες σχετιζόμενοι με το έργο. Το Revit παρέχει τη δυνατότητα δημιουργίας ενός βασικού κύριου αρχείου στο τοπικό δίκτυο των χρηστών στο οποίο αποθηκεύεται το βασικό αντίγραφο της βάσης δεδομένων του μοντέλου. Συνεπώς, μπορούν να το ενημερώνουν αλλά και να ενημερώνονται για τις αλλαγές. Επιπλέον, μέσω του προτύπου IFC είναι δυνατή η συνεργασία του στατικού προγράμματος με το αρχιτεκτονικό ώστε να προστεθούν διάφορα αρχιτεκτονικά στοιχεία και επιπλέον πληροφορίες σχετικά με τα υλικά του κάθε στοιχείου.

6.5.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

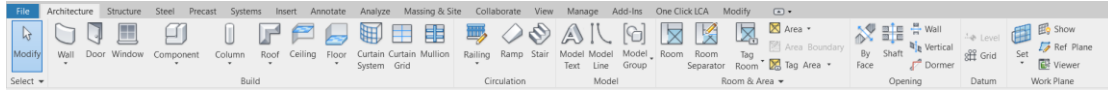
Το περιβάλλον εργασίας του Revit είναι εύχρηστο και καλά δομημένο προσφέροντας πλήθος εργαλείων για τη μοντελοποίηση της κτιριακής πληροφορίας (Εικόνα 6.9).



Εικόνα 6.9: Το τυπικό περιβάλλον εργασίας του Autodesk Revit

Ribbon toolbar

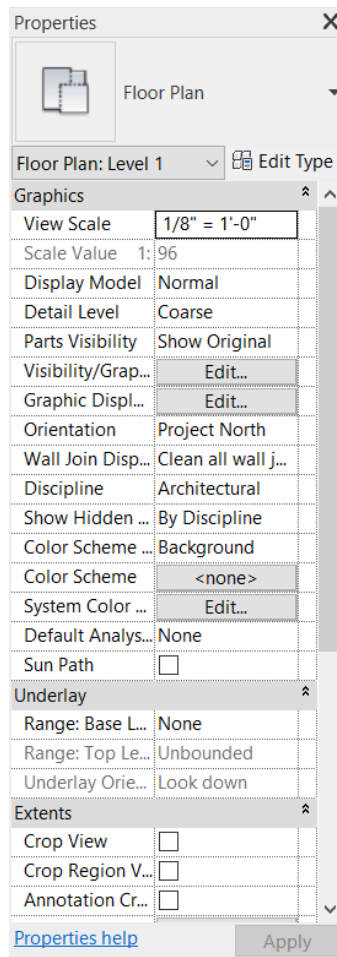
Η Ribbon είναι η γραμμή εργαλείων που δίνει τη δυνατότητα να εκτελεστούν οι διαφορετικές εντολές μέσα στο Revit. Βρίσκεται στο πάνω μέρος του παραθύρου του Revit και περιλαμβάνει εντολές όπως το Wall που θα χρησιμοποιηθεί στην παρούσα διπλωματική για την εξωτερική όψη του κτιρίου, καθώς και πολλές ακόμα στις διάφορες καρτέλες της (Εικόνα 6.10).



Εικόνα 6.10: Στιγμιότυπο οθόνης του Autodesk Revit για τη γραμμή εργαλείων (ribbon toolbar)

Παλέτα Properties

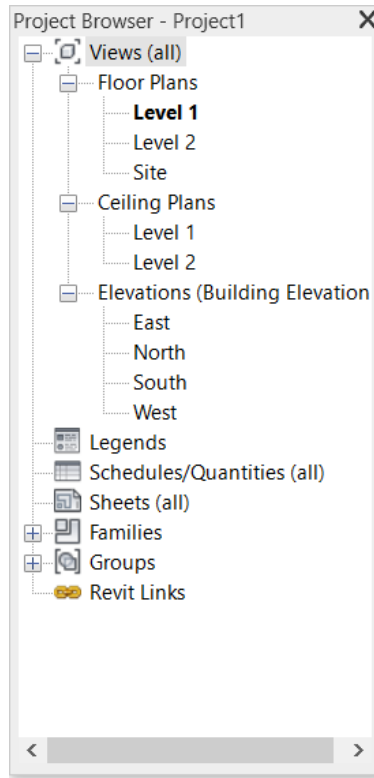
Η παλέτα Properties ελέγχει και εμφανίζει τις ιδιότητες των διαφορετικών στοιχείων του κτιριακού μοντέλου. Μέσω αυτής είναι δυνατή η επεξεργασία και η προσθήκη πληροφοριών στο μοντέλο. (Εικόνα 6.11)



Εικόνα 6.11: Στιγμιότυπο οθόνης του Autodesk Revit για την καρτέλα ιδιοτήτων

Project Browser

Ο Project Browser στο Revit επιτρέπει να κατηγοριοποιηθούν και να οργανωθούν οι διαφορετικές απόψεις του Project, όπως οι κατόψεις, οι ανόψεις, οι όψεις, οι πίνακες προμετρήσεων κλπ. (Εικόνα 6.12)

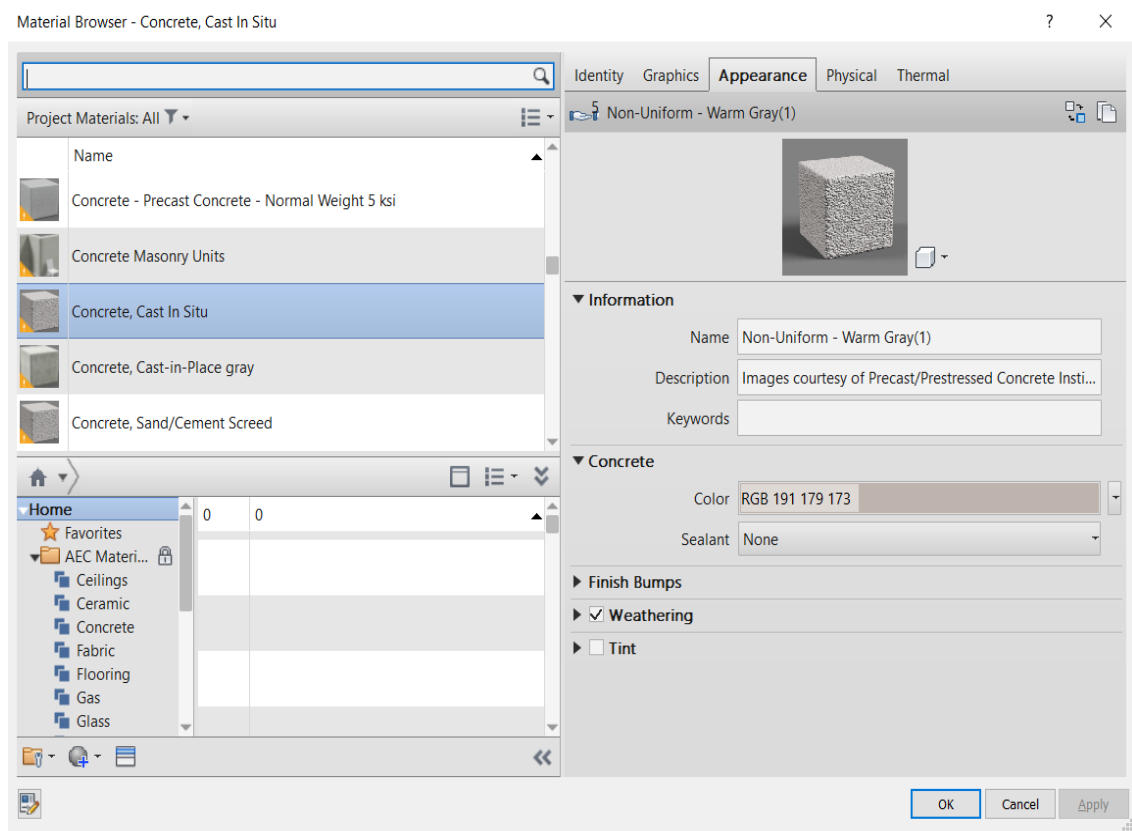


Εικόνα 6.12: Στιγμιότυπο οθόνης του Autodesk Revit για την Καρτέλα Περιήγησης Έργου

6.5.3 MATERIALS/ΥΛΙΚΑ

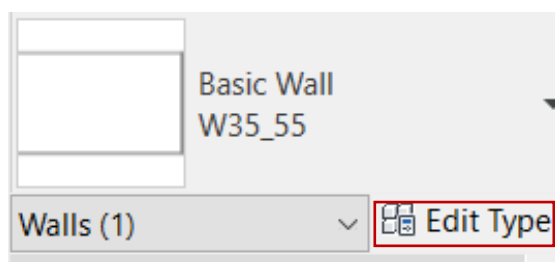
Κάθε κτίριο αποτελείται από πολλά διαφορετικά υλικά τα οποία συνεισφέρουν σε ένα ποσοστό στους εκπεμπόμενους αέριους ρύπους, όπως οι επικαλύψεις των διάφορων στοιχείων. Το Revit είναι ένα πρόγραμμα που επιτρέπει την εισαγωγή υλικών και την μέτρηση της ποσότητας τους. Στο Revit τα δομικά στοιχεία δεν αναπαρίστανται με τρόπο ανάλογο αυτού των άλλων σχεδιαστικών προγραμμάτων. Κάθε στοιχείο δεν σχεδιάζεται απλά με γραμμές. Αντίθετα, αποτελεί μία οντότητα προσομοίωσης της πραγματικότητας, όπως εν τέλει θα κατασκευαστεί. Συνεπώς κάθε αντικείμενο περιέχει όλη την πληροφορία που το περιγράφει από τη γεωμετρία μέχρι τα υλικά του.

Στο Revit ο χρήστης μπορεί να προσδιορίσει το υλικό κάθε αντικειμένου, τις στρώσεις των υλικών κάθε αντικειμένου, το πάχος τους και τις ιδιότητες τους, καθώς και τον τρόπο γραφικής αναπαράστασης του κάθε υλικού. Διαθέτει λεπτομερή βιβλιοθήκη με διαθέσιμα υλικά (Material Browser) από όπου ο χρήστης μπορεί είτε να επιλέξει, είτε να φτιάξει τα δικά του με την επεξεργασία των ήδη υπαρχόντων. (Εικόνα 6.13)



Εικόνα 6.13: Στιγμιότυπο οθόνης του Autodesk Revit από τα παράθυρα της Βιβλιοθήκης και Επεξεργασίας Υλικών

Η επεξεργασία γίνεται από την παλέτα Properties αφού έχει επιλεγεί το αντικείμενο προς επεξεργασία, όπως ένας τοίχος. Από το παράθυρο περιήγησης και την επιλογή edit type δίνεται η δυνατότητα στο χρήστη να διαμορφώσει όλα τα χαρακτηριστικά του στοιχείου που επιλέχθηκε (Εικόνα 6.14). Στο παράθυρο επεξεργασίας του στοιχείου εμφανίζονται οι πληροφορίες που έχει επιλέξει ο χρήστης γι' αυτό, αναλυτική περιγραφή των στρώσεων του, καθώς και η προεπισκόπηση του στοιχείου σε δισδιάστατη και τρισδιάστατη απεικόνιση, ώστε να επιτυγχάνεται καλύτερη εποπτεία του αποτελέσματος.



Εικόνα 6.14: Στιγμιότυπο οθόνης του Autodesk Revit από την επιλογή Edit Type της παλέτας Properties για την επεξεργασία ιδιοτήτων

Στοιχεία Φέροντα Οργανισμού

Στην παρούσα διπλωματική εργασία τα στρώματα υλικών των δομικών στοιχείων είναι επίχρησμα-σκυρόδεμα-επίχρησμα για τα εσωτερικά που δεν έρχονται σε επαφή με το εξωτερικό περιβάλλον και συνεπώς δεν απαιτείται μόνωση και επίχρησμα-μόνωση-σκυρόδεμα-επίχρησμα για τα εξωτερικά. Όσον αφορά τα δάπεδα έγινε ο διαχωρισμός ανάμεσα σε εσωτερικά δάπεδα με επικάλυψη πλακιδίων πορσελάνης και σε βατό δώμα στο οποίο τοποθετείται μονωτικό υλικό, όπως η εξηλασμένη πολυστερίνη, ελαφροσκυρόδεμα και στεγάνωση, κυρίως με άσφαλτο. Παρακάτω, παρουσιάζονται αναλυτικά οι στρώσεις κάθε στοιχείου καθώς και το πάχος τους στο παράθυρο επεξεργασίας που διαθέτει το Revit.

