



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Σχολή Πολιτικών Μηχανικών

Τομέας Δομοστατικής

Ανάλυση Κύκλου Ζωής Κτιριακών Κατασκευών και Βέλτιστος Δομικός Σχεδιασμός

Επιμέλεια: Θεοδωράκης Γεώργιος, Μπέρκη Ιωάννα

Επιβλέπων καθηγητής: Λαγαρός Νικόλαος

Αθήνα, Ιούλιος 2016







## Ευχαριστίες

Με την ευκαιρία της ολοκλήρωσης των σπουδών μας, θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε θερμά τον κ. Νίκο Λαγαρό, καθηγητή της σχολής Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π. και επιβλέποντα της διπλωματικής μας εργασίας, για το ενδιαφέρον που έδειξε κατά την εκπόνηση της αλλά και για την πολύτιμη βοήθεια και συνεχή καθοδήγηση καθ'όλη τη διάρκεια της έρευνας.

Ακόμη, θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε ιδιαίτερα τους συμφοιτητές μας Καλλιόπη Αναγνωστάκη και Δημήτρη Κωνσταντιλιέρη για τις πολύτιμες συμβουλές που μας παρείχαν οι οποίες ήταν κρίσιμες για την πραγματοποίηση αυτής της διπλωματικής εργασίας.

Τέλος, θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τους φίλους μας και την οικογένεια μας για τη συμπαράσταση και την στήριξη που μας προσέφεραν σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μας.



## Περίληψη

Η Ανάλυση Κύκλου Ζωής αποτελεί πλέον ένα σημαντικό εργαλείο για τον προσδιορισμό των περιβαλλοντικών επιπτώσεων υλικών και προϊόντων. Είναι επίσης χρήσιμη για την εκτίμηση του αντίκτυπου που έχει μια κατασκευή στο περιβάλλον, κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής της. Ο Διεθνής Οργανισμός Προτύπων ορίζει λεπτομερώς τη διαδικασία εκτέλεσης μίας επίσημης Ανάλυσης Κύκλου Ζωής στην οποία τα υλικά, η κατασκευή, η χρήση του κτιρίου αλλά και η κατεδάφιση του ποσοτικοποιούνται σε ισοδύναμες μονάδες ενσωματωμένης ενέργειας και διοξειδίου του άνθρακα, παράλληλα με τον προσδιορισμό των πόρων που καταναλώνονται και των εκπομπών που απελευθερώνονται. Τα αποτελέσματα είναι χρήσιμα σε πολιτικούς μηχανικούς, αρχιτέκτονες, ανάδοχους έργων και ιδιοκτήτες οι οποίοι ενδιαφέρονται για την πρόβλεψη του περιβαλλοντικού αντίκτυπου της κατασκευής, καθ' όλη τη διάρκεια της ζωής της.

Παρά το γεγονός ότι έχουν ήδη πραγματοποιηθεί αρκετές Αναλύσεις Κύκλου Ζωής, σε διάφορα ήδη κατασκευών, λίγες από αυτές αφορούν κτίρια στην Ελλάδα. Η Ανάλυση Κύκλου Ζωής των ελληνικών κτισμάτων οφείλει να γίνει πιο κατανοητή ώστε να μπορεί να εφαρμοστεί σωστά και να αποτελέσει εργαλείο μείωσης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων του κατασκευαστικού τομέα. Επίσης για την επίτευξη του παραπάνω στόχου θα πρέπει να ξεπεραστεί ένα βασικό εμπόδιο στην πραγματοποίηση τέτοιων μελετών, το οποίο είναι η έλλειψη καταγεγραμμένων και έγκυρων δεδομένων, απαραίτητων για την διεξαγωγή μίας ολοκληρωμένης Ανάλυσης Κύκλου Ζωής.

Αυτή η διπλωματική εργασία στοχεύει στην ενίσχυση αυτής της προσπάθειας εξέλιξης του κατασκευαστικού τομέα και ανάπτυξης της οικολογικής συμπεριφοράς των κτιρίων. Αναλύεται λεπτομερώς η διαδικασία Ανάλυσης Κύκλου Ζωής κτιριακών και εφαρμόζεται ύστερα, εστιάζοντας στη φάση κατασκευής, με σκοπό την αποτύπωση του ενεργειακού αντίκτυπου και των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα που προκύπτουν από τα κατασκευαστικά υλικά, σε τρία σύνθετα κτιριακά μοντέλα . Σε συνέχεια της προσπάθειας εξυγίανσης των κτισμάτων πραγματοποιούνται τρία διαφορετικά είδη βελτιστοποιήσεων, με στόχο την μείωση της ενσωματωμένης ενέργειας των υλικών, των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα αλλά και του κόστους των υλικών της κάθε μίας από τις τρεις κατασκευές που αποτέλεσαν αντικείμενο μελέτης. Τα αποτελέσματα αυτής της διπλωματικής μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την βελτίωση και τυποποίηση της διαδικασίας μελέτης τυπικών κτιρίων όσον αφορά την περιβαλλοντική τους συμπεριφοράς.





# Abstract

Life Cycle Assessment is an important tool in determining the environmental impact of materials and products. It is also essential when addressing a construction's cumulative impact onto the environment during its life cycle. The International Organization of Standardisations defines in detail the execution process of a formal Life Cycle Assessment, during which the materials, the construction, the use of the building and its demolition are quantified into embodied energy and  $CO_2$  emissions equivalent units, while resource consumption and emission release are also analyzed. The results are useful particularly to architects, structural engineers, contractors and building owners who are interested in a building's environmental impact.

Although many Life Cycle Assessments have been performed on a range of structures, little to none of them are concerned with Greek buildings. The Life Cycle Assessment of Greek structures has to be understood better in order to be implemented correctly and reduce the construction sector's environmental output. For that to happen, the lack of recorded and valid data has to be addressed.

This thesis is aimed at aiding current advancements in the construction sector and its environmental impact. The Life Cycle Assessment process is analysed and applied to three complex building models, focusing on the emissions and energy consumption of the materials used. Consequently, for each building model, three different optimization techniques are implemented, in order to minimize emissions, embodied energy and cost of the materials. The results of this thesis can be effectively used in improving and standardizing the assessment process of buildings regarding their environmental impact.



# Περιεχόμενα

<b>1</b>	<b>Εισαγωγή</b>	<b>1</b>
1.1	Η έννοια της Ανάλυσης του Κύκλου Ζωής . . . . .	1
1.2	Ανάλυση Κύκλου Ζωής και Κατασκευές . . . . .	4
1.2.1	Κατασκευαστικός τομέας-Πληροφορίες . . . . .	4
1.2.2	Κατηγορίες κτιρίων . . . . .	7
1.2.3	Κατηγορίες Πόρων . . . . .	8
1.2.3.1	Αποδοτικότητα Πόρων . . . . .	8
1.3	Καθορισμός του προβλήματος και διάρθρωση της διπλωματικής εργασίας .	11
<b>2</b>	<b>Αξιολόγηση Κύκλου Ζωής (LCA) των δομικών υλικών</b>	<b>15</b>
2.1	Καθορισμός του στόχου και του πεδίου εφαρμογής της αξιολόγησης . . .	15
2.2	Εκτίμηση απογραφής κύκλου ζωής . . . . .	16
2.3	Αξιολόγηση των επιπτώσεων του κύκλου ζωής . . . . .	17
2.4	Ερμηνεία . . . . .	18
2.5	Αδύναμα σημεία της LCA . . . . .	19
2.5.1	Βιωσιμότητα και LCA . . . . .	19
2.5.2	Μεταβλητότητα της LCA . . . . .	20

<b>3 Βιβλιογραφική ανασκόπηση υφιστάμενων μελετών</b>	<b>21</b>
3.1 Μελέτη 1 . . . . .	23
3.2 Μελέτη 2 . . . . .	25
3.3 Μελέτη 3 . . . . .	28
3.4 Μελέτη 4 . . . . .	30
3.5 Μελέτη 5 . . . . .	35
3.6 Μελέτη 6 . . . . .	37
<b>4 Ανάλυση κύκλου ζωής ως προς τον ενεργειακό αντίκτυπο και τις εκπομπές του CO<sub>2</sub></b>	<b>39</b>
4.1 Στόχος και Πεδίο . . . . .	40
4.2 Ανάλυση Υλικών . . . . .	41
4.2.1 Σκυρόδεμα . . . . .	43
4.2.2 Χάλυβας . . . . .	45
4.2.3 Τούβλο . . . . .	46
4.2.4 Μονώσεις . . . . .	47
4.2.4.1 Ταξινόμηση θερμομονωτικών υλικών . . . . .	49
4.3 Ανάλυση ως προς τον ενεργειακό αντίκτυπο (LCEA) . . . . .	66
4.3.1 Μεθοδολογίες που ακολουθήθηκαν . . . . .	66
4.4 Εκπομπές CO <sub>2</sub> (LCCO <sub>2</sub> A) . . . . .	73
4.4.1 Εκπομπές ορυκτού άνθρακα . . . . .	74
4.4.2 Εκπομπές κατά την διαδικασία της βιομηχανικής παραγωγής . . . .	75
4.4.3 Εκπομπές κατά την φάση κατεδάφισης-απόθεσης αποβλήτων . . . .	77

<b>5</b>	<b>Εφαρμογή υπολογισμού <i>LCEA</i> , <i>LCCO<sub>2A</sub></i></b>	<b>79</b>
5.1	Δομικός σχεδιασμός στο SAP . . . . .	79
5.1.1	Μοντέλο 1 . . . . .	80
5.1.2	Μοντέλο 2 . . . . .	81
5.1.3	Μοντέλο 3 . . . . .	82
5.2	Δημιουργία βιβλιοθήκης διαθέσιμων υλικών . . . . .	83
5.3	Υπολογισμός απαιτούμενων ποσοτήτων υλικών . . . . .	85
5.4	Υπολογισμός ενσωματωμένης ενέργειας και εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα κατασκευαστικών υλικών . . . . .	92
<b>6</b>	<b>Βέλτιστος σχεδιασμός</b>	<b>103</b>
6.1	Επισκόπηση διαθέσιμων αλγορίθμων βελτιστοποίησης . . . . .	103
6.2	Διατύπωση του προβλήματος . . . . .	106
6.3	Εφαρμογές βελτιστοποίησης . . . . .	107
6.4	Εφαρμογή σεναρίων περιβαλλοντικής βελτιστοποίησης με χρήση MATLAB	115
6.5	Εφαρμογή βελτιστοποίησης με βάση το κόστος υλικών με χρήση του OCP	119
6.6	Παρουσίαση-Σύγκριση αποτελεσμάτων Βελτιστοποιήσεων . . . . .	121
<b>7</b>	<b>Βιβλιογραφία</b>	<b>129</b>



# Κατάλογος Σχημάτων

1.1	Τυπικό σύστημα Ανάλυσης Κύκλου Ζωής προϊόντος . . . . .	2
1.2	Ανάλυση κύκλου ζωής σύμφωνα με τα πρότυπα ISO . . . . .	4
1.3	Πρώτες Ύλεις που καταναλώθηκαν στις Ηνωμένες Πολιτείες, 1990-1995 .	5
1.4	Κατανομή Ευρωπαϊκών κτιρίων ανάλογα με το είδος τους, εξαιρούνται οι βιομηχανικοί χώροι . . . . .	7
2.1	The Three Pillars of Sustainability . . . . .	19
3.1	Σύγκριση του ενεργειακού αντίκτυπου κατά την φάση κατασκευής . . . .	26
3.2	Σύγκριση του ενεργειακού αντίκτυπου ανά φάση . . . . .	27
3.3	Διανομή της κατανάλωσης ενέργειας ανά φάση . . . . .	29
3.4	Κατανομή της initial embodied energy ανά υλικό . . . . .	30
3.5	Αποτελέσματα φάσης κατασκευής-Περιβαλλοντικός αντίκτυπος των τριών κτιρίων σύμφωνα με τις τρεις μεθόδους . . . . .	31
3.6	Φάση κατασκευής - Κατηγορίες αντίκτυπου για τα τρία κτίρια . . . . .	32
3.7	Φάση Λειτουργίας - Σύγκριση αντίκτυπου απαιτούμενων καταναλώσεων .	33
3.8	Ολοκληρωμένη LCA - Συνολικός αντίκτυπος συγκριτικά στα τρία κτίρια .	34
3.9	Παράγοντες που συμβάλουν στη διαφοροποίηση των αποτελεσμάτων . . .	36

3.10	Περιορισμοί των μελετών κύκλου ζωής . . . . .	37
3.11	Ενεργειακές απαιτήσεις και εκπομπές $CO_2$ στις φάσεις κατασκευής και λειτουργίας για τα δύο κτίρια . . . . .	38
4.1	Δεδομένα της χρήσης κατασκευαστικών υλικών στην Ευρωπαϊκή Ένωση, 2003-2011 . . . . .	41
4.2	Μέση ετήσια κατανάλωση κατασκευαστικών υλικών στην Ευρωπαϊκή Ένωση, 2006-2010 . . . . .	42
4.3	Αλλαγές στις χρήσεις των κατασκευαστικών υλικών στην Ευρωπαϊκή Ένωση, 2003-2011 . . . . .	43
4.4	Είδη τούβλου . . . . .	46
4.5	Είδη υαλοβάμβακα . . . . .	50
4.6	Πετροβάμβακας GEOLAN σε ρολό . . . . .	52
4.7	Πετροβάμβακας KNAUF σε πλάκα . . . . .	52
4.8	Πετροβάμβακας GEOLAN σε πλάκα . . . . .	52
4.9	Ορυκτοβάμβακας σε ρολό με και χωρίς αλουμίνιο . . . . .	53
4.10	Ορυκτοβάμβακας σε πλάκες . . . . .	53
4.11	Πλάκα αφρώδους γυαλιού . . . . .	55
4.12	Πλάκες Ξυλόμαλλου διαφορετικών πυκνοτήτων . . . . .	57
4.13	Πλάκες Φελλού . . . . .	58
4.14	Χυτή μόνωση φελλού . . . . .	58
4.15	Θερμομονωτικές πλάκες λιναριού . . . . .	60
4.16	Συσκευασμένες νιφάδες κυτταρίνης . . . . .	61
4.17	Πλάκα EPS . . . . .	63