Εξωτερικό τοίχιο

Family: Basic Wall
Type: W35_55 energy exterior
Total thickness: 0.6700 (Default)
Resistance (R): 2.3641 (m²·K)/W
Thermal Mass: 45.71 kJ/(m²·K)

Sample Height: 6.0000

EXTERIOR SIDE						
	Function	Material	Thickness	Wraps	Structural Material	Variable
1	Finish 2 [5]	Plaster	0.0200	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2	Substrate [2]	Polystyrene, Expanded	0.0800	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3	Core Boundary	Layers Above Wrap	0.0000			
4	Structure [1]	C35/45	0.5500	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
5	Core Boundary	Layers Below Wrap	0.0000			
6	Finish 1 [4]	Plaster	0.0200	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

INTERIOR SIDE

Insert Delete Up Down

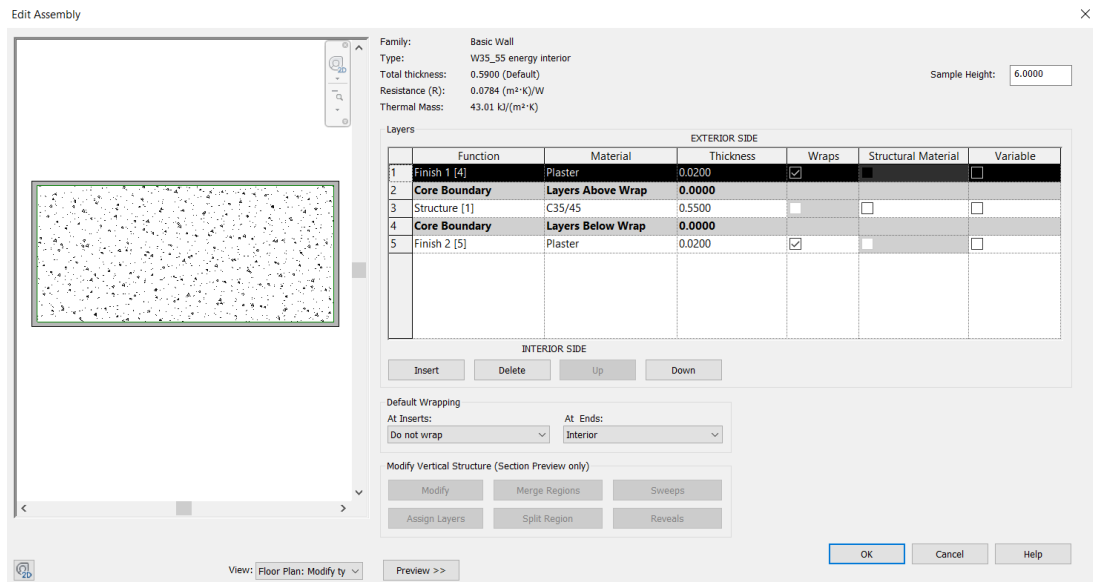
Default Wrapping
At Inserts: Do not wrap At Ends: Interior

Modify Vertical Structure (Section Preview only)
Modify Merge Regions Sweeps
Assign Layers Split Region Reveals

View: Floor Plan: Modify ty Preview >> OK Cancel Help

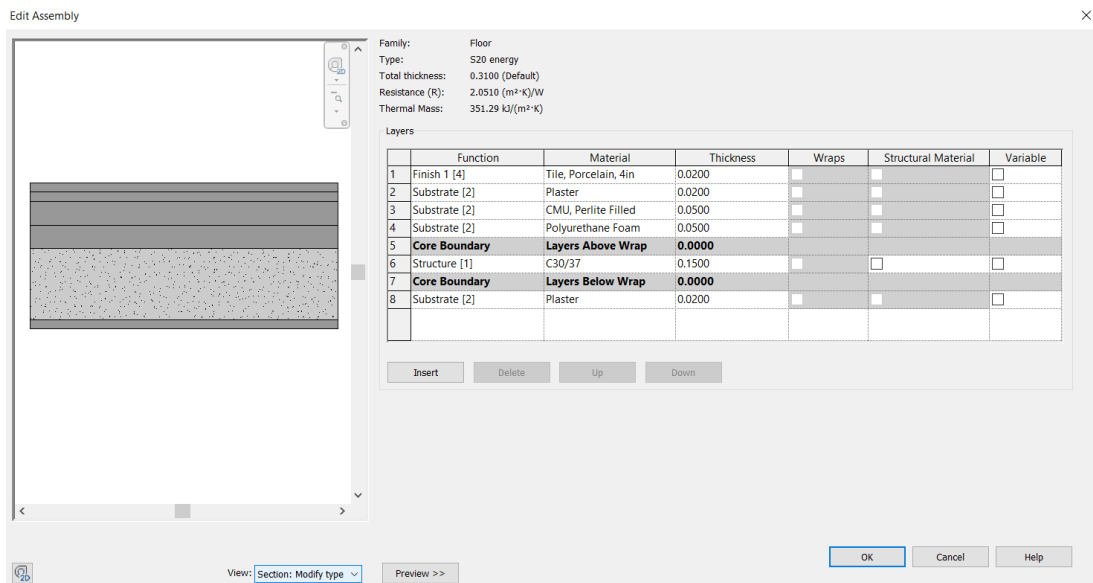
Εικόνα 6.15: Στιγμιότυπο οθόνης του Autodesk Revit από το παράθυρο Επεξεργασίας της κατασκευής των εσωτερικών στρώσεων των εξωτερικών τοιχίων

Εσωτερικό τοίχιο



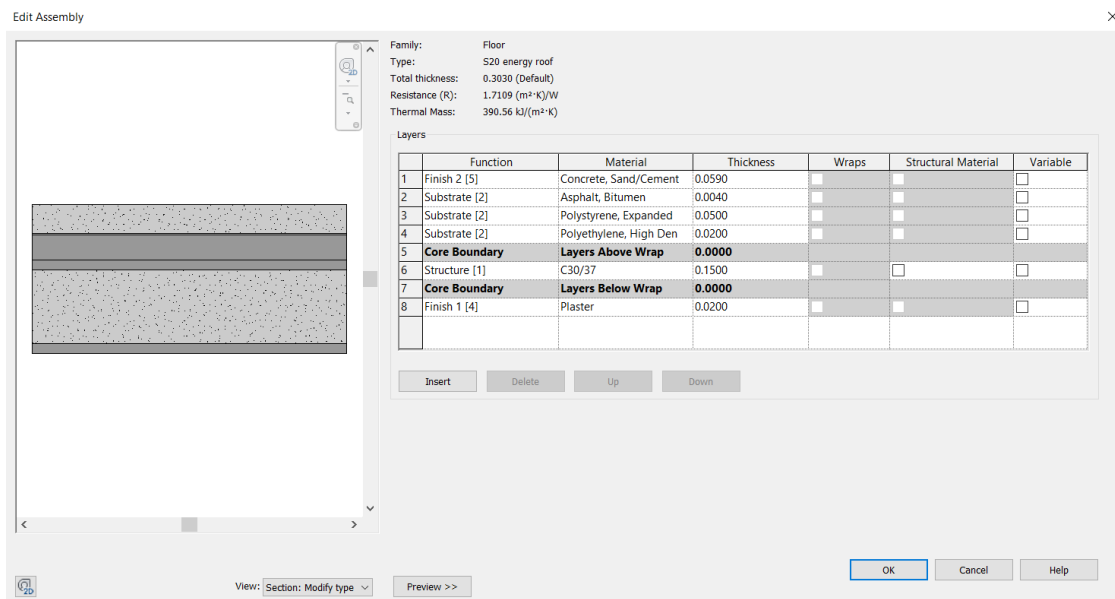
Εικόνα 6.16: Στιγμιότυπο οθόνης του Autodesk Revit από το παράθυρο Επεξεργασίας της κατασκευής των εσωτερικών στρώσεων των εσωτερικών τοιχίων

Εσωτερικό δάπεδο



Εικόνα 6.17: Στιγμιότυπο οθόνης του Autodesk Revit από το παράθυρο Επεξεργασίας της κατασκευής των εσωτερικών στρώσεων των εσωτερικών δαπέδων

Βατό δώμα

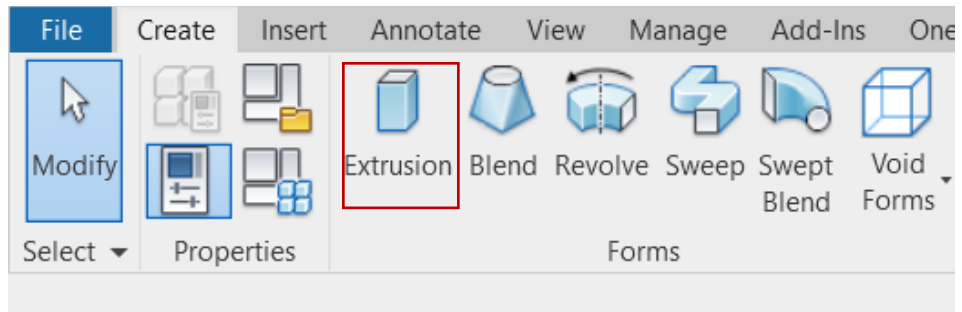


Εικόνα 6.18: Στιγμιότυπο οθόνης του Autodesk Revit από το παράθυρο Επεξεργασίας της κατασκευής των εσωτερικών στρώσεων του βατού δώματος

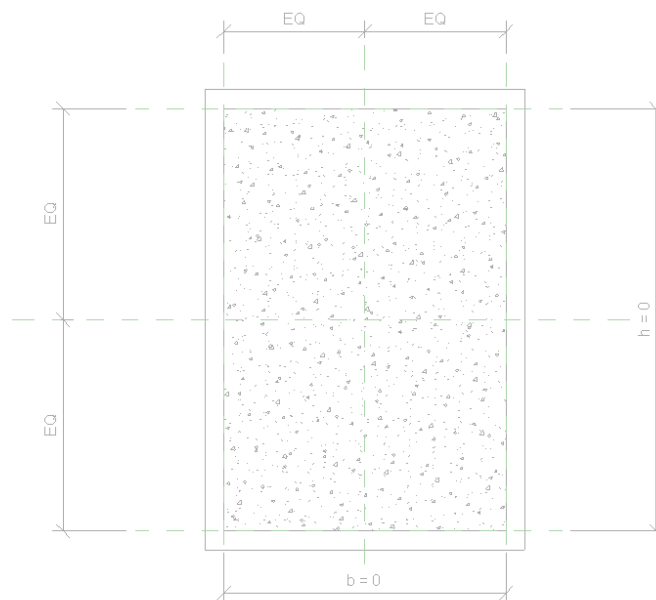
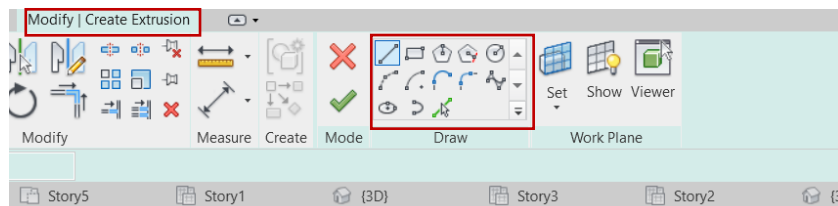
Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι το Revit δεν τοποθετεί στις δοκούς και τα υποστυλώματα τις στρώσεις των υλικών με την ίδια ευκολία που το κάνει στην τοιχοποιία. Το πρόβλημα αυτό επιλύεται επιλέγοντας το στοιχείο προς επεξεργασία και στη συνέχεια την εντολή Edit Family (Εικόνα 6.19) της καρτέλας Mode. Στο παράθυρο που ανοίγεται με την εντολή Extrusion της καρτέλας Create (Εικόνα 6.20) και τα εργαλεία που παρέχει το Revit στην καρτέλα Modify|Extrusion (Εικόνα 6.21) μπορούν να σχεδιαστούν οι στρώσεις υλικών που επιλέγεται να έχει η δοκός ή το υποστυλωμα αντίστοιχα. Στη συνέχεια, από την παλέτα Properties δίνεται η δυνατότητα να γίνει επεξεργασία του υλικού κάθε στρώσης επιλέγοντας από τη διαθέσιμη βιβλιοθήκη το επιθυμητό. Τέλος, επιλέγοντας την εντολή Load into Project εισάγεται το στοιχείο που έχει επεξεργαστεί στο Project του φορέα και μπορεί να χρησιμοποιηθεί.