4.18	Πλάκες XPS . . . . .	64
4.19	Δείγμα πλάκας πολυουρεθάνης . . . . .	65
4.20	Μέση ενεργειακή κατανάλωση των νοικοκυριών στην Ευρώπη . . . . .	69
4.21	Ενεργειακή ζήτηση τυπικού κτιρίου κατοικίας . . . . .	70
4.22	Ετήσιες εκπομπές $CO_2$ ανά κάτοικο στην Ευρώπη . . . . .	71
5.1	Μοντέλο 1 στο SAP2000 . . . . .	80
5.2	Μοντέλο 2 στο SAP2000 . . . . .	81
5.3	Μοντέλο 3 στο SAP2000 . . . . .	82
5.4	Τυπική διάταξη υλικών εξωτερικής τοιχοποιίας . . . . .	85
6.1	Κατηγορίες αλγορίθμων αναζήτησης και βελτιστοποίησης . . . . .	104
6.2	Εγκλωβισμός σε τοπική βέλτιστη λύση . . . . .	105
6.3	Θερμική αντίσταση εσωτερικής και εξωτερικής στρώσης αέρα . . . . .	112
6.4	Μέγιστες επιτρεπόμενες τιμές του συντελεστή θερμοπερατότητας διαφόρων δομικών στοιχείων . . . . .	113
6.5	Μέγιστες επιτρεπόμενες τιμές του συντελεστή διαπερατότητας κτιρίου . . . . .	114
6.6	Γράφημα αποτελεσμάτων βελτιστοποιήσεων Μοντέλου 1 . . . . .	126
6.7	Γράφημα αποτελεσμάτων βελτιστοποιήσεων Μοντέλου 2 . . . . .	126
6.8	Γράφημα αποτελεσμάτων βελτιστοποιήσεων Μοντέλου 3 . . . . .	126



# Κατάλογος Πινάκων

1.1	Ποσοστό των Υλικών που χρησιμοποιήθηκαν στις κατασκευές (κατοικίες, δημόσια και εμπορικά κτίρια αλλά όχι βιομηχανικά) στην Ευρώπη . . . . .	5
3.1	Περίληψη των εξεταζόμενων μελετών . . . . .	22
3.2	Περιβαλλοντικός αντίκτυπος κτιρίου γραφείων 50ετούς διάρκειας ζωής . . . . .	24
3.3	Σύγκριση του ενεργειακού αντίκτυπου ολοκληρωμένης ανάλυσης κύκλου ζωής . . . . .	26
5.1	Βιβλιοθήκη διαθέσιμων υλικών . . . . .	84
5.2	Υπολογισμός απαιτούμενων υλικών(kg) δομικών στοιχείων και τοιχοποιίας Μοντέλου 1 . . . . .	87
5.3	Υπολογισμός απαιτούμενων υλικών(kg) δαπέδων Μοντέλου 1 . . . . .	88
5.4	Υπολογισμός απαιτούμενων υλικών(kg) δομικών στοιχείων και τοιχοποιίας Μοντέλου 2 . . . . .	89
5.5	Υπολογισμός απαιτούμενων υλικών(kg) δαπέδων Μοντέλου 2 . . . . .	90
5.6	Υπολογισμός απαιτούμενων υλικών(kg) δομικών στοιχείων και τοιχοποιίας Μοντέλου 3 . . . . .	91
5.7	Υπολογισμός απαιτούμενων υλικών(kg) δαπέδων Μοντέλου 3 . . . . .	92
5.8	Υπολογισμός Embodied Energy Μοντέλου 1 . . . . .	94

5.9	Υπολογισμός $CO_2$ Emissions Μοντέλου 1 . . . . .	96
5.10	Υπολογισμός Embodied Energy Μοντέλου 2 . . . . .	97
5.11	Υπολογισμός $CO_2$ Emissions Μοντέλου 2 . . . . .	98
5.12	Υπολογισμός Embodied Energy Μοντέλου 3 . . . . .	99
5.13	Υπολογισμός $CO_2$ Emissions Μοντέλου 3 . . . . .	101
6.1	Τυπική διάταξη θερμοπρόσοψης . . . . .	111
6.2	Τυπική διάταξη εξωτερικών στοιχείων από σκυρόδεμα . . . . .	111
6.3	Σενάριο βελτιστοποίησης 1, $\min(EmbodiedEnergy)$ . . . . .	117
6.4	Σενάριο βελτιστοποίησης 2, $\min(CO_2Emissions)$ . . . . .	118
6.5	Σενάριο βελτιστοποίησης 3, $\min(MaterialCost)$ . . . . .	121
6.6	Τελικά ποσοστά των τριών σεναρίων βελτιστοποίησης ανά υλικό της κατασκευής 1 . . . . .	123
6.7	Τελικά ποσοστά των τριών σεναρίων βελτιστοποίησης ανά υλικό της κατασκευής 2 . . . . .	124
6.8	Τελικά ποσοστά των τριών σεναρίων βελτιστοποίησης ανά υλικό της κατασκευής 3 . . . . .	125





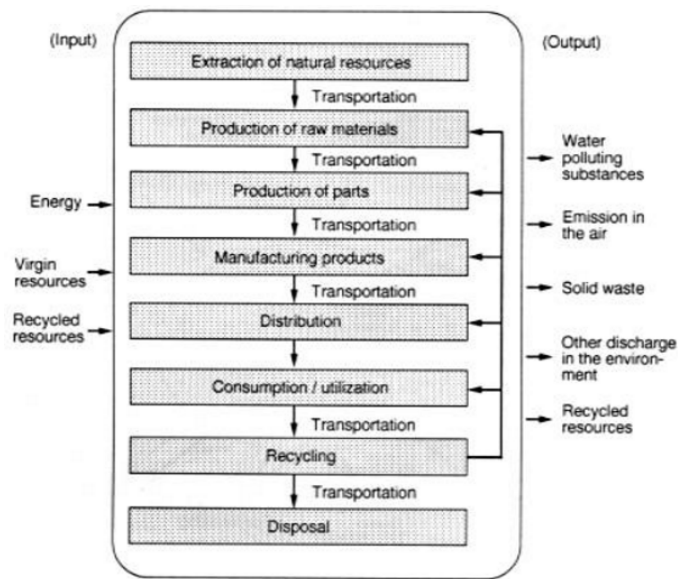
# Κεφάλαιο 1

## Εισαγωγή

### 1.1 Η έννοια της Ανάλυσης του Κύκλου Ζωής

Σε έναν κόσμο όπου οι πόροι αρχίζουν να σπανίζουν και οι κοινωνίες συνειδητοποιούν ότι οι ανέσεις της σύγχρονης ζωής έχουν σοβαρές επιπτώσεις στο περιβάλλον, γίνεται όλο και πιο σημαντική η ανάλυση μηχανολογικών σχεδίων και η ανεύρεση τρόπων μείωσης της περιβαλλοντικής επιβάρυνσης που προκαλείται από τον άνθρωπο. Η Ανάλυση του Κύκλου Ζωής, ή LCA, έχει γίνει αποδεκτό εργαλείο για την εκτέλεση αυτών των αναλύσεων και για την απάντηση σημαντικών ερωτημάτων σχετικά με τρέχοντα θέματα που απασχολούν το κοινό, όπως οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου.

Λαμβάνοντας το επίσημο όνομα της το 1991, η Ανάλυση Κύκλου Ζωής εξετάζει το πλήρες φάσμα των διαδικασιών που σχετίζονται με ένα προϊόν από την αρχή μέχρι το τέλος της ζωής του. Ο Διεθνής Οργανισμός Τυποποίησης (ISO) ορίζει τον κύκλο ζωής ενός προϊόντος ως ό,τι περιλαμβάνει την εξόρυξη και απόκτηση των πρώτων υλών, την χρήση, το τέλος της επεξεργασίας τους και την τελική διάθεσή τους. (ISO 140140:2006). Η ανάλυση περιλαμβάνει την εξέταση των εισροών και εκροών που συνδέονται με ένα προϊόν, κατά τη διάρκεια των παραπάνω βημάτων. Οι εισροές αφορούν τους πόρους που απαιτούνται για την παραγωγή και μεταφορά του προϊόντος, ενώ οι εκροές τις εκπομπές και τα απόβλητα που παράγει το προϊόν καθ'όλη τη διάρκεια της ζωής του. Αυτές οι ροές οργανώνονται στη σειρά των προαναφερθέντων φάσεων του κύκλου ζωής ενός προϊόντος (Σχήμα 1.1).



Σχήμα 1.1: Τυπικό σύστημα Ανάλυσης Κύκλου Ζωής προϊόντος

Η Ανάλυση Κύκλου Ζωής αναπτύχθηκε από ξεχωριστές μελέτες και κινήματα, σε πολλά μέρη του κόσμου, συμπεριλαμβανομένων των μεθόδων της “οικολογικής ισορροπίας” (ecobalances) και των “περιβαλλοντικών χαρακτηριστικών” (environmental profiles). Παρά το γεγονός ότι τότε δεν ονομαζόταν επίσημα Ανάλυση Κύκλου Ζωής, ένα από τα πρώτα παραδείγματα τέτοιας εργασίας εμπλεκόταν με την μελέτη των επιπτώσεων προϊόντων της Coca-Cola το 1969. Άλλες μεθοδολογίες, σχετικές με την μέτρηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, εξακολουθούν να υφίστανται αλλά έχουν συχνά διαφορετικούς στόχους από αυτούς της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η μέθοδος «environmental rucksack”, μέθοδος γνωστή στη Γερμανία, η οποία υπολογίζει τον περιβαλλοντικό αντίκτυπο ενός προϊόντος, σύμφωνα με τη μάζα όλων των υλικών που χρησιμοποιούνται ως εισροές και απαιτούνται καθ’όλη τη διάρκεια ζωής του, αφαιρώντας το βάρος του ίδιου του προϊόντος. Ωστόσο, η Ανάλυση Κύκλου Ζωής είναι ένα πιο ολοκληρωμένο εργαλείο, που δίνει πληροφορίες για πολλές περισσότερες πτυχές της επίδρασης ενός προϊόντος στο περιβάλλον και όχι μόνο για το υλικό εισροής.

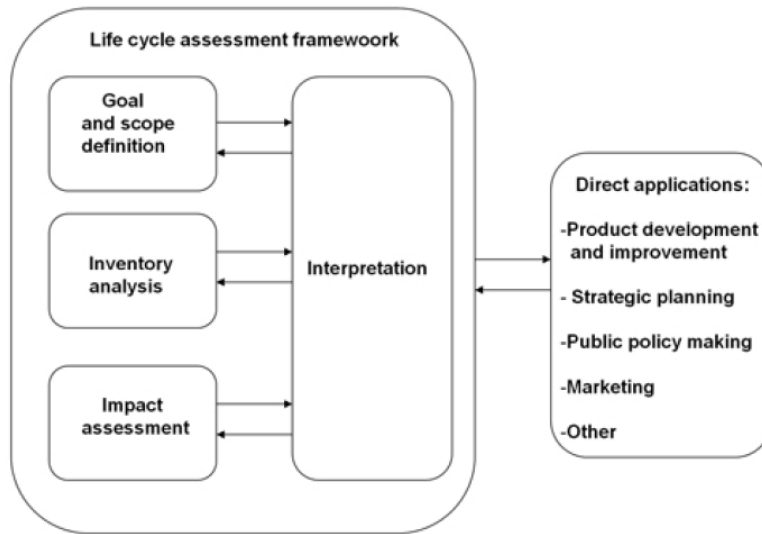
Στο Σχήμα 1.2 παρουσιάζεται η διαδικασία που ακολουθείται για την πραγματοποίηση μιας ολοκληρωμένης LCA, σύμφωνα με το ISO 14040 και 14044:2006. Η Ανάλυση Κύκλου Ζωής δεν ασχολείται μόνο με τη συλλογή στοιχείων αλλά και με την ερμηνεία τους. Οι ερευνητές μπορούν να εκπονήσουν μελέτες σχετικά με ορισμένες πτυχές του



περιβαλλοντικού αντίκτυπου ενός προϊόντος όπως οι εκπομπές του, η κατανάλωση ενέργειας του ή οι πρώτες ύλες που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή του. Ωστόσο, το πώς οι ερευνητές επιλέγουν να αξιολογήσουν τα αποτελέσματά τους, βασίζεται στον τύπο Ανάλυσης Κύκλου Ζωής που πραγματοποιούν. Υπάρχουν τρεις ευρείες κατηγορίες αναλύσεων:

- Stand-alone LCAs, οι οποίες χρησιμοποιούνται για την καλύτερη κατανόηση ενός μεμονωμένου προϊόντος και την επισήμανση οποιονδήποτε περιοχών του κύκλου ζωής του με ιδιαίτερα μεγάλο περιβαλλοντικό αντίκτυπο.
- Accounting LCAs, στις οποίες συγκρίνονται περισσότερα του ενός προϊόντα. Αυτές οι μελέτες πιθανότατα χρησιμοποιούνται είτε για την ανάδειξη της καλύτερης επιλογής είτε για την ανάδειξη του λιγότερο ανταγωνιστικού προϊόντος. Επιπρόσθετα, είναι χρήσιμες για την “ οικολογική σήμανση ” (eco-labeling) του προϊόντος, ώστε να βοηθήσουν το κοινό να κατανοήσει τη σημασία των καταναλωτικών του επιλογών.
- Change-oriented LCAs, οι οποίες πραγματοποιούνται με σκοπό τη μείωση του αντίκτυπου ενός ή περισσότερων προϊόντων στο περιβάλλον. Αυτός ο τύπος δεν αποτελεί απλά μια αρχική Ανάλυση Κύκλου Ζωής ενός υφιστάμενου προϊόντος αλλά ελέγχονται και εναλλακτικές επιλογές ώστε να διαπιστωθεί το πως αυτές επηρεάζουν, θετικά ή αρνητικά, τον περιβαλλοντικό αντίκτυπο του προϊόντος.

Μια Ανάλυση Κύκλου Ζωής μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε από βιομηχανίες είτε από φορείς χάραξης πολιτικών κυβερνήσεων αλλά και από ανεξάρτητους οργανισμούς ιδιωτικών ερευνών, με ποικίλους σκοπούς. Ακόμα, μπορεί να εφαρμοστεί θεωρητικά σε οποιοδήποτε προϊόν, υλικό ή κατασκευή. Ανάλογα με το που θα τεθούν τα όρια και ποιος θα είναι ο τελικός σκοπός του ερευνητή, μπορούν αφενός να αναγνωριστούν κατά την ανάλυση του σημαντικά κενά ή χειρισμοί σχετικά με τον κύκλο ζωής, αφετέρου να τονιστεί η μεγάλη διαφοροποίηση μεταξύ διαφορετικών LCAs, κοινών όμως προϊόντων. Περισσότερες πληροφορίες για την μεθοδολογία της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής δίνονται στο Κεφάλαιο 2.