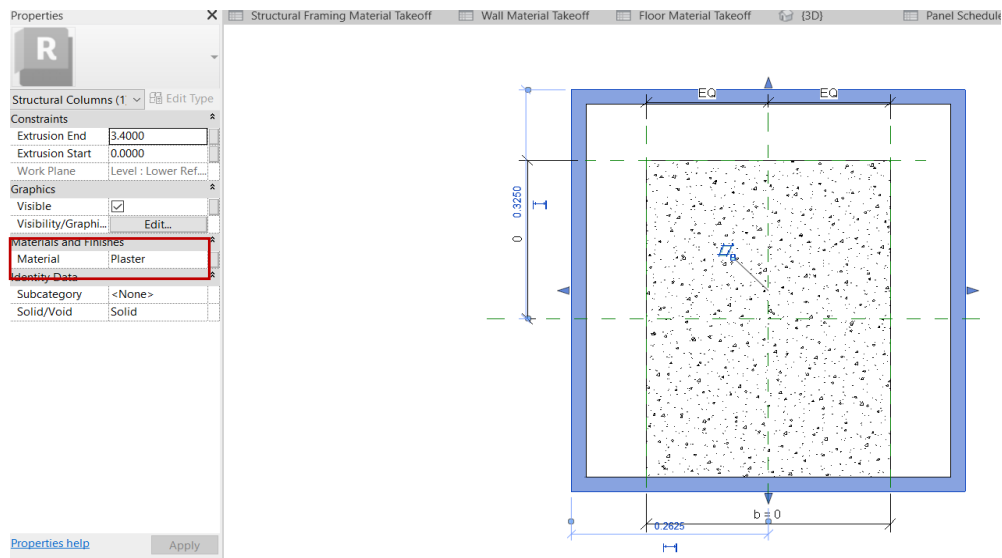
Εικόνα 6.19: Στιγμιότυπο οθόνης του Autodesk Revit από την επιλογή Edit Family της καρτέλας Modify



Εικόνα 6.20: Στιγμιότυπο οθόνης του Autodesk Revit από την εντολή Extrusion για την δημιουργία στρώσεων



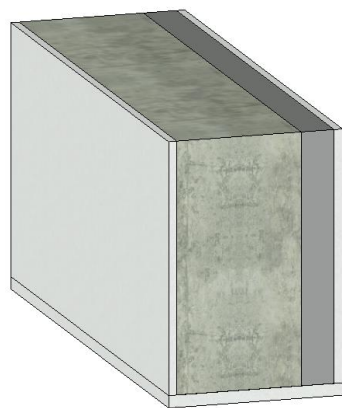
Εικόνα 6.21: Στιγμιότυπο οθόνης του Autodesk Revit από το παράθυρο Επεξεργασίας για τη δημιουργία στρώσεων με τη βοήθεια των εργαλείων του Revit



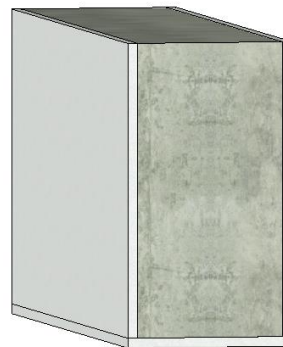
Εικόνα 6.22: Επιλογή υλικού για τις στρώσεις που δημιουργήθηκαν στο Edit Family του Autodesk Revit

Τα εσωτερικά και εξωτερικά υποσυλώματα που τοποθετήθηκαν τα επιχρήσματα καθώς και οι εσωτερικοί και εξωτερικοί δοκοί φαίνονται παρακάτω. Στην εξωτερική δοκό που έρχεται σε επαφή με το περιβάλλον τοποθετήθηκε στην εξωτερική πλευρά διογκωμένη πολυστερίνη πάχους 0.08mm και ταυτόχρονα περιβάλλεται με αβεστοκονίαμα πάχους 0.02mm. Στην εσωτερική δοκό έχει τοποθετηθεί μόνο ασβεστοκονίαμα πάχους 0.02mm. Ανάλογα έχουν τοποθετηθεί τα επιχρήσματα και στα εξωτερικά και εσωτερικά υποσυλώματα.

Εξωτερική δοκός



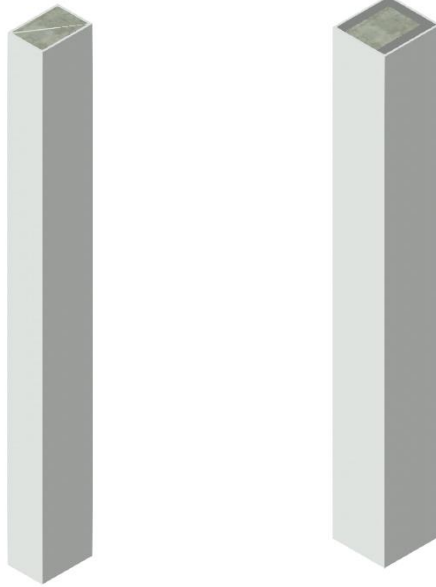
Εσωτερική δοκός



Εικόνα 6.23: Τύποι Δοκών που σχεδιάστηκαν στο Autodesk Revit

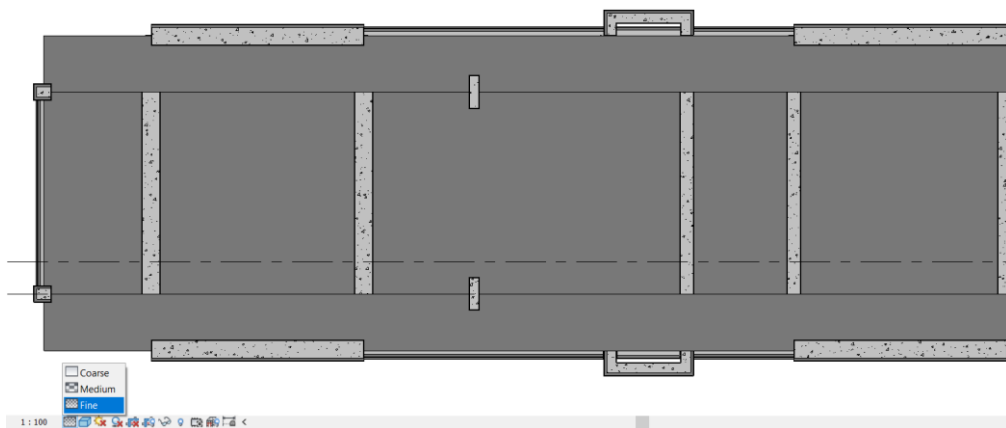
Εσωτερικό υποστύλωμα

Εξωτερικό υποστύλωμα



Εικόνα 6.24: Τύποι υποστυλωμάτων που σχεδιάστηκαν στο Autodesk Revit

Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι στο Revit ο χρήστης μπορεί να ορίσει το επίπεδο λεπτομέρειας του σχεδίου (Detail Level). Πατώντας την επιλογή Fine μπορεί να δει στη κάτοψη του έργου τα υλικά που έχει τοποθετήσει στα διάφορα στοιχεία του έργου. (Εικόνα 6.25)



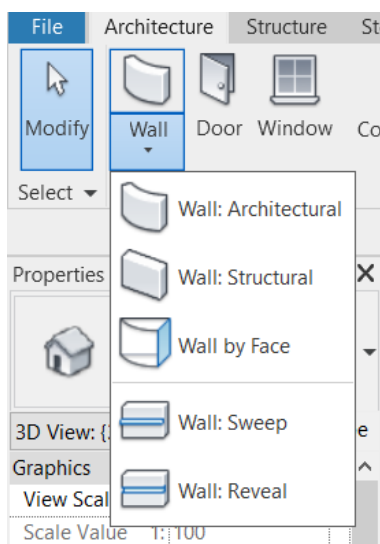
Εικόνα 6.25: Λεπτομέρεια κάτοψης με Detail Level Fine στο Autodesk Revit

Σύνδεση γεωμετρίας τεμνόμενων δομικών στοιχείων

Η εντολή join geometry είναι απαραίτητη και στα σημεία σύνδεσης δύο ή περισσότερων δομικών στοιχείων και χρησιμεύει στο να γίνουν σωστά οι επικαλύψεις των υλικών των διασταυρούμενων δομικών στοιχείων. Η απόφαση του ποια υλικά θα αναδιπλώνονται στα άκρα των στοιχείων, και ποια υλικά θα επικαλύπτουν ποια, έγκειται και πάλι στο χρήστη και εντοπίζεται και πάλι στο παράθυρο edit type για κάθε δομικό στοιχείο. Είναι χαρακτηριστικό πως η ένωση όλων των δομικών στοιχείων μεταξύ τους, μεγαλώνει αρκετά το μέγεθος του αρχείου, όμως βελτιώνει κατά πολύ την ακρίβεια των υπολογισμών των επιμετρήσεων των υλικών.

Υλικά μη φερόντων στοιχείων του κτιρίου

Στο μοντέλο εκτός των στρώσεων των στοιχείων του φέροντα οργανισμού τοποθετήθηκε εξωτερικός τοίχος με υαλοπετάσματα και εξωτερικές γυάλινες πόρτες. Οι τοίχοι, όπως και τα περισσότερα αντικείμενα στο Revit, αποτελούν μεμονωμένα αντικείμενα που ανήκουν σε προκαθορισμένους τύπους οικογενειών (predefined system family types) με συγκεκριμένες ιδιότητες αναφορικά με τη λειτουργία, την κατασκευή και το πάχος τους, οι οποίες μπορούν να τροποποιηθούν από το χρήστη σε κάθε εφαρμογή τους στο συγκεκριμένο έργο. Στο μοντέλο που μελετάται εξωτερικά τοποθετήθηκε υαλοστάσιο (curtain wall), ώστε να υπάρχει επαρκής φωτισμός ως κτίριο γραφείων. Για την τοποθέτηση του τοίχου επιλέγεται από τα εργαλεία την επιλογή architecture και στη συνέχεια την επιλογή wall.

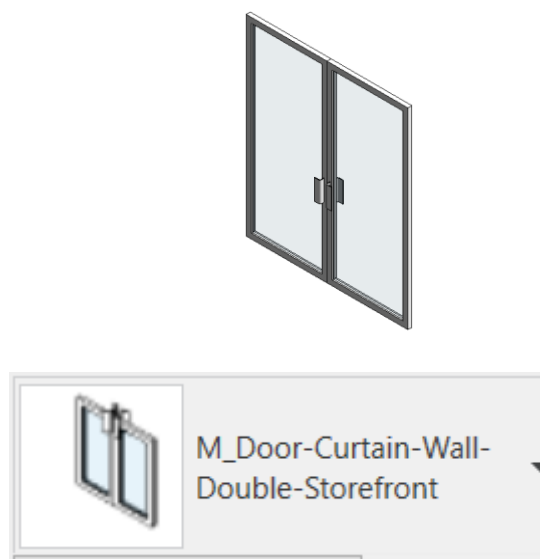


Εικόνα 6.26: Στιγμιότυπο οθόνης του Autodesk Revit από την εντολή Wall για τη δημιουργία τοίχων



Εικόνα 6.27: Στιγμιότυπο οθόνης του Autodesk Revit από την όψη του κτιρίου, όπου φαίνεται η τοιχοποιία από υαλοστάσιο (Curtain Wall) που χρησιμοποιήθηκε

Μετά το σχεδιασμό των τοίχων ακολουθεί η μοντελοποίηση των θυρών και των παραθύρων. Πρόκειται για αντικείμενα τα οποία μπορούν να τοποθετηθούν σε οποιοδήποτε τύπο τοίχου. Όσον αφορά τις πόρτες τοποθετήθηκε ένας τύπος διπλής γυάλινης πόρτας εισόδου, ενώ παράθυρα δε χρησιμοποιήθηκαν αφού το κτίριο περιβάλλεται από τζαμαρία.