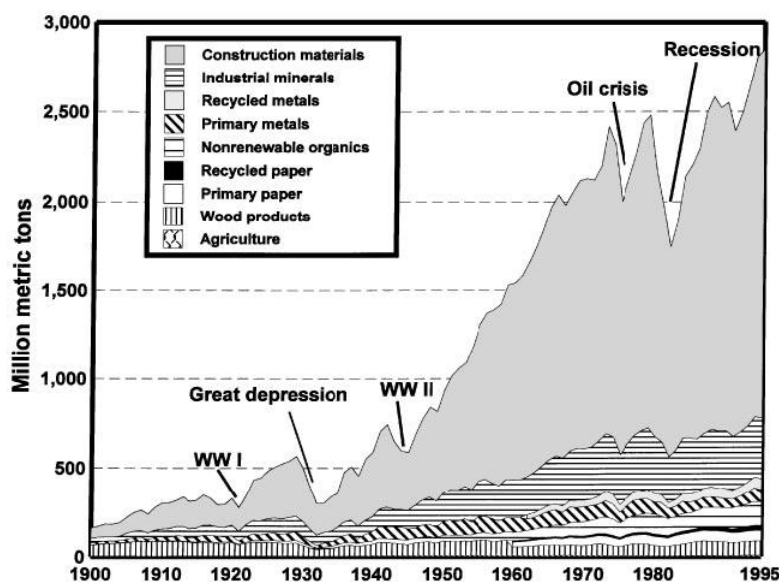
Σχήμα 1.2: Ανάλυση κύκλου ζωής σύμφωνα με τα πρότυπα ISO

## 1.2 Ανάλυση Κύκλου Ζωής και Κατασκευές

### 1.2.1 Κατασκευαστικός τομέας-Πληροφορίες

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται στον κατασκευαστικό τομέα αποτελούν ένα βασικό ποσοστό των πόρων που ο άνθρωπος χρησιμοποιεί σήμερα, παγκόσμια. Μέχρι τα τέλη του 20ου αιώνα, περίπου 75% της συνολικής κατανάλωσης υλικών στις Ηνωμένες Πολιτείες αντιστοιχούσε σε υλικά κατασκευών. Αξίζει να τονιστεί ότι το ποσοστό αυτό δεν περιλαμβάνει καν βιομηχανικά ορυκτά όπως το τσιμέντο που χρησιμοποιείται για την παραγωγή σκυροδέματος (Σχήμα 1.3). Αντίστοιχα, σύμφωνα με εκτιμήσεις των Ηνωμένων Εθνών, περίπου το 50% της συνολικής κατανάλωσης των πρώτων υλών στην Ευρώπη αντιστοιχεί σε υλικά κατασκευών (Πίνακας 1.1). Το Worldwatch Institute εκτιμάει ότι η παγκόσμια βιομηχανία κατασκευών είναι υπεύθυνη για την κατανάλωση του 40% της πέτρας, άμμου και χαλικιού, το 40% της ενέργειας και το 16% του νερού που καταναλώθηκε παγκόσμια το 1999. Τα κτίρια, κατά τη διάρκεια της ζωής τους, καταναλώνουν τη μισή ενέργεια από αυτή που καταναλώνεται συνολικά στην Ευρωπαϊκή Ένωση και παράγουν τις μισές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα από αυτές που παράγονται ετησίως. Αν και ο χάλυβας είναι σε μεγάλο βαθμό ανακυκλώσιμος, συνοδεύεται από μεγάλες απαιτήσεις σε όρους ενέργειας. Από την άλλη κατασκευαστικά

υλικά όπως το σκυρόδεμα, τα οποία είναι πιο δύσκολο να ανακυκλωθούν, αποτελούν ουσιαστικά μη ανανεώσιμες πηγές, με αποτέλεσμα να συνεισφέρουν περισσότερο στην αύξηση της συνολικής κατανάλωσης υλικών στις κατασκευές.



Σχήμα 1.3: Πρώτες Ύλες που καταναλώθηκαν στις Ηνωμένες Πολιτείες, 1990-1995

Υλικό	Ποσοστό υλικών που χρησιμοποιήθηκαν στις κατασκευές επί των συνολικών καταναλώσεων	Πηγές Δεδομένων
Αλουμίνιο	25%	PRODCOM
Τούβλα	70%	PRODCOM
Άργιλος	70%	PRODCOM
Σκυρόδεμα	75%	PRODCOM
Χαλκός	35%	PRODCOM
Γυαλί	65.6%	PRODCOM and Glassforeurope
Αδρανή (Άμμος και χαλίκι)	65%	PRODCOM
Πέτρα	34.5%	ODYSSEE
Χάλυβας	21%	PRODCOM
Ξύλο	37.5%	FAOSTAT

Πίνακας 1.1: Ποσοστό των Υλικών που χρησιμοποιήθηκαν στις κατασκευές (κατοικίες, δημόσια και εμπορικά κτίρια αλλά όχι βιομηχανικά) στην Ευρώπη

Με στόχο της σταθεροποίησης της Ευρωπαϊκής οικονομίας, ύστερα από μία πολυετή

παγκόσμια οικονομική κρίση, αλλά και την ίδρυση ενός οράματος για την Οικονομία των Ευρωπαϊκών Αγορών, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή πρότεινε, τον Μάρτιο του 2010, το «Europe 2020», μία 10ετή στρατηγική με προτεραιότητα την έξυπνη και Βιώσιμη ανάπτυξη. Μία από τις ναυαρχίδες της ατζέντας του «Europe 2020» είναι η Πρόταση η οποία σχετίζεται με την απόδοση των πόρων, Renewable Energy Road Map (RERM), η οποία εκδόθηκε τον Σεπτέμβριο του 2011. Βασιζόμενη σε όλη την προηγούμενη νομοθεσία, η Πρόταση RERM υπογραμμίζει τις κατασκευές ως έναν από τους 3 τομείς-κλειδιά στην επιτυχία αυτού του οράματος. Τονίζει την καλύτερη κατασκευή και χρήση των κτιρίων ως βασικό μέσο εξοικονόμησης πόρων. Συγκεκριμένα, αναφέρεται πως η σχετική πολιτική θα επηρέαζε το 45% της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας, το 35% των συνολικών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, το 50% των εξαγόμενων υλικών και την κατανάλωση νερού με εξοικονόμηση έως και 30%.

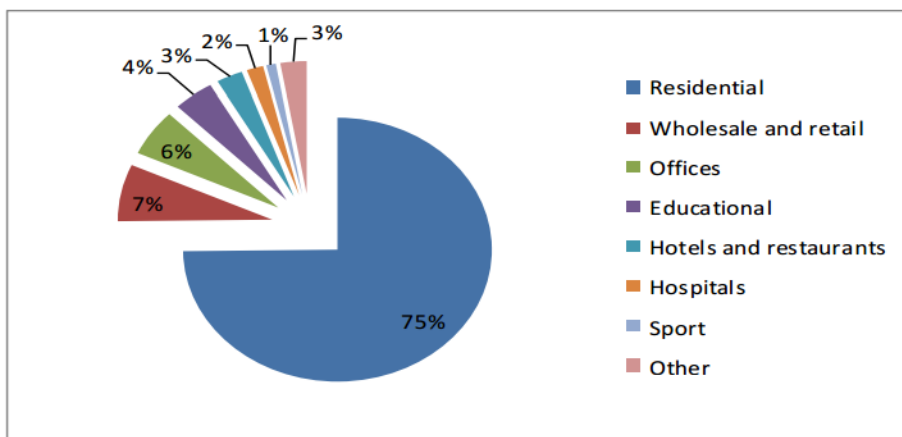
Λόγω των πολυάριθμων καινοτομιών, οι οποίες κατάφεραν να μειώσουν σημαντικά την κατανάλωση ενέργειας κατά τη φάση λειτουργίας (operating energy) ενός κτιρίου, η ανάγκη για αντίστοιχες καινοτομίες στη φάση κατασκευής γίνεται όλο και πιο έντονη. Για τον λόγο αυτό είναι ουσιώδης η περαιτέρω διερεύνηση και μείωση της ενσωματωμένης στην κατασκευή ενέργειας, δηλαδή αυτής που αντιστοιχεί στην κατασκευή και στα υλικά του κτιρίου (embodied energy), η οποία αποτελεί ολόένα και μεγαλύτερο ποσοστό της ολικής. Ένας τρόπος για να επιτευχθεί αυτό είναι η αλλαγή του δομικού συστήματος του κτιρίου ώστε να χρησιμοποιούνται διαφορετικά ή και λιγότερα κατασκευαστικά υλικά. Η Ανάλυση Κύκλου Ζωής είναι ένα βασικό εργαλείο για κάθε Πολιτικό Μηχανικό ώστε να γίνει κατανοητό το πόσο αυτός μπορεί να συνεισφέρει στη μείωση της ενσωματωμένης ενέργειας κάθε κατασκευής. Η Ανάλυση Κύκλου Ζωής μπορεί να οδηγήσει σε παραδειγματικές μεταβολές του δομικού σχεδιασμού, ικανές να επιφέρουν σημαντικές βελτιώσεις στην κατανάλωση ενέργειας και στις εκπομπές της κατασκευής.

Οι μελέτες Ανάλυσης Κύκλου Ζωής συνήθως εστιάζουν είτε σε κτίρια κατοικιών είτε σε κτίρια εμπορικής χρήσης. Λόγω της διαφοροποίησης αυτών των δύο ειδών κτιρίων τόσο ως προς τον δομικό σχεδιασμό όσο και ως προς τις καταναλώσεις ενέργειας, είναι κομβικό κάθε ένα από τα δύο είδη να μελετάται ξεχωριστά. Επίσης μία σημαντική διαφοροποίηση των αντικειμένων μελέτης αφορά τα υλικά τους. Λόγω του ότι το σκυρόδεμα, ο χάλυβας αλλά και το ξύλο είναι τα υλικά που κατά βάση χρησιμοποιούνται στις κατασκευές, υπάρχει μια μεγάλη διαφωνία μεταξύ των ερευνητών σχετικά με το ποιο υλικό είναι το φιλικότερο στο περιβάλλον. Οι βιομηχανίες σκυροδέματος και χάλυβα

ανταγωνίζονται για την αναγνώριση των υλικών τους σαν την πιο βιώσιμη επιλογή. Ωστόσο η έρευνά τους επί του θέματος δεν μπορεί να κριθεί απαραίτητα ως αντικειμενική. Μία ματιά στο εύρος των μελετών που έχουν διεξαχθεί σε κατασκευές έως τώρα, αποκαλύπτει εύκολα προκαταλήψεις, αποκλίσεις στα δεδομένα και ανεξήγητα αποτελέσματα. Συγκεκριμένα για τα εμπορικά οικοδομήματα, τα αποτελέσματα είναι ακόμα λιγότερο αξιόπιστα, λόγω και της έλλειψης μελετών ικανών να συγκριθούν μεταξύ τους. Το κλασικό ερώτημα «σκυρόδεμα ή χάλυβας» απαιτεί μεγαλύτερη έρευνα έως ότου μπορέσει να απαντηθεί με σιγουριά.

## 1.2.2 Κατηγορίες κτιρίων

Τα βιομηχανικά κτίρια αποτελούν λιγότερο από το 1% του κατασκευαστικού κορμού της Ευρωπαϊκής Ένωσης και λιγότερο του 11% της συνολικής επιφάνειας. Επιπλέον η μεγάλη ποικιλία στη χρήση και στις απαιτήσεις απόδοσης, κάνει τις βιομηχανικές εγκαταστάσεις, αδύνατες να ακολουθήσουν μία συγκεκριμένη πολιτική. Η κατηγορία των κατοικιών περιλαμβάνει μονοκατοικίες, πολυκατοικίες αλλά και υψηλά κτίρια ενώ ως εμπορικά κτίρια χαρακτηρίζονται αυτά που περιλαμβάνουν γραφεία, αποθήκες ή/και καταστήματα λιανικής πώλησης. Όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.4, οι κατοικίες αφορούν ένα 75% του συνόλου των κτιρίων ενώ τα εμπορικά κτίρια έρχονται δεύτερα με μόλις 7% επί του συνόλου. Σύμφωνα με εκτιμήσεις της Ευρωπαϊκής Επιτροπής 12% των κτιρίων είναι δημόσια και 88% ιδιωτικά.



Source: Ecorys, Ecofys and BioIntelligence (2010)<sup>7</sup>.

Σχήμα 1.4: Κατανομή Ευρωπαϊκών κτιρίων ανάλογα με το είδος τους, εξαιρούνται οι βιομηχανικοί χώροι

### 1.2.3 Κατηγορίες Πόρων

Στα πλαίσια της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής θεωρούνται οι παρακάτω πόροι, για το σύνολο των χωρών της Ευρωπαϊκής Ένωσης, όσον αφορά τη γεωγραφική κάλυψη (ωστόσο παρουσιάζονται στοιχεία και για άλλες Ευρωπαϊκές χώρες):

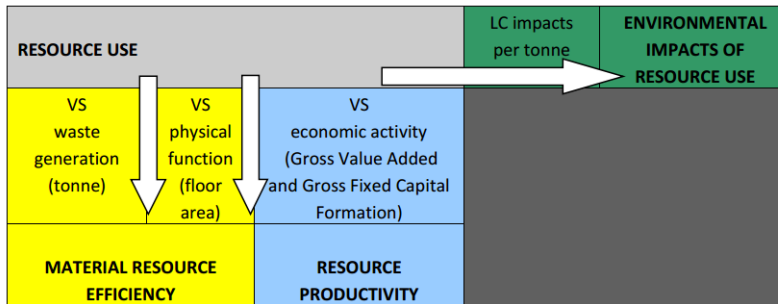
- Υλικά - συμπεριλαμβανομένων μετάλλων, ορυκτών, σκυροδέματος και ξύλου που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή.
- Ενέργεια και οι σχετικές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου - αυτή είναι η ενέργεια που καταναλώνεται και συνδέεται με την εξόρυξη των υλικών, την κατασκευή των δομικών προϊόντων της κατασκευής, την ίδια τη φάση κατασκευής, την κατεδάφιση, αλλά και την ενέργεια που χρησιμοποιείται απ' ευθείας κατά τη διάρκεια της φάσης χρήσης ενός κτιρίου.
- Νερό - αυτό σχετίζεται με τον πλήρη κύκλο, αλλά κυρίως με τη χρήση του νερού σε κτίρια. Ωστόσο, οι ποσοτικοί προσδιορισμοί έχουν αποκλειστεί, μετά από ενδελεχή έρευνα των υφισταμένων ερευνών, λόγω του υψηλού επιπέδου αβεβαιότητας σχετικά με τα στοιχεία.
- Γη - άμεση χρήση της γης.
- Επιπτώσεις που σχετίζονται με τη βιοποικιλότητα.