Εικόνα 6.28: Στιγμιότυπο οθόνης του Autodesk Revit από το είδος εξωτερικής πόρτας που χρησιμοποιήθηκε

6.5.4 ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΡΟΜΕΤΡΗΣΗΣ/ SCHEDULES

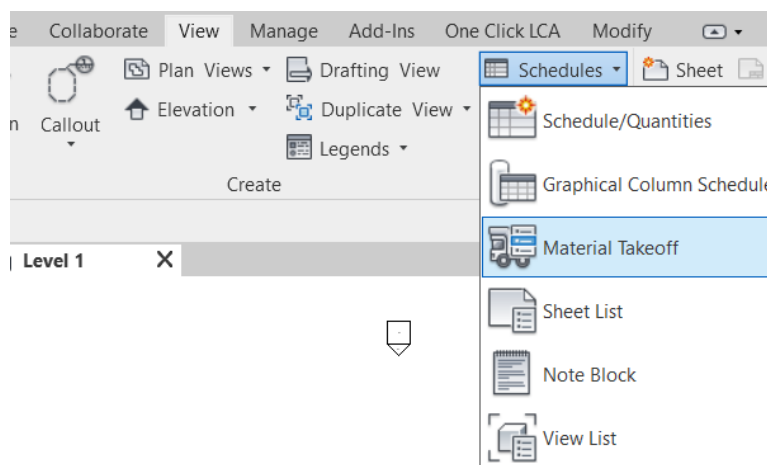
Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως ένα από τα πλεονεκτήματα του Revit είναι η βάση δεδομένων, στην οποία βασίζεται η δημιουργία του, η οποία περιέχει όλες εκείνες τις πληροφορίες που σχετίζονται με κάθε μοντελοποιημένο αντικείμενο του Project. Κάθε άποψη αποτελεί μία αναφορά των δεδομένων αυτών και στις περισσότερες περιπτώσεις η απεικόνιση γίνεται γραφικά, όπως με μία κάτοψη, μία υψομετρική άποψη κλπ. Οι πίνακες προμέτρησης ή Schedules αποτελούν επίσης μία απεικόνιση του Revit όπου η αναφορά των δεδομένων γίνεται με τη μορφή πίνακα.

Οι πίνακες προμέτρησης περιέχουν όλα τα μεμονωμένα αντικείμενα του κτιριακού μοντέλου, τα οποία μπορούν και να ομαδοποιηθούν με βάση συγκεκριμένες παραμέτρους που επιλέγει ο χρήστης. Τα στοιχεία του μοντέλου έχουν χαρακτηριστικά όπως υλικό, επίπεδο τοποθέτησης, τύπος διαστάσεις κ.α. Τα χαρακτηριστικά αυτά εμπεριέχονται στο αρχείο του προγράμματος και είναι διαθέσιμα για κάθε στοιχείο που απαιτείται να ποσοτικοποιηθεί. Εκτός της πληροφορίας που απεικονίζεται ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να επιλέξει και τον τρόπο απεικόνισης τους ανάλογα με τις προτιμήσεις του.

Πρόκειται για μία ιδιαίτερα σημαντική λειτουργία του Revit για τη διαχείριση του έργου προς υλοποίηση, καθώς οι πίνακες μπορούν να δημιουργηθούν σε οποιαδήποτε φάση του έργου, να παρέχεται εύκολη πρόσβαση σε κάθε πληροφορία με τη μορφή συνοπτικού πίνακα καθώς και να ενημερώνονται αυτόματα καθώς πραγματοποιούνται τροποποιήσεις στο έργο. Επίσης, χωρίς τη χρήση προγραμμάτων τύπου BIM η προμέτρηση θα απαιτούνταν να γίνει χειρονακτικά, μια διαδικασία που συνεπάγεται πολύ χρόνο και κόπο και ταυτόχρονα κίνδυνο να γίνουν λάθη τα οποία θα είχαν επίπτωση στο χρονικό προγραμματισμό και το κόστος.

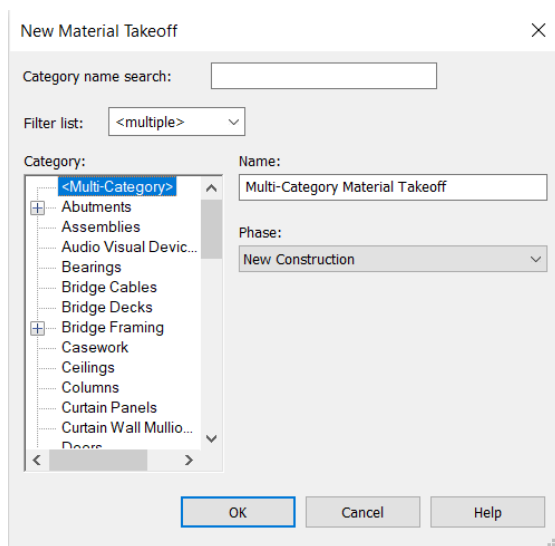
Εκτός από πίνακες προμέτρησης που αφορούν τα διάφορα στοιχεία ενός Project υπάρχει η δυνατότητα να δημιουργηθούν πίνακες που αφορούν τα υλικά των στοιχείων αυτών, όπως το σκυρόδεμα ή ο χάλυβας. Στη παρούσα διπλωματική θα επιλέγουμε τη συγκεκριμένη εντολή ώστε να υπολογιστεί η ποσότητα των υλικών που θα χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό της εκπεμπόμενης ενέργειας με τη μέθοδο της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής. Για τη δημιουργία πίνακα προμετρήσεων υλικών στο Revit ακολουθούμε την εξής διαδικασία:

Από την κορδέλα εργαλείων επιλέγεται η καρτέλα View και αναπτύσσονται οι επιλογές της εντολής Schedules, από όπου επιλέγεται η εντολή Material Takeoff. (Εικόνα 6.29)



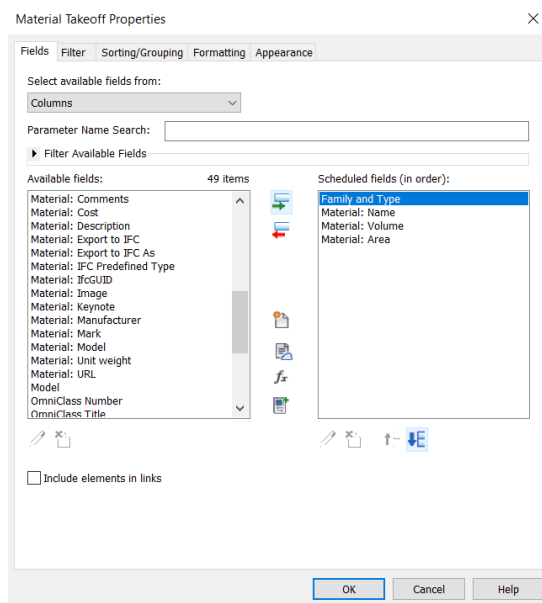
Εικόνα 6.29: Στιγμιότυπο οθόνης του Autodesk Revit από την επιλογή Material Takeoff για την προμέτρηση των υλικών

Στη συνέχεια, από τη λίστα των διαθέσιμων κατηγοριών αντικειμένων που διαθέτει το Revit για να δημιουργηθεί πίνακας υλικών επιλέγεται το ζητούμενο. (Εικόνα 6.30)



Εικόνα 6.30: Στιγμιότυπο οθόνης του Autodesk Revit από το παράθυρο New Material Takeoff, όπου θα γίνει επιλογή του στοιχείου για το οποίο θα γίνει προμέτρηση υλικών

Από την καρτέλα Fields επιλέγονται οι παράμετροι που θέλουμε να περιλαμβάνονται στον πίνακα προμετρήσεων και πατώντας OK δημιουργείται ο ζητούμενος πίνακας προμετρήσεων. (Εικόνα 6.31)



Εικόνα 6.31: Στιγμιότυπο οθόνης του Autodesk Revit από το παράθυρο Material Takeoff Properties, όπου ορίζονται οι παράμετροι της προμέτρησης υλικών

Από την παλέτα Properties υπάρχει δυνατότητα επεξεργασίας του πίνακα, ώστε να προστεθούν επιπλέον παράμετροι, να ταξινομηθούν τα στοιχεία του πίνακα ανάλογα με τις προτιμήσεις, να υπολογιστεί το άθροισμα ποσοτήτων κ.α. (Εικόνα 6.32)

<Wall Material Takeoff>		
A	B	C
Family and Type	Material: Name	Material: Volume
Basic Wall: W35_5	C35/45	15.59 m³
Basic Wall: W35_5	C35/45	15.59 m³
Basic Wall: W35_5	C35/45	6.89 m³
Basic Wall: W35_5	C35/45	8.70 m³
Basic Wall: W30_4	C35/45	5.01 m³
Basic Wall: W30_4	C35/45	6.33 m³
Basic Wall: W30_4	C35/45	5.01 m³
Basic Wall: W30_4	C35/45	6.33 m³
Basic Wall: W35_5	C35/45	11.78 m³
Basic Wall: W35_5	C35/45	11.78 m³
Basic Wall: W35_5	C35/45	5.21 m³
Basic Wall: W35_5	C35/45	6.57 m³
Basic Wall: W30_4	C35/45	3.79 m³
Basic Wall: W30_4	C35/45	4.78 m³
Basic Wall: W30_4	C35/45	3.79 m³
Basic Wall: W30_4	C35/45	4.78 m³
Basic Wall: W35_5	C35/45	11.78 m³
Basic Wall: W35_5	C35/45	5.21 m³
Basic Wall: W35_5	C35/45	6.57 m³
Basic Wall: W30_4	C35/45	3.79 m³
Basic Wall: W30_4	C35/45	4.78 m³
Basic Wall: W30_4	C35/45	3.79 m³
Basic Wall: W30_4	C35/45	4.78 m³
Basic Wall: W35_5	C35/45	11.78 m³
Basic Wall: W35_5	C35/45	11.78 m³
Basic Wall: W35_5	C35/45	5.21 m³
Basic Wall: W35_5	C35/45	6.57 m³
Basic Wall: W30_4	C35/45	3.79 m³
Basic Wall: W30_4	C35/45	4.78 m³
Basic Wall: W30_4	C35/45	3.79 m³
Basic Wall: W30_4	C35/45	4.78 m³

Properties

Schedule

Schedule: Wall Material Takeoff Edit Type

Identity Data

View Template: <None>

View Name: Wall Material Takeoff

Dependency: Independent

Phasing

Phase Filter: Show All

Phase: New Construction

IFC Parameters

Export to IFC: By Type

Other

Fields: Edit...

Filter: Edit...

Sorting/Grouping: Edit...

Formatting: Edit...

Appearance: Edit...

Properties help Apply

Εικόνα 6.32: Στιγμιότυπο οθόνης του Autodesk Revit από το παράθυρο Properties για την επεξεργασία του πίνακα προμέτρησης

<Structural Column Material Takeoff>		
A	B	C
Material: Name	Family and Type	Material: Volume
C35/45		
C35/45	Exterior Base Colu	0.65 m³
C35/45	Exterior Base Colu	0.65 m³
C35/45	Exterior Level Colu	0.48 m³
C35/45	Exterior Level Colu	0.49 m³
C35/45	Exterior Level Colu	0.49 m³
C35/45	Exterior Level Colu	0.49 m³
C35/45	Exterior Level Colu	0.49 m³
C35/45	Exterior Level Colu	0.49 m³
C35/45	Exterior Level Colu	0.48 m³
C35/45	Exterior Level Colu	0.48 m³
C35/45	Interior Base Colum	1.26 m³
C35/45	Interior Level Colum	0.93 m³
C35/45	Interior Level Colum	0.93 m³
C35/45	Interior Level Colum	0.93 m³
C35/45	Interior Base Colum	1.26 m³
C35/45	Interior Level Colum	0.93 m³
C35/45	Interior Level Colum	0.93 m³
C35/45	Interior Level Colum	0.93 m³
C35/45	Interior Level Colum	0.93 m³
C35/45	Interior Level Colum	0.93 m³
C35/45	Interior Level Colum	0.93 m³
C35/45	Interior Level Colum	0.93 m³
C35/45	Interior Level Colum	0.93 m³
C35/45	Interior Level Colum	0.93 m³
C35/45	Interior Level Colum	0.93 m³
C35/45	Exterior Base Colu	0.64 m³
C35/45	Exterior Base Colu	0.64 m³
C35/45	Exterior Level Colu	0.47 m³
C35/45	Exterior Level Colu	0.47 m³
C35/45	Exterior Level Colu	0.47 m³
C35/45	Exterior Level Colu	0.47 m³
C35/45	Exterior Level Colu	0.47 m³
C35/45	Exterior Level Colu	0.47 m³
C35/45	Exterior Level Colu	0.47 m³
C35/45	Exterior Top Level C	0.26 m³
C35/45	Exterior Top Level C	0.26 m³
C35/45	Interior Base Colum	1.26 m³