#### 1.2.3.1 Αποδοτικότητα Πόρων

Η αποδοτικότητα των πόρων (Resource Efficiency) μεταφράζεται πρακτικά ως η γενική αρχή που στοχεύει στην αποδοτική και βιώσιμη χρήση των πόρων και στην ελαχιστοποίηση του αντίκτυπου στο περιβάλλον. Η αποδοτικότητα των πόρων, με δεδομένο ότι κινούμαστε προς την κατεύθυνση του βιώσιμου σχεδιασμού των κτιρίων, μεταφράζεται λοιπόν ως μια ευρεία έννοια που επικεντρώνεται στη μείωση της χρήσης των πόρων και στον περιορισμό των περιβαλλοντικών συνεπειών καθ' όλη τη διάρκεια ζωής του κτιρίου.

<b>RESOURCE EFFICIENCY</b>
<b>Resource use</b> – how much is used?
<b>Material resource efficiency</b> – how much resources are used for achieving the desired purpose?
<b>Resource productivity</b> – how much economic output is produced from certain resource inputs?
<b>Environmental impacts of resource use</b> – what are the environmental impacts associated with the use of resources?

Προκειμένου να αντιμετωπιστούν οι σημαντικότερες πτυχές, όπως αυτές προσδιορίζονται από την αποδοτικότητα των πόρων, ακολουθείται η ίδια λογική και στη δημιουργία κατάλληλων δεικτών:



Ως εκ τούτου οι βασικές μεταβλητές για τη δημιουργία των κύριων αυτών δεικτών, θα περιλαμβάνουν τα εξής:

- Χρήση πόρων και υλικών (τόνοι).
- Περιβαλλοντικές επιπτώσεις της χρήσης των πόρων.
- Εμβαδόν ( $m^2$ ) – όπως προβλέπεται από την αρμόδια υπηρεσία.
- Παραγωγή αποβλήτων (τόνοι).
- Ακαθάριστη Προστιθέμενη Αξία ( ΑΠΑ-εκατομμύρια ευρώ) και Ακαθάριστες Επενδύσεις Πάγιου Κεφαλαίου ( ΑΕΠΚ- εκατομμύρια ευρώ).

**Χρήση των Πόρων (Resource Use)** Η χρήση των πόρων (Resource Use), που συνδέονται με τα κτίρια, γίνεται κατ' αρχήν κατανοητή ως η μάζα (συνήθως εκφρασμένη μέσω φυσικών μονάδων) των πόρων εισροής (πχ τόνοι χαλκιού) που εξάγονται. Επιπλέον,

χρησιμοποιείται για την κάλυψη τυχόν εκροών που δημιουργούν κάποιου είδους επιβάρυνση στις φυσικές λειτουργίες της κατασκευής (πχ τόνοι εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, ποσότητες παραγόμενων αποβλήτων). Από αυτή την άποψη, οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις εξαιρούνται από τον ορισμό αυτό και αναλύονται παρακάτω.

**Αποδοτικότητα των Υλικών (Material Resource Efficiency)** Ο όρος αυτός (Material resource efficiency) χρησιμοποιείται για να περιγράψει την αποδοτικότητα συγκεκριμένων υλικών που λειτουργούν ως πόροι. Τυπικά αυτή είναι η διαδικασία σύγκρισης των πόρων που εισάγονται με τις εκροές του συστήματος, όπως εκπομπές ή απόβλητα, είτε σύγκρισης των πόρων με κάποιο ορισμένο φυσικό μέγεθος που παρέχεται, όπως τόνοι υλικού που χρησιμοποιούνται ανά  $m^2$  που κατασκευάζεται. Ως εκ τούτου, ο εν λόγω δείκτης δεν συνδέεται άμεσα με τις οικονομικές απολαβές και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις, τα οποία διαχωρίζονται και εξηγούνται παρακάτω.

**Παραγωγικότητα Πόρων (Resource Productivity)** Ως παραγωγικότητα πόρων (Resource Productivity) ορίζεται η οικονομική απόδοση που προκύπτει από ορισμένες δραστηριότητες και μετράται με βάση τη χρήση πόρων που πραγματοποιήθηκε. Αυτός ο όρος περιγράφει την οικονομική αξία που παράγεται από κάθε ορισμένη ποσότητα πόρων που χρησιμοποιήθηκαν στην κατασκευή. Η παραγωγικότητα πόρων είναι χρήσιμη αφενός για να δημιουργήσει μία σύνδεση μεταξύ των οικονομικών και περιβαλλοντικών πτυχών της χρήσης των πόρων, αφετέρου για να αποδείξει πρακτικά ότι υλικά με παρόμοια τεχνική αποδοτικότητα (όπως αυτή ορίστηκε παραπάνω) μπορούν να δημιουργήσουν διαφορετική οικονομική αξία.

**Περιβαλλοντικές επιπτώσεις της χρήσης πόρων στα διάφορα στάδια του κύκλου ζωής της κατασκευής (Environmental Impacts of Resource Use)** Ο κύκλος ζωής της κατασκευής εκτείνεται από την εξαγωγή των απαραίτητων πρώτων υλών έως την καταστροφή του κτιρίου και συνεπώς την απόθεση των υλικών ως απόβλητα ή την επαναχρησιμοποίησή τους. Κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής μίας κατασκευής πόροι χρησιμοποιούνται και δημιουργούνται περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις (οποιοδήποτε είδους) ενός πόρου που χρησιμοποιείται, ορίζονται ως οι ποσοτικοποιημένες συνέπειες που συνδέονται με την πραγματική χρήση αυτού. Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις της χρήσης των υλικών σε κτίρια μελετώνται στα



διάφορα στάδια του κύκλου ζωής τους, ξεκινώντας από το αρχικό στάδιο της εξόρυξης των υλών, συνεχίζοντας μέσα από τα επόμενα στάδια της επεξεργασίας τους, της παραγωγής των δομικών προϊόντων, της μεταφοράς, της ίδιας της κατασκευής του κτιρίου (συμπεριλαμβανομένων πιθανών διαδικασιών ανακαίνισης και συντήρησης) και τελικά του σταδίου της ενδεχόμενης κατεδάφισης του και συνεπώς της απόθεσης ή επαναχρησιμοποίησης των υλικών. Κάθε ένα από αυτά τα στάδια έχει και ένα σχετικό αντίκτυπο στο περιβάλλον. Παρά το γεγονός ότι, στην ιδανική περίπτωση, οι επιπτώσεις θα πρέπει να περιγράφονται με βάση πληροφορίες ή σύνθετη μοντελοποίηση της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (πχ επιπτώσεις των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου στην αλλαγή του κλίματος), συχνά μία καλύτερη προσέγγιση μπορεί να είναι και η μέτρηση της πραγματικής – πραγματοποιούμενης επιβάρυνσης (πχ χρησιμοποιώντας συνολικές εκπομπές ισοδύναμου  $CO_2$  για την ποσοτικοποίηση των επιπτώσεων).

### 1.3 Καθορισμός του προβλήματος και διάρθρωση της διπλωματικής εργασίας

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε αρχικά ο περιβαλλοντικός αντίκτυπος των υλικών τριών κτιρίων, σε όρους ενέργειας (*LCEA*) και εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (*LCCO<sub>2</sub>A*). Σε δεύτερη φάση πραγματοποιήθηκαν τρεις βελτιστοποιήσεις. Η πρώτη έγινε με βάση το κόστος των υλικών των δομικών στοιχείων (υποστυλώματα, δοκάρια) με μεταβλητές τις διαστάσεις των διατομών τους. Η δεύτερη και η τρίτη βασίστηκαν στο πρώτο αντικείμενο μελέτης της διπλωματικής, δηλαδή στην *LCEA* και στην *LCCO<sub>2</sub>A*. Σε αυτό το στάδιο λήφθηκαν ως μεταβλητές τα χαρακτηριστικά μόνωσης του κτιρίου και η βελτιστοποίηση πραγματοποιήθηκε με βάση την ελαχιστοποίηση των ενεργειακών καταναλώσεων και των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα. Στόχος των συγκεκριμένων βελτιστοποιήσεων είναι κυρίως να επιτευχθεί μια βαθύτερη κατανόηση της σύγκρισης μεταξύ κόστους κατασκευής και περιβαλλοντικού κόστους και της ανάγκης στο να δίνεται έμφαση και στους δύο αυτούς παράγοντες συνδυαστικά.

**Στο κεφάλαιο 1** γίνεται μια εισαγωγή στην έννοια της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής και της εφαρμογής της στον κατασκευαστικό τομέα. Παρουσιάζονται κάποιες βασικές διαφοροποιήσεις των κτιρίων σε σχέση με τη χρήση τους αλλά και τους πόρους που

απαιτούνται για την κατασκευή σε σχέση με τον κύκλο ζωής της. Τέλος αναπτύσσεται εν συντομία ο στόχος της διπλωματικής και η διάρθρωσή της.

**Στο κεφάλαιο 2** γίνεται μια προσπάθεια ανάλυσης των βασικών σταδίων της αξιολόγησης του κύκλου ζωής των δομικών υλικών στην κατασκευή καθώς και της αξιολόγησης των περιβαλλοντικών επιδράσεων του κύκλου ζωής. Έπειτα ακολουθεί μία ανάλυση των αδύναμων σημείων της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής όπως αυτά αναγνωρίστηκαν κατά την βιβλιογραφική ανασκόπηση και την σύγκριση των υφιστάμενων μελετών.

**Στο κεφάλαιο 3** γίνεται μία βιβλιογραφική ανασκόπηση, όπου αναφέρονται εν συντομία άρθρα, από το διεθνή χώρο, με αντικείμενο μελέτης παρεμφερές με αυτό της παρούσας εργασίας.

**Στο κεφάλαιο 4** αναπτύσσονται λεπτομερώς τα βήματα της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής ως προς τον ενεργειακό αντίκτυπο και τις εκπομπές του  $CO_2$ , εστιασμένα στο αντικείμενο μελέτης της συγκεκριμένης εργασίας, που είναι τα υλικά της κατασκευής. Επίσης γίνεται εκτενής περιγραφή των κατασκευαστικών υλικών και των ιδιοτήτων τους που σχετίζονται με το περιβάλλον. Τέλος χτίζεται το θεωρητικό υπόβαθρο για τον ακριβή υπολογισμό των ενεργειακών καταναλώσεων και των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα που θα ακολουθήσει στο επόμενο κεφάλαιο.

**Στο κεφάλαιο 5** Παρουσιάζονται αρχικά τα κτίρια τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για την μελέτη και γίνεται η εφαρμογή της θεωρίας στην πράξη. Περιγράφονται αναλυτικά όλα τα στάδια μέχρι και τον τελικό υπολογισμό των ζητούμενων μεγεθών, δηλαδή της ενσωματωμένης ενέργειας και των ολικών εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα της κάθε κατασκευής και παράλληλα παρουσιάζονται και σχολιάζονται τα αποτελέσματα.

**Στο κεφάλαιο 6** γίνεται μια εισαγωγή στις στρατηγικές βελτιστοποίησης. Αναλύονται τα προβλήματα βελτιστοποίησης της παρούσας μελέτης και χωρίζονται σε δύο στάδια. Αρχικά μελετάται η βελτιστοποίηση (με χρήση της MATLAB) των μονώσεων των δομικών και μη στοιχείων της κατασκευής στοχεύοντας στη μείωση της

περιεχόμενης ενέργειας των υλικών και των εκπομπών  $CO_2$ . Σε δεύτερο στάδιο μελετάται η βελτιστοποίηση του φέροντα οργανισμού (με χρήση του προγράμματος OCP), σύμφωνα με τη μέθοδο βελτιστοποίησης των διαστάσεων (sizing optimization), υπό το στόχο της ελαχιστοποίησης του κόστους. Παράλληλα γίνεται συζήτηση των αποτελεσμάτων, σημειώνονται παρατηρήσεις και παρουσιάζονται κάποιες προτάσεις για συνέχεια.

**Στο κεφάλαιο 7** παρουσιάζεται η βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε.



## Κεφάλαιο 2

# Αξιολόγηση Κύκλου Ζωής (LCA) των δομικών υλικών

Η Αξιολόγηση του κύκλου ζωής των δομικών υλικών στις κατασκευές διεξάγεται σε 4 βασικά στάδια

### 2.1 Καθορισμός του στόχου και του πεδίου εφαρμογής της αξιολόγησης

Ο στόχος της LCA στην περίπτωση των δομικών υλικών είναι αρχικά να συγκρίνει τις επιπτώσεις που έχουν στο περιβάλλον διαφορετικά υλικά που χρησιμοποιούνται για τον ίδιο σκοπό. Η LCA μπορεί να είναι επίσης ένα εργαλείο για τον σχεδιασμό νέων προϊόντων ή για την βελτίωση των ήδη υφιστάμενων κατασκευών. Ο στόχος της LCA πρέπει επίσης να περιγράφει και το σε ποιον απευθύνεται η συγκεκριμένη LCA είτε πρόκειται για ιδιώτη, εταιρεία ή κάποιον κρατικό οργανισμό. Το πεδίο εφαρμογής της LCA είναι ο σχεδιασμός και η υλοποίηση κτιρίων με φιλικά προς το περιβάλλον υλικά, καθώς και η έρευνα προκειμένου να παραχθούν καινούρια οικολογικά προϊόντα. Σε αυτό το στάδιο γίνεται ακόμα ο καθορισμός των λειτουργικών μονάδων που θα χρησιμοποιηθούν και θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη ότι σε περίπτωση που έχουμε σύγκριση διαφορετικών προϊόντων, αυτές οι λειτουργικές μονάδες θα πρέπει να είναι κοινές για όλα τα συγκρινόμενα προϊόντα.

## 2.2 Εκτίμηση απογραφής κύκλου ζωής

Η εκτίμηση απογραφής κύκλου ζωής περιλαμβάνει διαδικασίες για την συλλογή και υπολογισμό των δεδομένων, για τον ποσοτικό προσδιορισμό των σχετικών εισόδων και εξόδων ενός προϊόντος – συστήματος. Οποιοδήποτε δομικό υλικό θεωρείται ως ένα τέτοιο προϊόν-σύστημα το οποίο περιλαμβάνει ένα σύνολο διαδικασιών, η κάθε μία με στοιχειώδης ροές εισόδου και εξόδου.

**Η απόκτηση της πρώτης ύλης** περιλαμβάνει την καταγραφή των απαιτούμενων πρώτων υλών και των στοιχειωδών ροών που δημιουργούνται από αυτή τη διαδικασία. Οι ροές σχετίζονται με:

- σωστές διαδικασίες παραγωγής (π.χ. εξόρυξη ορυκτών πόρων , συγκομιδή στην περίπτωση των φυτικών πόρων , κτηνοτροφία στην περίπτωση των ζωικών πόρων).
- την παραγωγή ενέργειας, υλικών, υποδομών και εξοπλισμού σχετικού με την παραγωγή πρώτων υλών(όπως στην περίπτωση των μηχανημάτων που χρησιμοποιούνται στην εξόρυξη).
- το νερό ως πρώτη ύλη.

**Η διαδικασία της κατασκευής** ξεκινά με το στάδιο της λήψης-απόκτησης όλων των πρώτων υλών και τελειώνει με την ολοκλήρωση του προϊόντος καθιστώντας το έτοιμο για διανομή.

**Η διανομή** περιλαμβάνει τις λειτουργίες που επιτρέπουν τη μεταφορά του προϊόντος προς τον χρήστη, εκτός από την ίδια τη μεταφορά. Έτσι η ισορροπία στο επίπεδο ενός κέντρου διανομής θα πρέπει να εξετάσει τα ακόλουθα:

- εισροές: το ίδιο το προϊόν, ηλεκτρική ενέργεια, φυσικό αέριο, υλικά γραφείου, πακέτα.
- εκροές: θόρυβος, οι απώλειες θερμότητας, τις εκπομπές, τα πακέτα, τα απόβλητα γραφείου.

**Η χρήση** ξεκινάει όταν το προϊόν φθάνει στον δικαιούχο. Αυτό το στάδιο περιλαμβάνει την επαναχρησιμοποίηση και την συντήρηση. Ωστόσο, η μελέτη αυτού του σταδίου δημιουργεί κάποιες δυσκολίες σχετικά με την ποσότητα των διαθέσιμων δεδομένων, τον ορισμό μιας λειτουργικής μονάδας και την ποσοτικοποίηση των συντελεστών που αφορούν τις επιπτώσεις από την χρήση του προϊόντος. Τα δεδομένα που απαιτούνται για την κατάρτιση του ισοζυγίου σε αυτό το στάδιο είναι:

- Η διάρκεια ζωής του προϊόντος.
- Τα προϊόντα και τα υλικά που σχετίζονται με τη χρήση του κύριου προϊόντος.
- Η συχνότητα της συντήρησης και επισκευής.
- Ο τρόπος εξάλειψης του προϊόντος στο τέλος της διάρκειας ζωής του.

**Η εξάλειψη των αποβλήτων** Κατά το τέλος της περιόδου χρήσης του, κάθε προϊόν καθίσταται απόβλητο που μπορεί να αντιμετωπιστεί με διάφορες διαδικασίες, όπως: η επαναχρησιμοποίηση, η ανακύκλωση, η ελεγχόμενη αποθήκευση, η αποτέφρωση, κ.λ.π. Κάθε μια από αυτές τις διαδικασίες παράγει ισοζύγια μεταξύ υλικού και ενέργειας και θα πρέπει να αντιμετωπίζεται μεμονωμένα.

**Η μεταφορά** είναι το στάδιο του κύκλου ζωής στο οποίο τα προϊόντα, τα υλικά ή η ενέργεια μετακινούνται χωρίς να υποστούν περαιτέρω αλλαγές. Υπόψιν στις μεταφορές λαμβάνουμε τα υλικά που έχουν μεγαλύτερη βαρύτητα στο τελικό προϊόν και όλα τα άλλα τα αμελούμε.

## 2.3 Αξιολόγηση των επιπτώσεων του κύκλου ζωής

Η αξιολόγηση των επιπτώσεων του κύκλου ζωής ενός προϊόντος ή δομικού υλικού έχει ως στόχο την εκτίμηση της σημασίας των πιθανών περιβαλλοντικών επιπτώσεων χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα της αξιολόγησης απογραφής του κύκλου ζωής. Η ανάλυση των επιπτώσεων είναι μία αναπτυσσόμενη διαδικασία και καμία μεθοδολογία δεν

είναι ομόφωνα δεκτή από όλους τους ειδικούς στον τομέα. Η ανάλυση των επιπτώσεων περιλαμβάνει την αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιδράσεων, δηλαδή την ερμηνεία των αποτελεσμάτων με την εύρεση λογικών δεικτών, με σκοπό να εκφράσει τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις ενός προϊόντος ή διαδικασίας που μελετάμε. Η ανάλυση των επιπτώσεων διεξάγεται σε τρία στάδια:

1. Κατηγοριοποίηση των παραγόντων που αφορούν τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Οι παράγοντες αυτοί, όπως φαίνεται στο ισοζύγιο υλικού-ενέργειας, μπορούν να ομαδοποιηθούν σε κατηγορίες. Η ταξινόμηση αυτή των παραγόντων, που χρησιμοποιείται ολόένα και περισσότερο, βασίζεται στις περιβαλλοντικές επιδράσεις. Για παράδειγμα: τα οξείδια του αζώτου (NO<sub>x</sub>) που αποβάλλονται στον αέρα συμβάλλουν τόσο στο φαινόμενο του θερμοκηπίου όσο και στην όξινη βροχής.
2. Χαρακτηρισμός των επιδράσεων που έχουν αυτές οι επιπτώσεις. Αυτό το στάδιο περιλαμβάνει την επιμέρους ανάλυση των επιδράσεων. Για παράδειγμα οξείδια του αζώτου παράγουν την όξυνση της ατμόσφαιρας, η οποία προκαλεί την όξινη βροχή με αρνητικές επιπτώσεις στη βλάστηση. Για να γίνει πιο κατανοητό θα πρέπει να γίνει μια αναλυτική σύνδεση μεταξύ των εκπομπών, των δόσεων και της επίδρασης στο περιβάλλον. Έτσι στο παράδειγμα μας έχουμε: εκπομπή (οξείδια του αζώτου) - δόση που έλαβε ο υποδοχέας (βλάστηση) - επίδραση αυτής της δόσης επί του υποδοχέα (επίδραση της ποσότητας του οξειδίου του αζώτου στη βλάστηση).
3. Αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Η ταξινόμηση και ο χαρακτηρισμός αυτών των παραγόντων, τους επιτρέπει να κυμαίνονται και να υπάρχουν σε διάφορες κατηγορίες περιβαλλοντικών προβλημάτων, των οποίων η σημασία διαχωρίζεται και ποσοτικοποιείται με την χρήση των συνθετικών δεικτών.

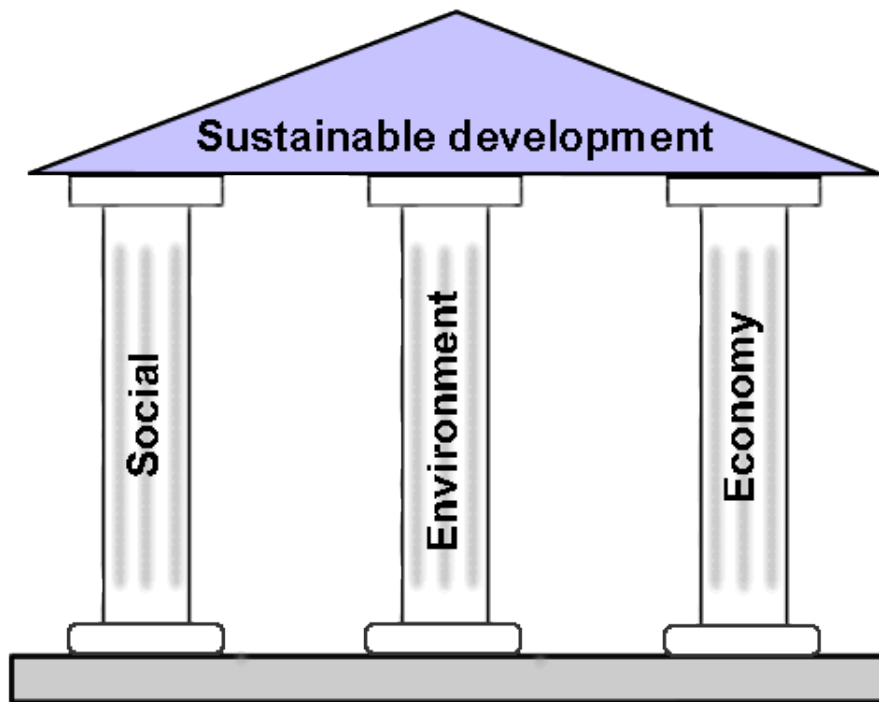
## 2.4 Ερμηνεία

Η ερμηνεία όλων των δεδομένων-αποτελεσμάτων που προέκυψαν στο στάδιο της μελέτης-αξιολόγησης των επιπτώσεων γίνεται σε αυτό το στάδιο. Μπορεί όμως η μελέτη να συνεχιστεί και να πάει ένα βήμα παρακάτω προκειμένου να περιλαμβάνει ένα είδος ιεράρχησης των περιβαλλοντικών προβλημάτων.



## 2.5 Αδύναμα σημεία της LCA

### 2.5.1 Βιωσιμότητα και LCA



Σχήμα 2.1: The Three Pillars of Sustainability

Όταν μιλάμε για βιωσιμότητα και βιώσιμη ανάπτυξη πρέπει να ξέρουμε ότι αυτές οι έννοιες είναι αλληλένδετες με το περιβάλλον, την κοινωνία και την οικονομία (Σχήμα 2.1). Έτσι όταν γίνονται προσπάθειες για βιώσιμη ανάπτυξη σίγουρα θα υπάρξουν κοινωνικές, περιβαλλοντικές και οικονομικές ανησυχίες. Η LCA ασχολείται κυρίως με την περιβαλλοντική πτυχή των επιπτώσεων ενός προϊόντος πράγμα που καθιστά δύσκολο ή ακόμα και αδύνατο να ενσωματωθούν οι όποιες οικονομικές και κοινωνικές ανησυχίες. Ενώ το οικονομικό κόστος μπορεί να ποσοτικοποιηθεί και να εισαχθεί στο LCA, σπάνια γίνεται κάτι τέτοιο γιατί εξ'ορισμού δεν είναι αυτός ο σκοπός που πραγματοποιείται η αξιολόγηση του κύκλου ζωής. Όσον αφορά τώρα τα κοινωνικά ζητήματα καταλαβαίνουμε ότι αυτά μπορεί να είναι τόσο ευρεία και ποικίλα που να τα ποσοτικοποιήσουμε και να τα εισάγουμε στην LCA είναι ανέφικτο. Μόνο παράγοντες που μπορούν να ποσοτικοποιηθούν, όπως ο αντίκτυπος καρκινογόνων εκπομπών σε σχέση με τα

ανθρώπινα ποσοστά καρκίνου, μπορούν να συμπεριληφθούν σε τέτοιου είδους αξιολογήσεις. Ως εκ τούτου η LCA παρουσιάζει μόνο μια μερική εικόνα του πως ένα προϊόν μπορεί να επηρεάσει την βιωσιμότητα.

## 2.5.2 Μεταβλητότητα της LCA

Επειδή τα μοντέλα της LCA εξαρτώνται τόσο πολύ από την ποιότητα των δεδομένων, και επειδή οι ερευνητές κάνουν τις εκτιμήσεις και παραδοχές που χρειάζονται κάθε φορά κατά την διεξαγωγή μίας LCA όπως αυτοί κρίνουν και επιθυμούν, η μεταβλητότητα είναι ένα πρόβλημα που καθιστά αμφίβολη την αποδοχή της LCA ως μια ουδέτερη πρακτική. Παρ'όλα αυτά έχουν δημιουργηθεί διάφορα εργαλεία ανάλυσης 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 «κυριαρχική ανάλυση» που χρησιμοποιείται για να προσδιορίσει τις φάσεις του κύκλου ζωής που έχουν την μεγαλύτερη περιβαλλοντική επίπτωση. Ένα άλλο είδος ανάλυσης είναι η ανάλυση με βάση την συνεισφορά και χρησιμοποιείται για να συγκρίνει τα περιβαλλοντικά φορτία μεταξύ τους. Για παράδειγμα η σχετική επίδραση του διοξειδίου του άνθρακα και του διοξειδίου του θείου θα μπορούσε να συγκριθεί με βάση τη λειτουργική μονάδα, για να προσδιοριστεί ποια κατηγορία εκπομπών χρειάζεται τη μεγαλύτερη προσοχή. Άλλες τέτοιες αναλύσεις είναι η ανάλυση ευαισθησίας και η ανάλυση αβεβαιότητας. Τέτοια εργαλεία είναι ζωτικής σημασίας για την εξάλειψη των αδύναμων πτυχών των μοντέλων LCA και τη δημιουργία πιο χρήσιμων μοντέλων στο μέλλον.

## Κεφάλαιο 3

# Βιβλιογραφική ανασκόπηση υφιστάμενων μελετών

Αυτό που ακολουθεί είναι μια σύντομη εξέταση έξι αξιολογήσεων κύκλου ζωής πραγματοποιούμενων σε εμπορικά κτίρια και κτίρια κατοικιών από σκυρόδεμα και χάλυβα. Αν και οι περισσότερες από τις μελέτες επικεντρώνονται στις φάσεις χρήσης και συντήρησης ενός κτιρίου, τα τμήματα που ασχολούνται με αυτές τις αναλύσεις δεν περιλαμβάνονται στην κριτική επειδή ως επίκεντρο της παρούσας εργασίας ορίζεται η φάση κατασκευής και τα υλικά. Οι έρευνες, οι οποίες συνοψίζονται στον Πίνακα 3.1, έχουν επιλεγεί ώστε να αντιπροσωπεύουν μια ευρεία ποικιλία των στόχων και των υποθέσεων, και χαρακτηρίζονται από μία έλλειψη συνέχειας η οποία πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά την ανάλυση της χρησιμότητά τους από έναν ερευνητή ο οποίος έχει μια συγκεκριμένη λειτουργική μονάδα και ένα συγκεκριμένο πεδίο στο μυαλό του. Σκοπός της εξέτασης τους είναι να καθοριστεί το πώς η έρευνα της ανάλυσης κύκλους ζωής μπορεί να τυποποιηθεί και να βελτιωθεί σε μελλοντικές μελέτες.