<Structural Framing Material Takeoff>		
A	B	C
Material: Name	Family and Type	Material: Volu
C35/45		
C35/45	Exterior Beam 1: B	0.42 m³
C35/45	Interior Beam: B356	0.14 m³
C35/45	Interior Beam: B356	0.29 m³
C35/45	Interior Beam: B356	0.15 m³
C35/45	Interior Beam: B356	0.15 m³
C35/45	Interior Beam: B356	0.31 m³
C35/45	Interior Beam: B356	0.14 m³
C35/45	Interior Beam: B356	0.31 m³
C35/45	Interior Beam: B356	0.14 m³
C35/45	Interior Beam: B356	0.29 m³
C35/45	Interior Beam: B356	0.13 m³
C35/45	Interior Beam: B355	0.08 m³
C35/45	Interior Beam: B355	0.08 m³
C35/45	Interior Beam: B355	0.07 m³
C35/45	Interior Beam: B305	0.17 m³
C35/45	Interior Beam: HB60	0.19 m³
C35/45	Interior Beam: HB60	0.23 m³
C35/45	Exterior Beam 1: B	0.42 m³
C35/45	Interior Beam: B356	0.14 m³
C35/45	Interior Beam: B356	0.32 m³
C35/45	Interior Beam: B356	0.16 m³
C35/45	Interior Beam: B356	0.47 m³
C35/45	Interior Beam: B356	0.16 m³
C35/45	Interior Beam: B356	0.31 m³
C35/45	Interior Beam: B356	0.29 m³
C35/45	Interior Beam: B356	0.15 m³
C35/45	Interior Beam: B356	0.31 m³
C35/45	Interior Beam: B356	0.15 m³
C35/45	Interior Beam: B356	0.30 m³
C35/45	Interior Beam: B356	0.14 m³
C35/45	Interior Beam: B355	0.08 m³

Εικόνα 6.33: Λεπτομέρεια προμέτρησης υλικών υποστυλωμάτων και δοκών στο Autodesk Revit

Στο συγκεκριμένο έργο η συγκεκριμένη ανάλυση εξυπηρέτησε κατά κόρον στο επόμενο βήμα της διπλωματικής εργασίας δηλαδή τον υπολογισμό της παραγόμενης ενέργειας και του αποτυπώματος του διοξειδίου του άνθρακα. Τα σύνολα της προμέτρησης του Autodesk Revit για κάθε στοιχείο δίνονται στους παρακάτω πίνακες:

Υποστυλώματα (εσωτερικά και εξωτερικά)

ΥΛΙΚΟ	ΟΓΚΟΣ (m ³)
Σκυρόδεμα C35/45	29,17
Διογκωμένη πολυστερίνη	7,51
Ασβεστοκονίαμα	6,23

Πίνακας 6-5: Αποτελέσματα συνολικής προμέτρησης υλικών από το Autodesk Revit για τα εσωτερικά και εξωτερικά υποστυλώματα

Τοιχία (εσωτερικά και εξωτερικά)

ΥΛΙΚΟ	ΟΓΚΟΣ (m ³)
Σκυρόδεμα C35/45	959,29
Διογκωμένη πολυστερίνη	58,03
Ασβεστοκονίαμα	77,53

Πίνακας 6-6: Αποτελέσματα συνολικής προμέτρησης υλικών από το Autodesk Revit για τα εσωτερικά και εξωτερικά τοιχία του φέροντα οργανισμού

Δοκοί (εσωτερικοί και εξωτερικοί)

ΥΛΙΚΟ	ΟΓΚΟΣ (m ³)
Σκυρόδεμα C35/45	67,55
Διογκωμένη πολυστερίνη	11,89
Ασβεστοκονίαμα	10,2

Πίνακας 6-7: Αποτελέσματα συνολικής προμέτρησης υλικών από το Autodesk Revit για τις εσωτερικές και εξωτερικές δοκούς

Πλάκες

ΥΛΙΚΟ	ΟΓΚΟΣ (m ³)
Σκυρόδεμα C30/37	671,18
Περλιτόδεμα	162,39
Ασβεστοκονίαμα	130,47
Πολυουρεθάνη σε αφρό	174,94
Επικάλυψη σκυροδέματος	37,01
Άσφαλτος	2,51
Διογκωμένη πολυστερίνη	31,37
Πορσελάνινα πλακάκια	64,96

Πίνακας 6-8: Αποτελέσματα συνολικής προμέτρησης υλικών από το Autodesk Revit για τα εσωτερικά πατώματα και το βατό δώμα

Υαλοπετάσματα

Όγκος Γυαλιού(m ³)	44,69
Αριθμός Υαλοπετασμάτων	804

Πίνακας 6-9: Αποτελέσματα συνολικής προμέτρησης υαλοπετασμάτων και όγκου γυαλιού υαλοπετασμάτων από το Autodesk Revit

Αφού υπολογίστηκαν οι όγκοι όλων των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν από το Revit στη συνέχεια πολλαπλασιάστηκαν με την αντίστοιχη πυκνότητα ώστε να υπολογιστεί η μάζα κάθε υλικού.(Πίνακας 6-10)

Υλικό	Όγκος(m ³)	Πυκνότητα(kg/m ³)	Μάζα(kg)
Σκυρόδεμα C35/45	1056,01	2400	2.534.424
Σκυρόδεμα C30/37	671,18	2400	1.610.832
Ασβεστοκονίαμα Πολυστερίνη	224,43	1800	403.974
Πολυουρεθάνη σε αφρό	108,8	32	3.481
Επικάλυψη Σκυροδέματος	174,94	30	5.248,2
Περλιτόδεμα	37,01	12,4	458,92
Άσφαλτος	162,39	600	97.434
Πλακάκια Πορσελάνης	2,51	825	2.070,75
	64,96	25	1.624

Πίνακας 6-10: Μετατροπή Όγκων σε Μάζα

6.5 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΚΥΚΛΟΥ ΖΩΗΣ

6.6.1 ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ

Για τον υπολογισμό της ενσωματωμένης ενέργειας εφαρμόστηκε η μέθοδος της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (LCA). Υπενθυμίζεται ότι η ενσωματωμένη ενέργεια είναι το άθροισμα της αρχικής ενέργειας (initial energy) και της επαναλαμβανόμενης ενσωματωμένης ενέργειας (recurring energy).

Για να υπολογιστεί αρχικά η Initial Embodied Energy πολλαπλασιάζεται η ποσότητα που έχει υπολογιστεί με την περιεχόμενη ενέργεια των υλικών ανά μονάδα ποσότητας EE (MJ/kg), η οποία αποτελεί το σύνολο της ποσότητας ενέργειας που απαιτήθηκε για την εξόρυξη του υλικού, τη μεταφορά του στο εργοστάσιο και τη βιομηχανοποίησή τους. Οι τιμές της υπάρχουν σε βάσεις δεδομένων, οι οποίες είναι διαθέσιμες υπό πληρωμή. Μία διαθέσιμη και διαδεδομένη λίστα δεδομένων στο κοινό είναι η λίστα ICE DATA 2.0, που αναπτύχθηκε από τους Hammond & Jones, 2006 στο University of Bath. Η βάση δεδομένων ICE παρέχει πληροφορίες μόνο για την αρχική ενσωματωμένη ενέργεια, δηλαδή για ένα μέρος του κύκλου ζωής του έργου που αναφέρεται από τον IEA (International Energy Agency) ως Cradle to Gate.

Στη συνέχεια για τον υπολογισμό της Recurring Embodied Energy πολλαπλασιάζονται τα μεγέθη που προέκυψαν από τον υπολογισμό της αρχικής ενσωματωμένης ενέργειας και με κατάλληλους συντελεστές αντικατάστασης. Οι συντελεστές που χρησιμοποιήθηκαν προέκυψαν από αντίστοιχες μελέτες LCA. Έτσι, υπολογίζουμε την ενσωματωμένη ενέργεια που απαιτείται σε βάθος χρόνου, μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής. Σημειώνεται ότι στην ενέργεια σκυροδέματος που παρουσιάζεται συμπεριλαμβάνονται και οι οπλισμοί.

Υλικό	Μάζα(kg)	EE(MJ/kg)	RF	INITIAL EE (MJ)	RECURR ENT EE (MJ)	TOTAL EE (MJ)
Σκυρόδεμα C35/45	2.534.424	2,024	0	5.129.674	0	5.129.674
Σκυρόδεμα C30/37	1.610.832	2,024	0	3.260.324	0	3.260.324
Ασβεστοκονίαμα	403.974	0,97	1,5	391.854	587.782	979.636
Πολυστερίνη	3.481	88,6	1,1	308.416,6	339.258,3	647.674,9
Πολυουρεθάνη σε αφρό	5.248,2	102,1	1,1	535.841,2	589.425,3	1.125.267
Επικάλυψη Σκυροδέματος	458,92	0,66	2	302,8872	605,7744	908,6616
Περλιτόδεμα	97.434	0,66	2	64.306,44	128.612,9	192.919,3
Άσφαλτος	2.070,75	2,86	2	5.922,345	11.844,69	17.767,04
Πλακάκια Πορσελάνης	1.624	12,61	3	20.478,64	61.435,92	81.914,56
Παράθυρα	804(τεμάχια)	2310	1,5	1.857.240	2.785.860	4.643.100
Σύνολο 16.464.310,04 MJ						

Πίνακας 6-11: Υπολογισμός Ενσωματωμένης Ενέργειας κάθε υλικού του κτιρίου

Αθροίζοντας τις ενεργειακές επιβαρύνσεις του κάθε υλικού που χρησιμοποιήθηκε στην κατασκευή υπολογίζεται η συνολική επιβάρυνση του κτιρίου στο περιβάλλον σε όρους ενέργειας. Πιο αναλυτικά το σκυρόδεμα C35/45 που χρησιμοποιήθηκε στο σύνολο του φέροντα οργανισμού πλην των δαπέδων έδωσε την μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας της τάξης των 5.129.674 MJ. Στη συνέχεια τα υαλοπετάσματα έδωσαν κατανάλωση ενέργειας 4.643.100 MJ, καθώς ως κτίριο γραφείων καλύπτει όλη την εξωτερική του επιφάνεια, και το σκυρόδεμα των πλακών 3.260.324 MJ. Τα υλικά των μονώσεων και των επιχρισμάτων παρατηρούμε ότι συνεισφέρουν σε μικρότερο βαθμό αλλά σημαντικό ώστε να συμπεριληφθούν υπόψη. Η συνολική κατανάλωση ενέργειας των υλικών ανέρχεται στα 16.464.310,04 MJ. Το συνολικό εμβαδόν του κτιρίου είναι 3792m², επομένως υπολογίζεται κατανάλωση ενέργειας ανά τετραγωνικό ίση με $4,34 \times 10^3$ MJ/m².

6.6.2 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΕΚΠΟΜΠΩΝ CO₂

Οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα υπολογίζονται με ανάλογο τρόπο με την παραγόμενη ενέργεια. Χρησιμοποιείται η δεύτερη μέθοδος υπολογισμού που αναφέρθηκε στο θεωρητικό υπόβαθρο, δηλαδή πολλαπλασιάζουμε τις ποσότητες υλικών που υπολογίσαμε επί τους αντίστοιχους συντελεστές εκπομπών των υλικών, οι οποίοι επίσης λαμβάνονται από τη λίστα ICE DATA 2.0. Όπως και στην ενσωματωμένη ενέργεια, έτσι και στον εκπεμπόμενο διοξείδιο του άνθρακα οι συντελεστές της βάσης δεδομένων ICE αναφέρονται μόνο στις εκπομπές που απελευθερώνονται λόγω καύσης στο μέρος του κύκλου ζωής που αναφέρεται ως Gradle to Gate. Συνεπώς, λόγω έλλειψης δεδομένων δε λαμβάνονται υπόψη οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα που παράγονται ως αποτέλεσμα χημικών αντιδράσεων κατά τη διαδικασία της βιομηχανικής παραγωγής.