Title	Authors	Year	Journal	Description
Life-Cycle Environmental Effects of an Office Building	Junnila, Seppa and Arpad Horvath	2003	Journal of Infrastructure Systems	One 5-story, 15,600 $m^2$ building
Comparison of Environmental Effects of Steel- and Concrete-Framed Buildings	Guggemos, Angela Acree and Arpad Horvath	2005	Journal of Infrastructure Systems	Two 5-story, 4400 $m^2$ buildings
Life Cycle Energy Assessment of a Typical Office Building in Thailand	Kofoworola, Oyeshola F. and Shabbitt H. Gheewala	2009	Energy and Buildings	One 38-story, 60,000 $m^2$ building
Life cycle analysis in the construction sector: Guiding the optimization of conventional Italian buildings	Francesco Asdrubali, Catia Baldassarri and Vasilis Fthenakis	2013	Energy and Buildings	3 conventional Italian buildings, a detached residential house, a multi-family and a multi-story officebuilding
A review on Life Cycle Assessment, Life Cycle Energy Assessment and Life Cycle Carbon Emissions Assessment on buildings	C.K. Chau , T.M. Leung, W.Y. Ng	2015	Applied Energy	Three streams of life cycle studies, namely LCA, LCEA and LCCO <sub>2</sub> A
Life cycle energy ( <i>LCEA</i> ) and carbon dioxide emissions ( <i>LCCO<sub>2</sub>A</i> ) assessment of two residential buildings in Gaziantep, Turkey	Adem Atmaca, Nihat Atmaca	2015	Energy and Buildings	One 13-story, 7445 $m^2$ and one 3-story, 2110 $m^2$ residential building

Πίνακας 3.1: Περίληψη των εξεταζόμενων μελετών

### 3.1 Μελέτη 1

Junnila, Seppo and Arpad Horvath. "Life-Cycle Environmental Effects of an Office Building." *Journal of Infrastructure Systems* (2003)

Οι ερευνητές αυτοί από τη Φινλανδία και τις Η.Π.Α. δημοσίευσαν μία ανάλυση κύκλου ζωής ενός κτιρίου που στεγάζει γραφειακούς χώρους στη Φινλανδία. Η σύντομη ιστορία τους στην εκτίμηση κύκλου ζωής των κτιρίων δημιουργεί καίρια ερωτήματα σχετικά με την κατάσταση της ανάλυσης κύκλου ζωής: "...Είναι ακόμη αρκετά δύσκολο να βρεθούν περιεκτικές πληροφορίες σχετικά με τις παραμέτρους του κύκλου ζωής των γραφειακών χώρων". Οι οικιστικοί χώροι έχουν καταγραφεί με πληρέστερο τρόπο, γεγονός που καταδεικνύει ότι χρειάζονται περισσότερες πληροφορίες σε σχέση με τους διάφορους τύπους γραφείων. Επιπρόσθετα, "Συστήματα δόμησης (στατικά, συστήματα αερισμού, χρήση ηλεκτρικού ρεύματος, φωτισμός) σπάνια εσωκλείονται στις αναλύσεις κύκλου ζωής, παρά το γεγονός ότι στην πραγματικότητα, η πλειοψηφία των κτιρίων σχεδιάζονται βάσει αυτών των συστημάτων δόμησης...". Η συγκεκριμένη ανάλυση κύκλου ζωής αφορά σε ένα μόνο κτίριο που στεγάζει γραφεία, γι' αυτό και δεν περιλαμβάνει σύγκριση μεταξύ δύο διαφορετικών τύπων κατασκευής. Η εν λόγω κατασκευή αποτελείται από τρεις πενταόροφες ενότητες από σκυρόδεμα επιτόπιας έγχυσης (cast-in-place). Το συγκρότημα, συνολικής έκτασης 15,600 τετραγωνικών μέτρων είχε διάρκεια ζωής 50 ετών. Οι ερευνητές ήταν σε θέση να συλλέξουν δεδομένα σχετικά με τη ροή εισαγωγής και εξαγωγής υλικών σε πραγματικό χρόνο, αφού βρισκόνταν εκεί κατά τη διάρκεια τόσο του σχεδιασμού, όσο και της κατασκευής. Επιπλέον συγκέντρωσαν στοιχεία από τη φινλανδική βιομηχανία, σχετικά με τις εκπομπές, τα οποία παρουσίαζαν ελλείψεις μόνο σε ορισμένους τομείς μικρής σημασίας.

Η εκτίμηση του κύκλου ζωής πραγματοποιήθηκε σε πέντε φάσεις, αντιπροσωπευτικές των σημαντικότερων σταδίων της ζωής του κτιρίου: δομικά υλικά, κατασκευή, χρήση, συντήρηση και κατεδάφιση. Το μοντέλο που αναπτύχθηκε, αποτελεί με διαφορά το πιο πλήρες σχετικά με ένα μόνο κτίριο γραφείων, περιλαμβάνοντας και τη μεταφορά μεταξύ των φάσεων. Οι φάσεις αναλύθηκαν βάσει πέντε χημικών αναλόγων, τα οποία έχουν σημαντικό περιβαλλοντικό αντίκτυπο: την κλιματική αλλαγή εξαιτίας του διοξειδίου του άνθρακα, την όξυνση εξαιτίας του διοξειδίου του θείου ( $SO_2$ ), την δημιουργία αιθαλομίχλης ( $H_2SO_4$ ), τον ευτροφισμό εξαιτίας του φωσφορικού άλατος ( $PO_4$ ), και τα βαρέα μέταλλα, με κυρίαρχο το μόλυβδο (Pb) (Πίνακας 3.2). Ο πίνακας που δημιουργήθηκε χωρίζεται

σε μία λίστα δύο σελίδων, όπου αναλύεται εκτενώς η συνεισφορά του κάθε βήματος στις φάσεις κατασκευής, χρήσης και διάθεσης, εδώ παρουσιάζεται συνοπτικά. Για παράδειγμα, ο χάλυβας συμβάλει στη δημιουργία των περισσότερων τόνων  $CO_2$ , κιλών  $H_2SO_4$  και κιλών Pb, ενώ το σκυρόδεμα συμβάλει στην παραγωγή των περισσότερων κιλών  $SO_2$  και  $PO_4$ . Ένα άλλο συμπέρασμα που μπορεί να συναχθεί είναι ότι το σκυρόδεμα που χρησιμοποιείται για το σκελετό του κτιρίου αποτελεί 65% του ολικού μεταφερόμενου βάρους για την κατασκευή.

Aspect of building	Tons CO2	kg SO2	kg H2C4	kg PO4	kg Pb
Building materials	4,800	19,000	7,600	1,900	7.4
Construction	820	5,800	530	960	0.3
Electrical service	25,000	59,000	4,900	5,500	3.8
Heating service	11,000	25,000	2,400	2,300	1.2
Other services	3,900	11,000	2,600	4,000	0
Maintenance	1,600	8,400	5,700	850	2.1
Demolition	440	4,400	680	720	0.3
Total	48,000	130,000	24,000	16,000	15.0

Πίνακας 3.2: Περιβαλλοντικός αντίκτυπος κτιρίου γραφείων 50ετούς διάρκειας ζωής

Η μελέτη αυτή αποτελεί ένα εξαιρετικό παράδειγμα ανάλυσης κύκλου ζωής ενός κτιρίου. Τα δεδομένα εξηγούνται και παρουσιάζονται με πολλούς διαφορετικούς τρόπους, ώστε να εξηγήσουν τον τρόπο με τον οποίο οι μονάδες και οι φάσεις επηρεάζουν τους αριθμούς. Τα αποτελέσματα διακρίνονται σε στοιχεία κατασκευής, όπως δομικά, αερισμού, ηλεκτρολογικά, έτσι ώστε ο αντίκτυπος εξαιτίας του συστήματος κατασκευής να διαφαίνεται ξεκάθαρα. Σε αυτήν την περίπτωση φαίνεται ξεκάθαρα ότι ο τρόπος κατασκευής θεωρείται υπεύθυνος, περισσότερο από οτιδήποτε άλλο, για τη συμβολή στην κλιματική αλλαγή, τη δημιουργία αιθαλομίχλης και την παραγωγή βαρέων μετάλλων. Οι συγγραφείς αναγνωρίζουν ότι δε μπορούν να επιτευχθούν πολλά χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα από ένα μόνο κτίριο. Πολλαπλές μελέτες κτιρίων θα επέτρεπαν τη συγκριτική ανάλυση των στοιχείων ώστε να φανεί ποια από αυτά διαφοροποιούνται περισσότερο από κατασκευή σε κατασκευή. Επίσης, εξαιτίας του γεγονότος ότι το αναλυόμενο κτίριο βρίσκεται στη Φιλανδία, δεν αναπαριστά επαρκώς κτίρια σε άλλες χώρες. Παρόλα αυτά, οι συνοπτικοί πίνακες που δημιουργήθηκαν από αυτή τη μελέτη, θα μπορούσαν να χρησιμεύσουν ως λίστα ελέγχου σε επόμενες εκτιμήσεις κύκλου ζωής άλλων κτιρίων. Τα δεδομένα που συλλέχθηκαν είναι αρκετά ακριβή και μπορούν να

χρησιμοποιηθούν, αφού συλλέχθηκαν κατά τη διάρκεια της κατασκευής, και όχι σε μεταγενέστερο χρόνο όπου τα δεδομένα θα ήταν λιγότερο αξιόπιστα.

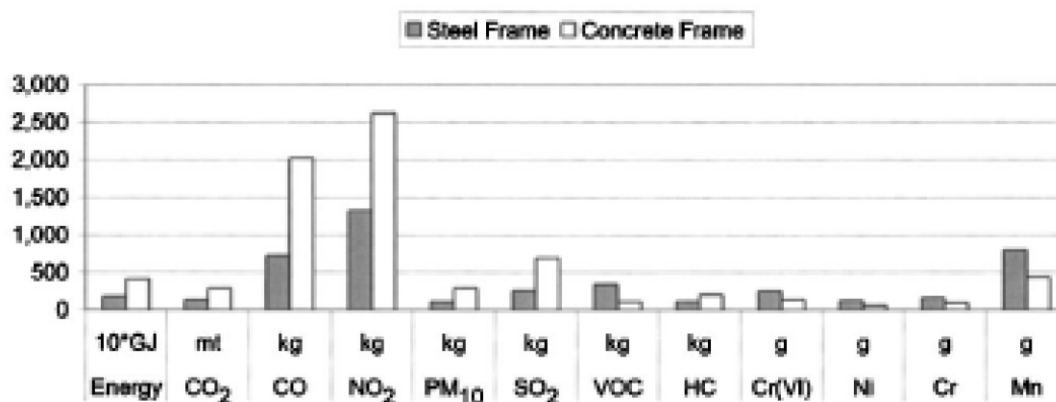
## 3.2 Μελέτη 2

Guggemos, Angela Acree and Arpad Horvath. “Comparison of Environmental Effects of Steel- and Concrete-Framed Buildings.” *Journal of Infrastructure Systems* (2005)

Ο Arpad Horvath συνεργάστηκε επίσης με την Angela Guggemos, δύο χρόνια μετά την Φινλανδική έρευνα, για να πραγματοποιήσει μια Ανάλυση Κύκλου Ζωής κτιρίου γραφείων από σκυρόδεμα και χάλυβα, στις Μεσοδυτικές Ηνωμένες Πολιτείες. Το αντικείμενο μελέτης ήταν ένα κτίριο πέντε ορόφων,  $4,400m^2$ , σε μία υποθετική τοποθεσία και συγκρίθηκε χρησιμοποιώντας τόσο χάλυβα όσο και σκυρόδεμα. Κατασκευάστηκαν αναλυτικά διαγράμματα ροής για να μοντελοποιηθεί η διαδικασία κατασκευής του κτιρίου και η ανάλυση εφαρμόστηκε σε ολοκληρωμένη μελέτη κτιρίου, όχι μόνο στο δομικό σκελετό. Με βάση την συγκεκριμένη τοποθεσία που είχε επιλεγεί αρχικώς, θεωρώντας το κτίριο τυπικό παράδειγμα της περιοχής και φροντίζοντας οι αποστάσεις να είναι όσο το δυνατόν μικρότερες, υπολογίστηκαν τελικά οι αποστάσεις αυτές που θα καλύπτονταν για κάθε πιθανή μεταφορά. Το μοντέλο αναλύθηκε δύο φορές, μία για την πραγματοποίηση μιας ολοκληρωμένης ανάλυσης κύκλου ζωής και μία ακόμα στην οποία δόθηκε έμφαση μόνο στη φάση κατασκευής. Όπως ήταν αναμενόμενο οι δύο αυτές αναλύσεις παρουσίασαν σημαντικές διαφοροποιήσεις. Σχετικά με την ολοκληρωμένη ανάλυση κύκλου ζωής, το σκυρόδεμα και ο χάλυβας παρουσίασαν σχεδόν ίδια αποτελέσματα όσον αφορά την ενέργεια που καταναλώνεται άλλα και διαφορά είδη εκπομπών (Πίνακας 3.3). Το σκυρόδεμα φάνηκε να υπερτερεί στις εκπομπές mono-nitrogen oxides ( $NO_x$ ), ενώ ο χάλυβας στις εκπομπές carbon monoxide και sulfur dioxide. Άλλα είδη αερίων, με κυριότερο το διοξείδιο του άνθρακα, παρουσίασαν περίπου τα ίδια αποτελέσματα τόσο για το σκυρόδεμα όσο και για το χάλυβα. Από την άλλη, κατά τη δεύτερη ανάλυση στην οποία οι ερευνητές ασχολήθηκαν μόνο με την φάση κατασκευής, φάνηκε πως το σκυρόδεμα έχει μεγαλύτερες εκπομπές από το χάλυβα (Σχήμα 3.1).

Structure	Energy (10 TJ)	CO2 (Gg)	CO (Mg)	NOx (Mg)	PM10 (Mg)	SO2 (Mg)
Concrete-frame building	36	26	34	76	9	78
Steel-frame building	36	26	38	72	9	100

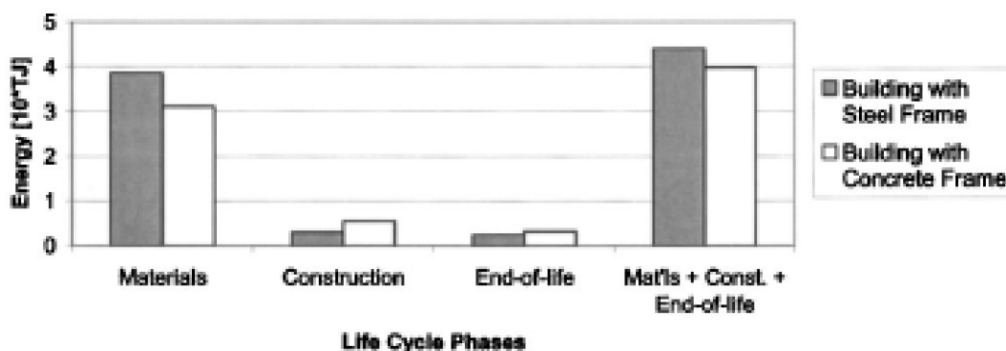
Πίνακας 3.3: Σύγκριση του ενεργειακού αντίκτυπου ολοκληρωμένης ανάλυσης κύκλου ζωής



Σχήμα 3.1: Σύγκριση του ενεργειακού αντίκτυπου κατά την φάση κατασκευής

Οι συγγραφείς επίσης παρουσιάζουν την ενεργειακή χρήση, σε διαφορετικά στάδια του κύκλου ζωής, ώστε να γίνει δυνατή η σύγκριση του σχετικού αντίκτυπου μεταξύ των φάσεων (Σχήμα 3.2). Παρ'όλα αυτά δεν περιλαμβάνεται η φάση λειτουργίας του κύκλου ζωής, μια κύρια έλλειψη της μελέτης αφού δεν είναι δυνατή η σύγκριση του αντίκτυπου που έχουν τα υλικά και η φάση κατασκευής με τη φάση λειτουργίας η οποία αποτελεί ένα από τα βασικότερα στάδια του κύκλου ζωής. Λόγω αυτής της παράλειψης γίνεται αδύνατη η εξαγωγή ξεκάθαρου συμπεράσματος. Συγκεκριμένα, αν και εύκολα διαπιστώνεται ότι ο σκελετός από σκυρόδεμα είναι πιο καταστροφικός για το περιβάλλον, λόγω της παραγωγής των υλικών, της κατασκευής και του τέλους ζωής της κατασκευής, θα ήταν αδύνατο να βγάλουμε συμπέρασμα από αυτή την έρευνα για το ποιο από τα δύο υλικά είναι περισσότερο επιβλαβές για το περιβάλλον, στο σύνολο των 50 χρόνων ζωής του κτιρίου.





Σχήμα 3.2: Σύγκριση του ενεργειακού αντίκτυπου ανά φάση

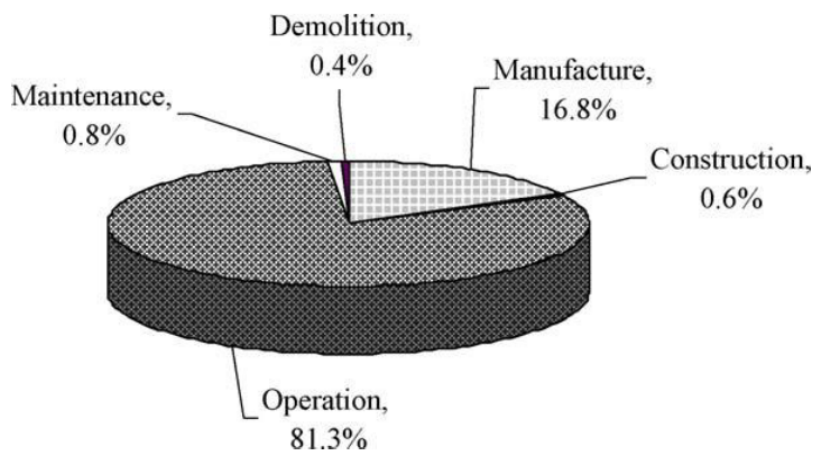
Ένα τυπικό κτίριο γραφείων στις Μεσοδυτικές ΗΠΑ προφανώς διαφέρει από κάποιο άλλο το οποίο εδράζεται οπουδήποτε αλλού στην Αμερική, πόσο μάλλον σε άλλη ήπειρο. Για να θεωρηθεί μία μελέτη κατανάλωσης ενέργειας και εκπομπών αξιόπιστη και κατάλληλη για σύγκριση αποτελεσμάτων, τέτοιες διαφορές που βασίζονται στην τοποθεσία, πρέπει να ληφθούν υπόψιν. Η θερμοκρασία και οι αποστάσεις μεταφορών είναι δύο από τους βασικότερους παράγοντες που διαφοροποιούνται από περιοχή σε περιοχή. Έτσι μία πιο ολοκληρωμένη μελέτη θα μπορούσε να συγκρίνει κτίρια ποικίλων τοποθεσιών χρησιμοποιώντας πλήθος μεταβλητών ανάλογα με την τοποθεσία του καθενός. Οι συγγραφείς συγκρίνουν το μοντέλο τους με μία παρόμοια Σουηδική μελέτη που είχε πραγματοποιηθεί το 1996 από Björklund et al. Τα αριθμητικά αποτελέσματα της Σουηδικής μελέτης, σχετικά με την ενσωματωμένη ενέργεια του κτιρίου, είναι αισθητά μικρότερα από αυτή του κτιρίου στην Αμερική και ο Björklund καταλήγει επίσης στο συμπέρασμα ότι το σκυρόδεμα χαρακτηρίζεται τελικά από περισσότερες εκπομπές σε σχέση με τον χάλυβα. Παρά το γεγονός ότι η Σουηδική έρευνα είναι αρκετά παλαιότερη και συνεπώς μπορεί να υπάρχουν ασυνέπειες στα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν, η σύγκριση παρουσιάζει το πόσο διαφορετικά μπορεί να είναι τα αποτελέσματα σχετικά όμοιων μελετών οι οποίες τοποθετούνται σε διαφορετικές ηπείρους, λόγω διαφορετικών πρακτικών και πολιτικών.

### 3.3 Μελέτη 3

Kofoworola, Oyeshola F., and Shabbit H. Gheewala. "Life Cycle Energy Assessment of a Typical Office Building in Thailand." *Energy and Buildings* (2009)

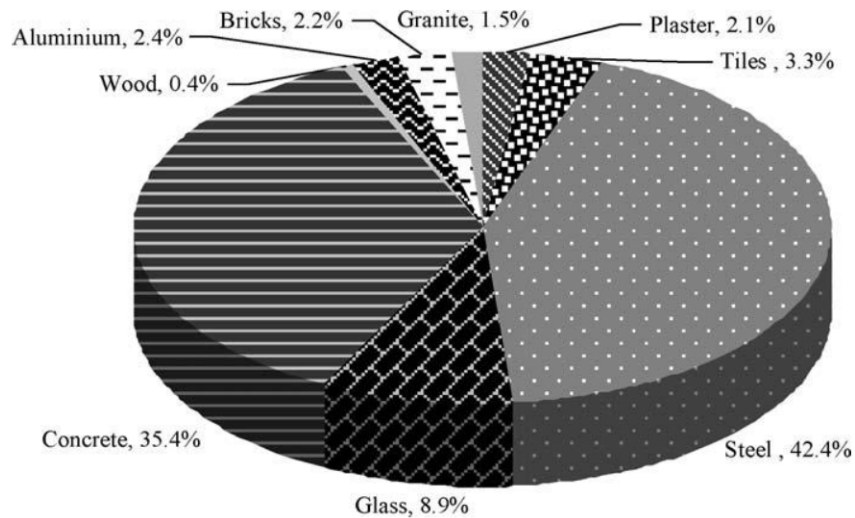
Η μελέτη αυτή εστίασε σε ένα πρόσφατα αναγεγνημένο κτίριο σκυροδέματος, 38 ορόφων, στο Bangkok, Thailand. Οι ερευνητές αντί να πραγματοποιήσουν μια κλασική Ανάλυση Κύκλου Ζωής επέλεξαν μία Ενεργειακή Ανάλυση Κύκλου Ζωής η οποία εστίασε ξεκάθαρα στην κατανάλωση ενέργειας και όχι στις εκπομπές ή άλλες πτυχές μιας τυπικής LCA. Σκοπός της έρευνας ήταν κυρίως να ενθαρρύνει τις αναβαθμίσεις του κτιριακού κανονισμού της Ταϊλάνδης, όσον αφορά τις ενεργειακές καταναλώσεις, και στο μεγαλύτερο κομμάτι της ασχολείται με τους τρόπους μείωσης των καταναλώσεων ενέργειας κατά τη διάρκεια της φάσης λειτουργίας. Ωστόσο, οι ερευνητές επισήμαναν ότι η ενσωματωμένη ενέργεια της κατασκευής ακολουθεί σε σπουδαιότητα και υπάρχουν επίσης σημαντικοί λόγοι και τρόποι μείωσης και αυτής.

Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για αυτή τη μελέτη αφορούσαν ειδικά την Ταϊλάνδη. Η ενσωματωμένη ενέργεια διαφόρων δομικών υλικών βρέθηκε από βάσεις δεδομένων της Ταϊλανδέζικης κυβέρνησης. Επίσης πολλά δεδομένα σχετικά με τις χρήσεις ενέργειας περιείχαν μερικές "ιδιοτροπίες" που δεν θα μπορούσαν να βρεθούν σε ένα Ευρωπαϊκό ή Αμερικάνικο κτίριο. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι το γεγονός ότι οι πολίτες της Ταϊλάνδης είναι συνηθισμένοι σε συνθήκες υψηλότερων θερμοκρασιών σε σύγκριση με έναν τυπικό Ευρωπαϊκό πολίτη και συνεπώς δεν υπάρχει η απαίτηση για την ίδια ψύξη των κτιρίων για να επιτευχθούν οι κατάλληλες συνθήκες διαβίωσης. Χρησιμοποιήθηκε μια μεθοδολογία LCA με βάση τις οικονομικές εισροές και εκροές προκειμένου να συλλεχθούν τα απαραίτητα δεδομένα για τα κατασκευαστικά υλικά, ενώ για όλες τις άλλες φάσεις του 50ετούς κύκλου ζωής χρησιμοποιήθηκαν μεθοδολογίες βασισμένες στις απαιτούμενες διαδικασίες. Η ενεργειακή κατανάλωση, σύμφωνα με τις τυπικές φάσεις του κύκλου ζωής του κτιρίου, παρουσιάζονται στο παρακάτω διάγραμμα-πίτα (Σχήμα 3.3). Με τον όρο "manufacture" ορίζονται οι διαδικασίες που αφορούν στην παραγωγή και μεταφορά των πρώτων υλών ενώ ως "construction" αναφέρονται οι διαδικασίες κατασκευής στον χώρο του έργου.



Σχήμα 3.3: Διανομή της κατανάλωσης ενέργειας ανά φάση

Η συνολική ενσωματωμένη ενέργεια του κτιρίου υπολογίστηκε 375 terajoules, η οποία αντιστοιχεί σε περίπου  $6.8 \text{ GJ/m}^2$ . Περίπου το 78% αυτής της ενέργειας αποδίδεται στη χρήση σκυροδέματος και χάλυβα στην κατασκευή (Σχήμα 3.4) και αυτή η ενσωματωμένη ενέργεια αντιστοιχεί περίπου στο 15% της ενέργειας που θα καταναλωθεί κατά τη φάση λειτουργίας της κατασκευής. Οι τιμές της ενσωματωμένης ενέργειας που υπολογίστηκαν κατά την έρευνα ήταν αρκετά κοντά στα δεδομένα της κυβέρνησης καθώς και σε προηγούμενες αντίστοιχες ενεργειακές μελέτες οι οποίες εκτιμούσαν ότι η ενσωματωμένη ενέργεια ενός κτιρίου, ανά τετραγωνικό μέτρο, κυμαίνεται από 3.4 έως  $19.0 \text{ GJ/m}^2$ . Οι ερευνητές αποδίδουν την υψηλή ενσωματωμένη ενέργεια του κτιρίου στις μεγάλες ποσότητες υλικών που απαιτήθηκαν για την κατασκευή του κτιρίου με σκελετό οπλισμένου σκυροδέματος. Αν και δεν αναφέρεται ρητά, μία κατασκευή με χαλύβδινο σκελετό, υποθετικά, θα κατανάλωνε λιγότερο υλικό και θα είχε χαμηλότερη ενσωματωμένη ενέργεια.



Σχήμα 3.4: Κατανομή της initial embodied energy ανά υλικό

### 3.4 Μελέτη 4

Francesco Asdrubali, Catia Baldassarri and Vasilis Fthenakis. «LCA in the construction sector. Guiding the optimization of conventional Italian buildings.» Energy and Buildings (2013)

Αντικείμενο της μελέτης αυτής αποτέλεσαν τρία τυπικά Ιταλικά κτίρια, μια μονοκατοικία, μια πολυκατοικία και ένα πολυώροφο κτίριο γραφείων και είχε ως στόχο αφενός την εκτίμηση του περιβαλλοντικού αντίκτυπου των τριών αυτών κτιρίων, καθ' όλη τη διάρκεια της ζωής τους (50 χρόνια) μέσω μίας ολοκληρωμένης LCA, αφετέρου την εκτίμηση του αντίκτυπου κάποιων ενεργειακών σεναρίων βελτιστοποίησης.

Η Ανάλυση Κύκλου Ζωής που πραγματοποιήθηκε περιλαμβάνει όλα τα στάδια του κύκλου ζωής, κατασκευή, λειτουργία αλλά και το τέλος ζωής των κτιρίων.

Η φάση κατασκευής περιλαμβάνει την εξαγωγή των πρώτων υλών, την ανάκτηση των ανακυκλωμένων υλικών, τη μεταφορά στο εργοστάσιο και τις διαδικασίες παραγωγής των δομικών υλικών αλλά και τη μεταφορά τους ύστερα στον χώρο κατασκευής, την κατασκευή των κτιρίων καθώς και την πιθανή αντικατάσταση μέρους των υλικών στα 50 χρόνια. Κατά την ανάλυση αυτή εφαρμόστηκαν 3 μεθοδολογίες του λογισμικού SimaPro και τα

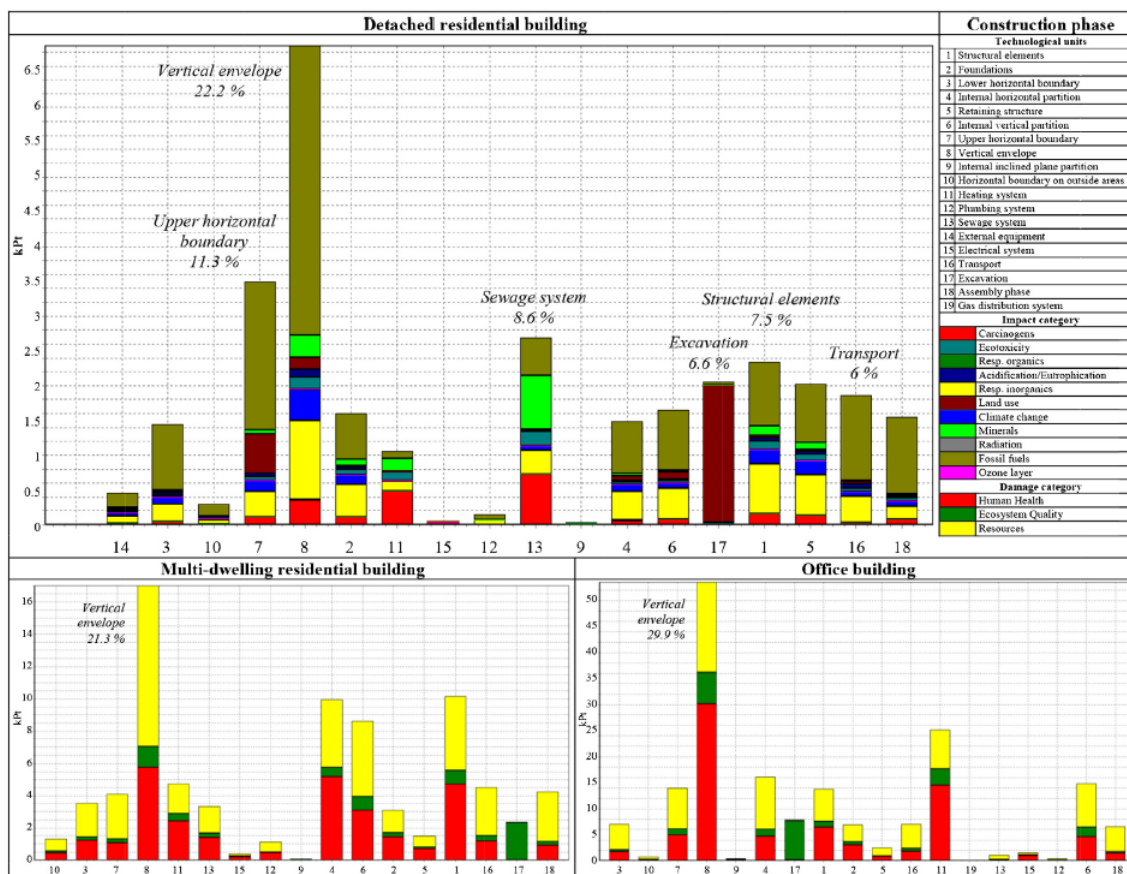
αποτελέσματα φαίνονται στο Σχήμα 3.5, συγκριτικά για κάθε ένα από τα τρία κτίρια, για κάθε μία από τις τρεις μεθόδους.