Υλικό	Μάζα(kg)	ECO ₂ (kgCO ₂ /kg)	CO ₂ EMISSION (kg)
Σκυρόδεμα C35/45	2.534.424	0,2022	512.460,5
Σκυρόδεμα C30/37	1.610.832	0,2022	325.710,2
Ασβεστοκονίαμα	403.974	0,146	58.980,204
Πολυστερίνη	3.481	2,55	8.876,55
Πολυουρεθάνη σε αφρό	5.248,2	4,06	21.307,69
Επικάλυψη Σκυροδέματος	458,92	0,03	13,7676
Περλιτόδεμα	97.434	0,03	2.923,02
Άσφαλτος	2.070,75	0,059	122,1743
Πλακάκια Πορσελάνης	1.624	0,74	1.201,76
Παράθυρα	804	118	94.872
Σύνολο			1.026.467,9 kgCO₂

Πίνακας 6-12: Υπολογισμός εκπεμπόμενου διοξειδίου του άνθρακα από κάθε υλικό του κτιρίου

Όπως και στην κατανάλωση ενέργειας αθροίζοντας τις εκπομπές CO₂ του κάθε υλικού που χρησιμοποιήθηκε παίρνουμε την συνολική επιβάρυνση του κτιρίου στο περιβάλλον σε όρους εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα. Πιο συγκεκριμένα το σκυρόδεμα C35/45 και C30/37 έδωσαν τις μεγαλύτερες εκπομπές της τάξης των 512.460,5 kgCO₂ και 325.710,2 kgCO₂. Μεγάλο ποσοστό προέκυψε ότι εκπέμπουν το ασβεστοκονίαμα και η πολυουρεθάνη της τάξης των 58.980,204 kgCO₂ και 21.307,69 kgCO₂ αντίστοιχα. Οι συνολικές εκπομπές του διοξειδίου του άνθρακα από τα κατασκευαστικά υλικά ανέρχονται στα 1.026.467,9 kgCO₂. Το συνολικό εμβαδόν του κτιρίου είναι 3792m² επομένως υπολογίζονται οι εκπομπές του διοξειδίου του άνθρακα ανά τετραγωνικό ίσες με 2,20 x 10² kgCO₂/m².

6.6.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΤΟΝ ΑΡΧΙΚΟ ΦΟΡΕΑ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΟ ΑΝΤΙΚΤΥΠΟ
Ακολουθώντας την ίδια διαδικασία υπολογίστηκε η συνολική ενέργεια που καταναλώνεται και οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα από τον αρχικό φορέα χωρίς την εφαρμογή βελτιστοποίησης, έτσι ώστε να διερευνηθεί σε τι ποσοστό μειώθηκαν.

Υλικό	Μάζα(kg)	TOTAL EE (MJ)	CO ₂ EMISSION (kg)
Σκυρόδεμα C35/45	2.853.600	5.775.686	576.997,92
Σκυρόδεμα C30/37	1.610.400	3.260.324	325.710,2
Ασβεστοκονίαμα	439.668	1.066.193	64.191
Πολυστερίνη	3.655,04	680.056,19	9.320,352
Πολυουρεθάνη σε αφρό	5.248,2	1.125.267	21.307,69
Επικάλυψη Σκυροδέματος	458,92	908,6616	13,7676
Περλιτόδεμα	97.434	192.919,3	2.923,02
Άσφαλτος	2.070,75	17.767,04	122,1743
Πλακάκια Πορσελάνης	1.624	81.914,56	1.201,76
Παράθυρα	804	4.643.100	94.872

Πίνακας 6-13: Ενσωματωμένη ενέργεια και εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα αρχικού φορέα

Υλικό	TOTAL EE (MJ) Initial Design	TOTAL EE (MJ) Optimized Design	Improvement %
Σκυρόδεμα C35/45	5.775.686	5.129.674	11%
Σκυρόδεμα C30/37	3.260.324	3.260.324	0
Ασβεστοκονίαμα	1.066.193	979.636	8,1%
Πολυστερίνη	680.056,19	647.674,9	5%
Πολυουρεθάνη σε αφρό	1.125.267	1.125.267	0
Επικάλυψη Σκυροδέματος	908,6616	908,6616	0
Περλιτόδεμα	192.919,3	192.919,3	0
Άσφαλτος	17.767,04	17.767,04	0
Πλακάκια Πορσελάνης	81.914,56	81.914,56	0
Παράθυρα	4.643.100	4.643.100	0
ΣΥΝΟΛΟ	16.844.136	16.079.158	5%

Πίνακας 6-14: Σύγκριση ενσωματωμένης ενέργειας αρχικού και βελτιστοποιημένου φορέα

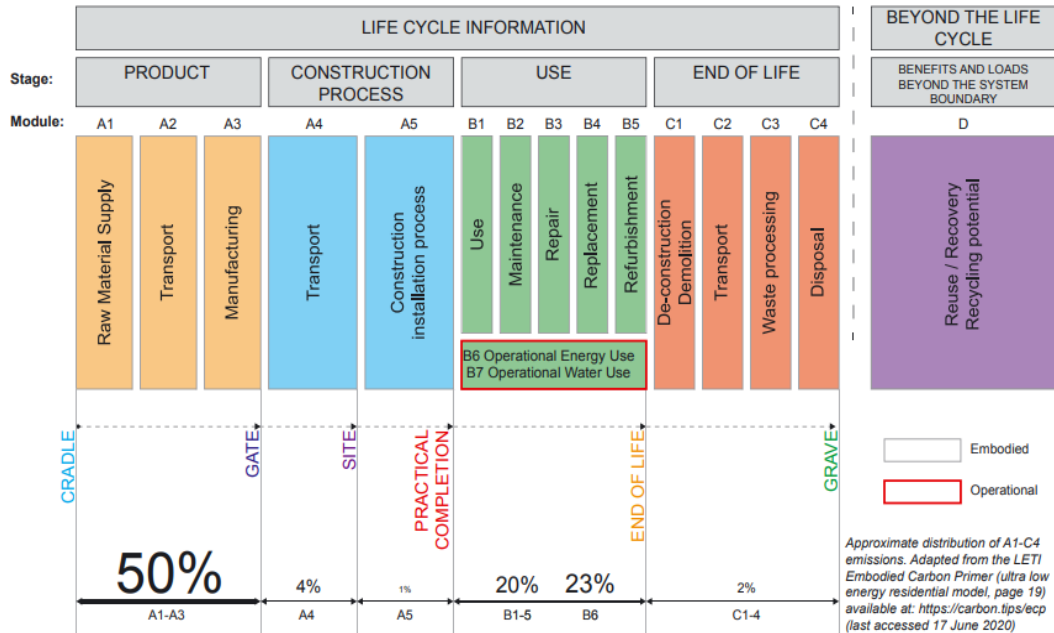
Υλικό	CO ₂ EMISSION(kg) Initial Design	CO ₂ EMISSION(kg) Optimized Design	Improvement %
Σκυρόδεμα C35/45	576.997,92	512.460,5	11%
Σκυρόδεμα C30/37	325.710,2	325.710,2	0
Ασβεστοκονίαμα	64.191	58.980,204	8,1%
Πολυστερίνη	9.320,352	8.876,55	5%
Πολυουρεθάνη σε αφρό	21.307,69	21.307,69	0
Επικάλυψη Σκυροδέματος	13,7676	13,7676	0
Περλιτόδεμα	2.923,02	2.923,02	0
Άσφαλτος	122,1743	122,1743	0
Πλακάκια Πορσελάνης	1.201,76	1.201,76	0
Παράθυρα	9.4872	9.4872	0
ΣΥΝΟΛΟ	1.096.660	1.026.467	6,4%

Πίνακας 6-15: Σύγκριση εκπεμπόμενου διοξειδίου του άνθρακα αρχικού και βελτιστοποιημένου φορέα

Συγκρίνοντας τις τιμές που προέκυψαν από τον αρχικό και το βελτιστοποιημένο φορέα (Πίνακας 6-15) είναι εμφανές ότι υπήρξε μείωση της κατανάλωσης ενέργειας και των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα σε ποσοστό 5% και 6,4% αντίστοιχα. Συνεπώς αναδεικνύεται η αξία της βελτιστοποίησης κατά τη μελέτη των κατασκευών, αφού επιφέρει σημαντική βελτίωση του περιβαλλοντικού αντικτύπου. Λόγω του σκυροδέματος, το οποίο αποτελεί και τη βασική πηγή εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα και κατανάλωσης ενέργειας σημειώθηκε βελτίωση 11% λόγω της βέλτιστης διαστασιολόγησης των διατομών των δομικών στοιχείων. Παρατηρούμε ότι παρουσιάστηκε και μία μικρή βελτίωση της περιβαλλοντικής συμπεριφοράς των μονωτικών υλικών και των επιχρησμάτων με ποσοστό 5% και 8,1% αντίστοιχα, οι οποίες οφείλονται στις μειώσεις των διατομών του φέροντα οργανισμού και άρα των στρωμάτων που τον περιβάλλουν. Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι η βέλτιστη και χωρίς σπατάλη χρήση υλικών έχει αφενός οικονομικό όφελος, αφετέρου περιβαλλοντικό.

6.6.4 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΕΚΠΟΜΠΩΝ CO₂ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ ΕΡΓΑΛΕΙΟΥ

Προκειμένου να υπολογίσουμε τις εκπομπές του διοξειδίου του άνθρακα σε ολόκληρο των κύκλο ζωής του έργου “Cradle to Grave” και να έχουμε συνολικότερη εικόνα χρησιμοποιήθηκε και το εργαλείο The Structural Carbon Tool, που έχει δημιουργηθεί από το Institution of Structural Engineers στο Ηνωμένο Βασίλειο με σκοπό τον υπολογισμό του ενσωματωμένου διοξειδίου του άνθρακα που εκπέμπεται στην ατμόσφαιρα καθ’ όλο τον κύκλο ζωής του κτιρίου. Μία αδυναμία που παρατηρήθηκε στο συγκεκριμένο εργαλείο είναι ότι η βάση δεδομένων του δεν περιέχει πολλά υλικά και ιδιαίτερα υλικά επιχρησμάτων. Μάλιστα για την μελέτη της συνεισφοράς των υλικών αυτών το εργαλείο προτείνει τη λίστα δεδομένων που χρησιμοποιήθηκε προηγουμένως, η οποία ωστόσο υπολογίζει το συντελεστή CO₂ μόνο στα στάδια A1-A3 (Gradle-Gate).



Εικόνα 6.36: Στάδια κύκλου ζωής όπου αποτιμώνται οι εκπομπές CO₂ από το εργαλείο *The Structural Carbon Tool*

Για να χρησιμοποιήσει ο χρήστης το εργαλείο αρχικά εισάγει κάποιες βασικές πληροφορίες του έργου. Συγκεκριμένα προσδιορίζει το υλικό, τις ποσότητες που θα χρησιμοποιηθούν και τον τύπο του δομικού στοιχείου. Στα κελιά του εργαλείου εισάγουμε το υλικό και τις ποσότητες κάθε δομικού στοιχείου που μετρήθηκαν από το Autodesk Revit σε μονάδες όγκου τόσο για τον αρχικό (Εικόνα 6.37) όσο και για το βελτιστοποιημένο φορέα (Εικόνα 6.38). Για στοιχεία σκυροδέματος υπάρχει η επιλογή για προσθήκη προκαθορισμένης ποσότητας οπλισμού ανάλογα με τον τύπο του δομικού στοιχείου ή μπορεί να εισαχθεί ξεχωριστά σε νέα γραμμή. Στη συνέχεια, το εργαλείο πολλαπλασιάζει τις ποσότητες με κατάλληλους συντελεστές CO₂, που λαμβάνονται από λίστα δεδομένων που διαθέτει το εργαλείο. Η λίστα αυτή είναι προσβάσιμη από το χρήστη σε ξεχωριστή καρτέλα (Custom Data) και είναι δυνατή η τροποποίηση τους καθώς και η προσθήκη νέων. Στη παρούσα εργασία παρά τη δυνατότητα λόγω έλλειψης δεδομένων δεν έγινε δυνατόν να προσδιοριστούν όλοι οι παράμετροι που χρειάζονταν και επομένως να υπολογιστεί η συνεισφορά όλων των υλικών που είχαν εισαχθεί στο τρισδιάστατο μοντέλο στο Autodesk Revit. Επομένως, έγινε εισαγωγή της ποσότητας σκυροδέματος που υπολογίστηκε και του γυαλιού, από το οποίο αποτελείται ο εξωτερικός τοίχος με υαλοπετάσματα.

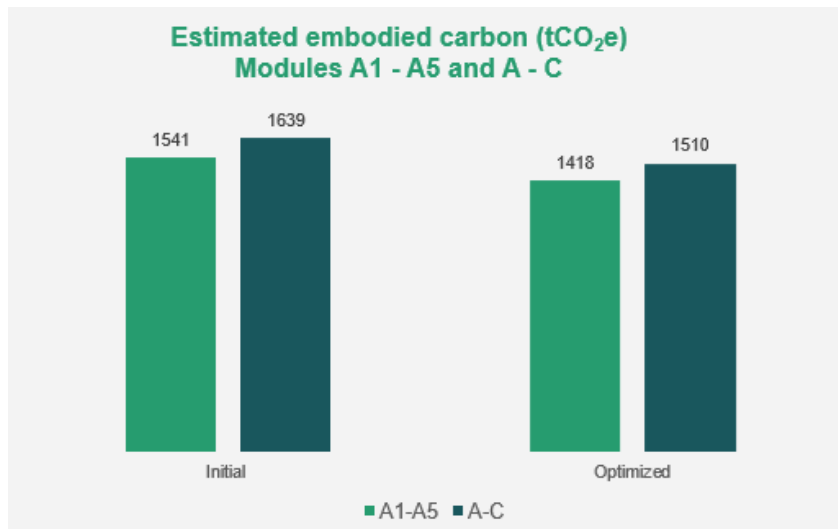
Element Embodied Carbon [tCO ₂ e]	A1-A3	A4	A5w	B4	C2-C4	D	Biogenic Carbon
523	446	21	26		30	-57	
663	564	23	33		43	-49	
88	75	4	4		4	-15	
40	35	2	2		1	-8	
177	162	4	9		2		

Εικόνα 6.39: Λεπτομέρεια περιβάλλοντος του εργαλείου *The Structural Carbon Tool*, όπου φαίνονται οι εκπομπές CO₂ σε κάθε στάδιο ζωής του κτιρίου

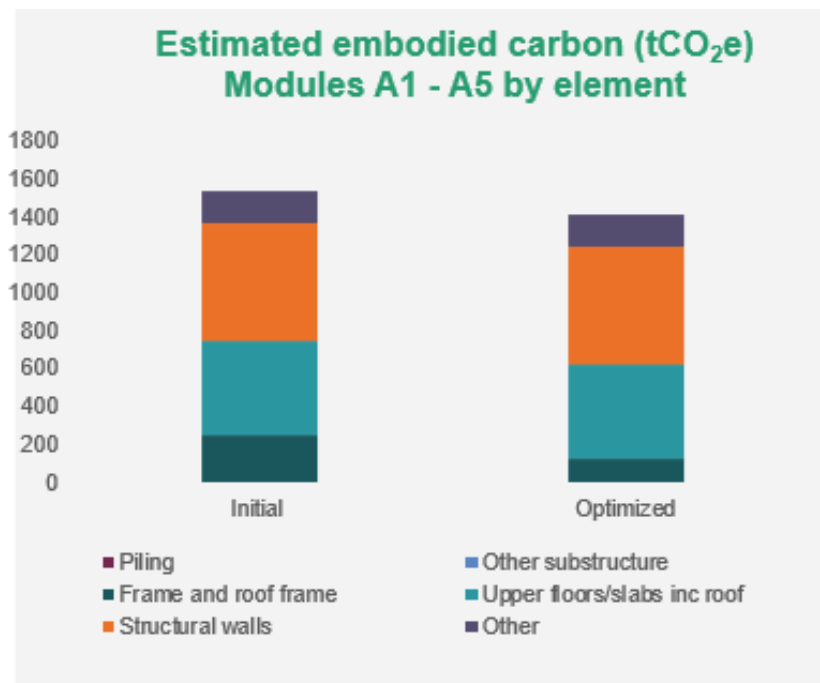
Το εργαλείο διαθέτει ένα επιπλέον στάδιο του κύκλου ζωής του έργου προκειμένου να παρέχει μία ευρύτερη εικόνα των περιβαλλοντικών επιπτώσεων του. Αυτό είναι το στάδιο που ονομάζει D και αναφέρεται σε τυχόν οφέλη πέρα από τον κύκλο ζωής του έργου που σχετίζονται με:

1. Ανακύκλωση υλικών π.χ. χρήση παλιοσιδήρου στη χαλυβουργία σε μελλοντικά έργα
2. Ενέργεια που ανακτάται από υλικά π.χ. ενέργεια που παράγεται από την αποτέφρωση ξυλείας
3. Πλήρη επαναχρησιμοποίηση υλικών σε σύγκριση με το τυποποιημένο προϊόν που θα αντικαθιστούσε

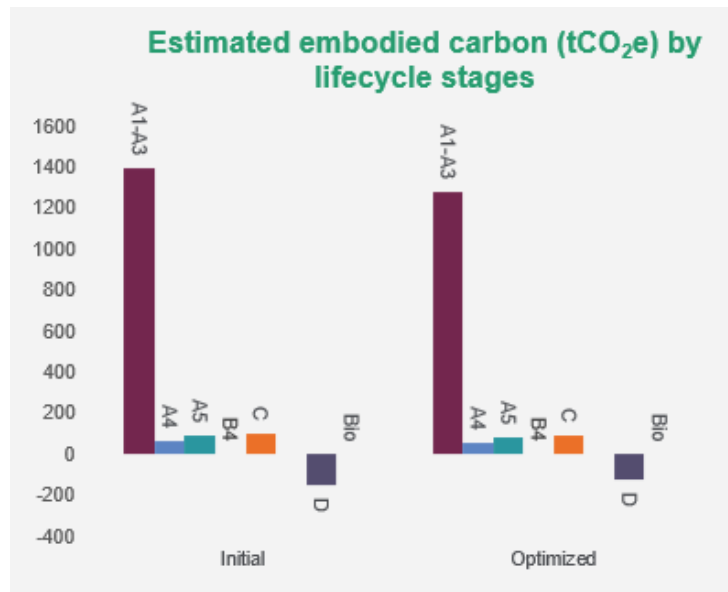
Τέλος, το εργαλείο βγάξει αποτελέσματα που αφορούν τις συνολικές εκπομπές και συγκρίνει την ποσότητα που εκλύεται από τον αρχικό φορέα και τον βελτιστοποιημένο. Συγκεκριμένα για τον αρχικό προέκυψαν εκπομπές 406 kgCO₂/m² στα στάδια A1-A5 και 432 kgCO₂/m² στα στάδια A-C οι οποίες μπορούν να μειωθούν με ενέργειες εξοικονόμησης και ανακύκλωσης στο στάδιο D κατά 40 kgCO₂/m². Αντίστοιχα για το βελτιστοποιημένο φορέα προέκυψαν εκπομπές 370 kgCO₂/m² στα στάδια A1-A5 και 394 kgCO₂/m² στα στάδια A-C οι οποίες μπορούν να μειωθούν στο στάδιο D κατά 33 kgCO₂/m². Εναλλακτικά όπως φαίνεται στην εικόνα 6.40 ο αρχικός φορέας εκπέμπει 1541tCO₂ ενώ ο βελτιστοποιημένος 1418 tCO₂, στα σταδια A1-A5,συνεπώς έχουμε μείωση σε ποσοστό περίπου 8%. Στα στάδια A-C προκύπτει βελτίωση κατά 7,8%. Επίσης, το εργαλείο με τα διαγράμματα που εξάγει δείχνει και ποιο στοιχείο της κατασκευής ευθύνεται σε μεγαλύτερο ποσοστό γι' αυτές τις εκπομπές(Εικόνα 6.41), πράγμα που βοηθάει το μελετητή να πάρει αποφάσεις για το σχεδιασμό του κτιρίου. Από τα διαγράμματα συμπεραίνουμε ότι η μείωση των διατομών των στοιχείων του φορέα είχε ως αποτέλεσμα να μειωθούν οι εκπομπές CO₂ στον βελτιστοποιημένο φορέα.



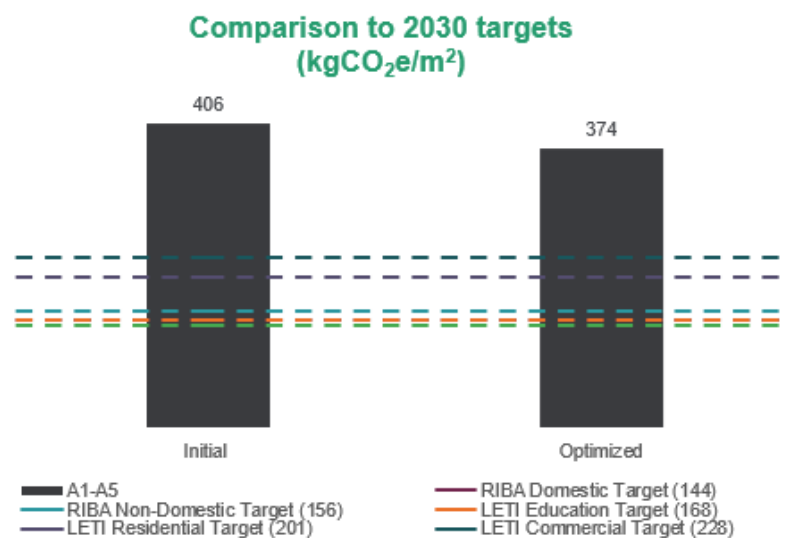
Εικόνα 6.40: Σύγκριση αρχικού και βελτιστοποιημένου φορέα από το εργαλείο The Structural Carbon Tool ως προς τον ενσωματωμένο άνθρακα



Εικόνα 6.41: Σύγκριση αρχικού και βελτιστοποιημένου φορέα από το εργαλείο The Structural Carbon Tool ως προς τον ενσωματωμένο άνθρακα ανά στοιχείο



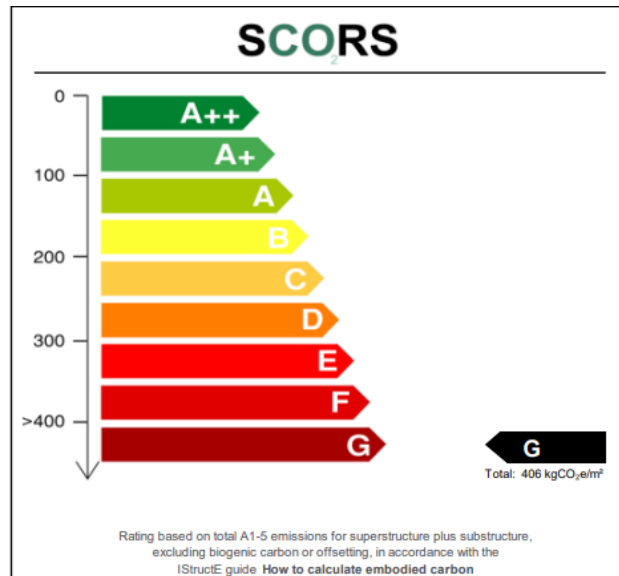
Εικόνα 6.42: Σύγκριση αρχικού και βελτιστοποιημένου φορέα από το εργαλείο The Structural Carbon Tool ως προς τον ενσωματωμένο άνθρακα ανά στάδιο του κύκλου ζωής του κτιρίου



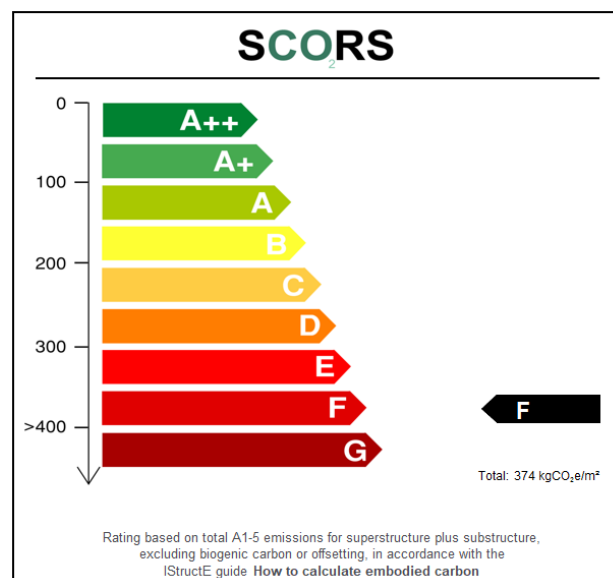
Εικόνα 6.43: Σύγκριση αρχικού και βελτιστοποιημένου φορέα από το εργαλείο The Structural Carbon Tool ως προς τον ενσωματωμένο άνθρακα με στόχους Leti και Riba

Προκειμένου ο χρήστης να έχει εικόνα πόσο ενεργειακά αποδοτικό είναι το κτιριακό μοντέλο που μελετά το εργαλείο προτείνει την κλίμακα SCORS, η οποία βάσει δεδομένων άνθρακα που χρησιμοποιεί μπορεί να συγκρίνει τις, υψηλής και χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα, σχεδιαστικές αποφάσεις. Επιπλέον το εργαλείο συγκρίνει την κλίμακα SCORS με στόχους που έχουν τεθεί από το Βασιλικό Ινστιτούτο των Βρετανών Αρχιτεκτόνων (RIBA) και η Πρωτοβουλία Μετασχηματισμού Ενέργειας του Λονδίνου (LETI), η οποία επιδιώκει να καταφέρει την κατασκευή κτιρίων μηδενικών εκπομπών CO₂. (Εικόνα 6.43) Σύμφωνα με το άρθρο Setting carbon targets: an introduction to the proposed SCORS rating scheme των μηχανικών Will Arnold, Mike Cook, Duncan Cox, Orlando Gibbons and John Orr η κατηγορία A++ της κλίμακας SCORS καθίσταται ρεαλιστική μόνο με την επαναχρησιμοποίηση υλικών.

Η κλίμακα SCORS εξαρτάται από τις εκτιμώμενες εκπομπές που υπολογίζονται στα στάδια A1-A5 που αναφέρθηκαν. Στη συνέχεια το συνολικό αποτύπωμα που υπολογίζεται στο στάδιο αυτό διαιρείται με την μεικτή εσωτερική επιφάνεια. Στο δεδομένο κτίριο ο αρχικός φορέας βρίσκεται στην κατηγορία G της κλίμακας SCORS, ενώ ο βελτιστοποιημένος είναι μια κατηγορία υψηλότερα στη F. Σύμφωνα με το παραπάνω άρθρο μέσα από έρευνες φαίνεται, ότι η πλειοψηφία των κτιρίων σήμερα βρίσκεται σε αυτή την κατηγορία και επισημαίνει ότι έως το 2030 τα τυπικά κτίρια θα πρέπει να καταφέρουν να φτάσουν κατηγορία A και έως το 2050 κατηγορία A++.



Εικόνα 6.44: Κατηγορία αρχικού φορέα στην κλίμακα SCORS



Εικόνα 6.45: Κατηγορία Βελτιστοποιημένου φορέα στην κλίμακα SCORS

7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

7.1 ΣΥΝΟΛΙΚΑ

Από την παραπάνω διερεύνηση προέκυψαν αρκετά σημαντικά συμπεράσματα. Αρχικά, διαπιστώθηκε ότι η Ανάλυση του Κύκλου Ζωής αποτελεί ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο για την περιβαλλοντική αξιολόγηση των κτιρίων, η οποία προσεγγίζεται είτε με όρους κατανάλωσης ενέργειας είτε εκπομπών CO₂. Στον κύκλο ζωής ενός κτιρίου, η φάση λειτουργίας καταλαμβάνει το μεγαλύτερο ποσοστό του. Ωστόσο η φάση κατασκευής καταλαμβάνει όλο και μεγαλύτερο ποσοστό και συνεπώς αξίζει να μελετηθεί και να εξαχθούν συμπεράσματα που θα μας οδηγήσουν σε ένα ενεργειακά αποδοτικότερο κτίριο.

Στο πλαίσιο αυτό οι μηχανικοί οφείλουν να δίνουν ιδιαίτερη προσοχή στο δομικό σχεδιασμό του κτιρίου. Η βελτιστοποίηση του δομικού σχεδιασμού οδήγησε σε καλύτερη περιβαλλοντική συμπεριφορά του κτιρίου. Φυσικά, όπως παρατηρήθηκε από τη βιβλιογραφία που μελετήθηκε υπάρχουν και άλλοι τρόποι βελτιστοποίησης του δομικού σχεδιασμού που πρέπει να διερευνηθούν από τους μελετητές, όπως η αλλαγή του δομικού συστήματος του κτιρίου, καθώς και η αλλαγή του υλικού κατασκευής (σκυρόδεμα ή μεταλλική). Η έρευνα έδειξε ότι στο μέλλον στη βελτίωση του περιβαλλοντικού αντικτύπου σημαντικό ρόλο θα παίξει η χρήση ανακυκλώσιμων υλικών αντί ακατέργαστων, που προσφέρουν μείωση στη συνολική ενέργεια.

Όσον αφορά τη βελτιστοποίηση ο μηχανικός- μελετητής οφείλει να προσδιορίζει σωστά την αντικειμενική συνάρτηση, τις παραμέτρους και τους περιορισμούς, ώστε να λειτουργεί ορθά ο αλγόριθμος και να λαμβάνει υπόψη του το υπολογιστικό κόστος. Με τον εύλογο περιορισμό των μεταβλητών εξασφαλίζεται περατότητα του αλγορίθμου και η βελτιωμένη λύση συγκλίνει στη βέλτιστη. Η εξασφάλιση των παραπάνω, επιτυγχάνεται με τον κατάλληλο ορισμό των ομαδοποιήσεων, των ορίων και του βήματος αναζήτησης ώστε ο χρόνος βελτιστοποίησης να μην ξεπερνά τις 2-3 ημέρες, για ένα ισχυρό υπολογιστικό μηχάνημα. Οι συγκεκριμένες τακτικές βελτιστοποίησης αφορούν τον αλγόριθμο που χρησιμοποιείται στην πλατφόρμα OCP.

Παράλληλα, με την ενασχόληση με την τεχνολογία BIM και το Revit, διαπιστώθηκε ότι η εφαρμογή επαναστατικών τεχνολογιών βελτιστοποιεί τις διαδικασίες. Αρχικά, επιτρέπει την δημιουργία ενός ολοκληρωμένου μοντέλου που περιέχει πληροφορίες και είναι δυνατόν να υπολογιστούν οι ακριβείς ποσότητες των υλικών, καθιστώντας έτσι της αξιολόγηση του ενσωματωμένου άνθρακα πιο ακριβής και αποτελεσματική. Επιπλέον, στην παρούσα διπλωματική αξιοποιήθηκε η δυνατότητα για σύνδεση και διαλειτουργικότητα μεταξύ λογισμικών, και συγκεκριμένα του στατικού προγράμματος Etabs και του αρχιτεκτονικού προγράμματος Revit, που υποστηρίζει η τεχνολογία BIM. Έτσι εξαλείφεται σημαντικά η ανάγκη για χειρωνακτική εισαγωγή δεδομένων και επιταχύνεται σημαντικά τη διαδικασία μελέτης της LCA.

Στην πορεία της εργασίας τα προβλήματα που παρουσιάστηκαν αφορούσαν κυρίως την έλλειψη αρκετών δεδομένων και τις διαφοροποιήσεις στις βάσεις δεδομένων για την αξιόπιστη υλοποίηση της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής. Οι περισσότερες λίστες δεδομένων, όπως και τα προγράμματα υπολογισμού της ενέργειας και του ενσωματωμένου άνθρακα είναι

διαθέσιμα υπό πληρωμή. Ωστόσο, τα εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν είναι διαδεδομένα και αξιόπιστα.

7.2 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία, αφορά την εφαρμογή βελτιστοποίησης για τη μείωση του όγκου του εξεταζόμενου κτιρίου και της τεχνολογίας BIM για τον υπολογισμό της ενσωματωμένης ενέργειας και του ενσωματωμένου άνθρακα κυρίως στη φάση κατασκευής. Υπάρχουν και άλλες πτυχές του οι οποίες θα ήταν ενδιαφέρον να μελετηθούν και να διερευνηθούν όπως:

- ✓ Ανάλυση άλλων τρόπων βελτιστοποίησης του αρχικού σχεδιασμού, όπως τα διαφορετικά δομικά συστήματα.
- ✓ Χρήση ανακυκλώσιμων υλικών ή δημιουργία νέων υλικών φιλικότερων προς το περιβάλλον.
- ✓ Εφαρμογή του BIM και της LCA σε όλη τη διάρκεια ζωής του έργου, μετά το τέλος της κατασκευής του.
- ✓ Εφαρμογή του BIM και LCA για εντοπισμό σφαλμάτων και διόρθωση λαθών σε υφιστάμενα κτίρια, εστιάζοντας έτσι στην επαναλαμβανόμενη ενσωματωμένη ενέργεια και τις διαδικασίες ανακατασκευής και ανακαίνισης.

8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Μ.Γ. Καρλαύτης, Ν.Δ. Λαγαρός (2010), Επιχειρησιακή Έρευνα και Βελτιστοποίηση για Μηχανικούς.
2. André Borrmann, Markus König, Christian Koch, Jakob Beetz (2018). Building Information Modeling. Technology Foundations and Industry Practice.
3. Lagaros, N. (2013). A general purpose real-world structural design optimization computing platform. *Structural Multidisciplinary Optimization*, 49(6), (1047-1066).
4. Oyeshola F. Kofoworola, Shabbir H. Gheewala (2009), Life Cycle Assessment of a typical office building in Thailand. *Energy and Buildings*, 41 (10), (1076-1083).
5. Young Sang Cho, Jeom Han Kim, Seong Uk Hong, Yuri Kim (2012), LCA application in the optimum design of high rise steel structures. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* ,16(5), (3146-3153).
6. Paolo Foraboschi, Mattia Mercanzin, Dario Trabucco (2014), Sustainable structural design of tall buildings based on embodied energy. *Energy and Buildings*, 68 (Part A), (254-269).
7. Xining Yang , Mingming Hu, Jiangbo Wu, Bin Zhao (2018), Building-information-modeling enabled life cycle assessment, a case study on carbon footprint accounting for a residential building in China. *Journal of Cleaner Production*, 183, (729-743).
8. Kamar Aljundi, Fernanda Rodrigues, Armando Pinto, Ana Cláudia Dias (2017), BIM-based LCA approach applied on a case study. Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa.
9. Kun Lu, Hongyu Wang (2019), Estimation of Building's Life Cycle Carbon Emissions Based on Life Cycle Assessment and Building Information Modeling: A Case Study of a Hospital Building in China. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 7, (147-165).
10. You, F., Hu, D., Zhang, H., Guo, Z., Zhao, Y., Wang, B., & Yuan, Y. (2011). Carbon emissions in the life cycle of urban building system in China-A case study of residential buildings. *Ecological Complexity*, 8(2), (201–212).
11. ISO. (2006). ISO 14044: Life cycle assessment — Requirements and guidelines. International Organization for Standardization.
12. Will Arnold, Mike Cook, Duncan Cox, Orlando Gibbons , John Orr (2020), Setting carbon targets: an introduction to the proposed SCORS rating scheme. IStructE: The Institution of Structural Engineers.
13. John Orr, Orlando Gibbons and Will Arnold (2020), A brief guide to calculating embodied carbon. IStructE: The Institution of Structural Engineers.
14. Inventory of Carbon & Energy (ICE) Version 2.0. (2011). 2nd ed. Sustainable Energy Research Team (SERT) Department of Mechanical Engineering University of Bath, UK.
15. Φαρμάκης, Δ. (2013). Building Information Modeling (BIM): Ορισμός, τα οφέλη και οι εφαρμογές. Ανακτήθηκε από την ηλεκτρονική διεύθυνση <http://www.b2green.gr>
16. Δημήτρης Μαυροκαπνίδης (2017), Βέλτιστος δομικός σχεδιασμός και ενεργειακή αξιολόγηση δομικών συστημάτων υψηλών κτιρίων. Προπτυχιακή Διπλωματική

Εργασία του τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου
Τομέας Δομοστατικής.

17. Θεοδωράκης Γεώργιος, Μπέρκη Ιωάννα (2016), Ανάλυση Κύκλου Ζωής Κτιριακών Κατασκευών και Βέλτιστος Δομικός Σχεδιασμός. Προπτυχιακή Διπλωματική Εργασία του τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου Τομέας Δομοστατικής.