Construction phase – environmental impacts for the three buildings according to the three methods.

Construction phase	Equivalent CO <sub>2</sub> emissions kg CO <sub>2</sub> -eq	Equivalent CO <sub>2</sub> emissions/net area kg CO <sub>2</sub> -eq/m <sup>2</sup>	Equivalent CO <sub>2</sub> emissions/gross volume kg CO <sub>2</sub> -eq/m <sup>3</sup>	Equivalent CO <sub>2</sub> emissions/heated volume kg CO <sub>2</sub> -eq/m <sup>3</sup>
IPCC GWP <sub>100</sub>				
Detached house	427,821	966	228	388
Multi-dwelling building	1,138,907	623	168	349
Office building	1,715,248	512	126	275
Construction phase	Energy demand MJ-eq	Energy demand/net area MJ-eq/m <sup>2</sup>	Energy demand/gross volume MJ-eq/m <sup>3</sup>	Energy demand/heated volume MJ-eq/m <sup>3</sup>
CED				
Detached house	5,242,653	11,834	2796	4757
Multi-dwelling building	14,439,455	7903	2129	4418
Office building	22,513,476	6714	1655	3616
Construction phase	Damage Pt	Damage/net area Pt/m <sup>2</sup>	Damage/gross volume Pt/m <sup>3</sup>	Damage/heated volume Pt/m <sup>3</sup>
Eco-indicator 99				
Detached house	31,087	70	17	28
Multi-dwelling building	84,217	46	12	26
Office building	179,094	53	13	29

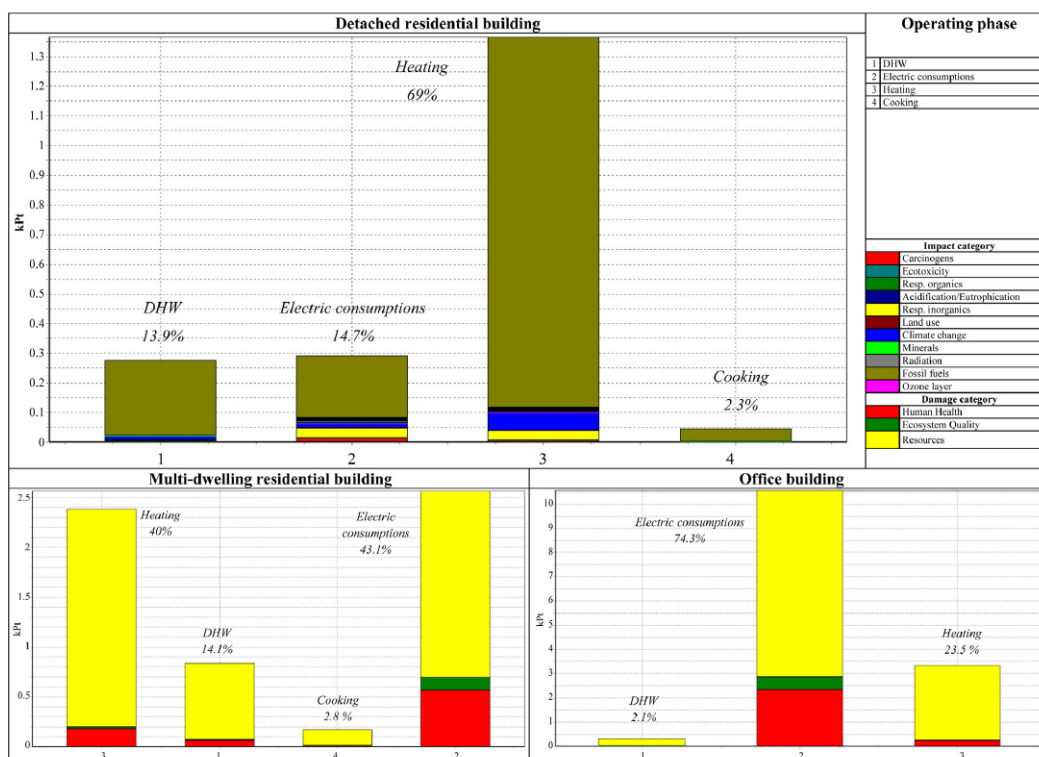
Σχήμα 3.5: Αποτελέσματα φάσης κατασκευής-Περιβαλλοντικός αντίκτυπος των τριών κτιρίων σύμφωνα με τις τρεις μεθόδους

Οι ερευνητές θεώρησαν προφανές ότι όπως φαίνεται και στον Πίνακα, στη συγκεκριμένη φάση (αλλά ισχύει και στη φάση λειτουργίας που μελετάται αργότερα), ο ενεργειακός αντίκτυπος αυξάνεται όσο αυξάνεται το μέγεθος του κτιρίου. Επίσης για όλα τα κτίρια, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.6, ο κάθετος σκελετός (κάθετοι εξωτερικοί τοίχοι και κουφώματα), αντιστοιχεί στον σημαντικότερο περιβαλλοντικό αντίκτυπο, με πάνω από 20% του συνολικού και εξ' αυτού συμπεραίνουν ότι η επιλογή υλικών σκελετού μπορεί να επηρεάσει σημαντικά τα αποτελέσματα.



Σχήμα 3.6: Φάση κατασκευής - Κατηγορίες αντίκτυπου για τα τρία κτίρια

Σχετικά με τη φάση λειτουργίας στην οποία περιλαμβάνονται όλες οι δραστηριότητες που σχετίζονται με τη χρήση του κτιρίου, τη θέρμανση, την ψύξη, την παραγωγή ζεστού νερού, το φωτισμό αλλά και άλλες απαιτούμενες καταναλώσεις ενέργειας, παρατηρήθηκε ότι στην μονοκατοικία η θέρμανση κατά τη διάρκεια του χειμώνα αποτελεί τον βασικότερο παράγοντα ενεργειακής επιβάρυνσης με ποσοστό 69%, κυρίως λόγω της χρήσης ορυκτού καυσίμου. Για τα άλλα δύο κτίρια, η κατανάλωση ηλεκτρικού ρεύματος είχε τα μεγαλύτερα ποσοστά με 43% για την πολυκατοικία και 74% για τα κτίρια γραφείων (Σχήμα 3.7).



Σχήμα 3.7: Φάση Λειτουργίας - Σύγκριση αντίκτυπου απαιτούμενων καταναλώσεων

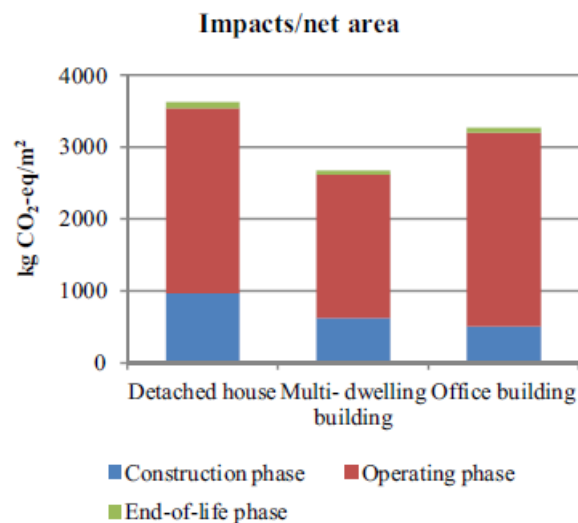
Κατά τη μελέτη της End of life phase παρατηρήθηκε ότι η μονοκατοικία είχε μεγαλύτερο ενεργειακό αντίκτυπο από την πολυκατοικία, τα γραφεία είχαν μικρότερο αντίκτυπο και από τις δύο κατοικίες, σύμφωνα με τις δύο μεθόδους ενώ η τρίτη μέθοδος έδειξε ότι αν και η μονοκατοικία υπερτερεί σε σχέση με τα κτίρια γραφείων, η πολυκατοικία έχει μικρότερες ενεργειακές επιπτώσεις σε σχέση με αυτά. Σε κάθε περίπτωση, το γεγονός ότι τα γραφεία περιέχουν μεγαλύτερα ποσοστά αλουμινίου, χάλυβα και γυαλιού, όλα ανακυκλώσιμα υλικά, δημιουργεί μεγάλο όφελος γενικά στον κατασκευαστικό τομέα.

Κατά το στάδιο του Inventory Analysis κάθε κτίριο εκτιμήθηκε διαφορετικά και χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικά δεδομένα. Οι ιδιαιτερότητες της τοποθεσίας επηρέασαν κατά βάση τη φάση λειτουργίας στην οποία λήφθηκαν υπόψιν τοπικά κλιματικά δεδομένα ενώ σαν πηγές ενέργειας θεωρήθηκαν το φυσικό αέριο (για θέρμανση, ζεστό νερό και μαγείρεμα) και το ηλεκτρικό ρεύμα (συσκευές, τεχνητός φωτισμός, συστήματα ψύξης στα γραφεία). Στη εργασία αυτή οι μελετητές επέλεξαν η εκτίμηση του αντίκτυπου κατά τη φάση λειτουργίας να βασιστεί σε συμβατική χρήση των τριών κτιρίων. Για τη φάση

κατασκευής και καταστροφής του κτιρίου χρησιμοποιήθηκαν βάσεις δεδομένων του λογισμικού Ecoinvent.

Οι ερευνητές καταλήγουν στο ότι η φάση λειτουργίας έχει τη σημαντικότερη συμβολή στον συνολικό περιβαλλοντικό αντίκτυπο της κατασκευής, από 77% στη μονοκατοικία έως και 85% στα κτίρια γραφείων, ενώ οι συνέπειες της φάσεως κατασκευής κυμαίνονται από 14% στα γραφεία έως 21% στη μονοκατοικία. Ωστόσο τονίζουν ότι οι συνέπειες της φάσης λειτουργίας αναμένεται να μειωθούν σημαντικά με το πέρασμα των χρόνων λόγω καινοτομιών σχετικά με την ενεργειακή απόδοση των κτιρίων αλλά και λόγω της αυξανόμενης χρήσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

Σχετικά με την ολοκληρωμένη LCA αποδείχτηκε ότι η πολυκατοικία χαρακτηρίζεται από τις μικρότερες συνολικές εκπομπές CO<sub>2</sub> ενώ η μονοκατοικία από τις μεγαλύτερες (Σχήμα 3.8). Οι ερευνητές επισημαίνουν την ανάγκη ενσωμάτωσης της LCA σε όλα τα κτίρια ώστε να επιτευχθεί η τόσο σημαντική μείωση των καταναλώσεων ενέργειας και των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα, ωστόσο τονίζουν πως πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή διότι υπάρχει πάντα το ρίσκο να μειώνοντας τον αντίκτυπο της φάσης λειτουργίας παράλληλα να αυξάνεται αυτός της φάσεως κατασκευής.



Σχήμα 3.8: Ολοκληρωμένη LCA - Συνολικός αντίκτυπος συγκριτικά στα τρία κτίρια



Στο δεύτερο κομμάτι της έρευνας εξετάστηκαν διάφορες προσεγγίσεις με στόχο την βελτιστοποίηση των κτιρίων υπό την οπτική της LCA, ξεκινώντας με λύσεις που αφορούν τον σκελετό των κτιρίων όπως τα μονωτικά υλικά, το είδος και πάχος της τοιχοποιίας, τις εγκαταστάσεις (αντικατάσταση συστημάτων θέρμανσης και ενσωμάτωση έξυπνων συστημάτων όπως τα ενεργητικά και παθητικά ηλιακά συστήματα). Οι μελετητές τονίζουν ότι στόχος των συγκεκριμένων βελτιστοποιήσεων είναι να επιτευχθεί μια βαθύτερη κατανόηση της προσφοράς των κατασκευαστικών βελτιώσεων σε σχέση με τις περιβαλλοντικές συνέπειες, παρά να παραχθούν απόλυτες εκτιμήσεις. Οι περιβαλλοντικές συνέπειες των προτεινόμενων βελτιστοποιήσεων εξετάστηκαν, εντός του περιεχομένου της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής, μέσω της μεθόδου Indicator 99. Χρησιμοποιήθηκαν έξι διαφορετικά σενάρια βελτιστοποίησης τα οποία απέδειξαν ότι βελτίωση των υλικών του σκελετού (είδος και πάχος) μειώνει σημαντικά τον συνολικό αντίκτυπο του κτιρίου. Επίσης βελτιώσεις στα συστήματα ψύξης και θέρμανσης μειώνουν και αυτές σημαντικά τις περιβαλλοντικές συνέπειες ενώ η εγκατάσταση ηλιακών πάνελ δείχνει να μειώνει σημαντικά τον ενεργειακό αντίκτυπο ενώ παράλληλα προστίθεται ένα μικρό μόνο ποσοστό επιβάρυνσης στον αντίκτυπο της φάσης κατασκευής. Τέλος οι ερευνητές τονίζουν ξανά ότι είναι σημαντική η προσεκτική εκτίμηση της σχέσης κόστους-οφέλους κάθε προτεινόμενης βελτιστοποίησης ώστε να αποφευχθεί η απλή μεταφορά της επιβάρυνσης από τη μία φάση στην άλλη.

Η μελέτη αυτή αποτελεί ένα πολύ καλό παράδειγμα τόσο Ανάλυσης Κύκλου Ζωής όσο και βελτιστοποίησης διότι ακόμα και αν υπάρχει μία πλούσια βιβλιοθήκη ερευνών που παρουσιάζουν περιπτώσεις κτιρίων που εκτιμώνται με τη μέθοδο της LCA, λίγες από αυτές παρέχουν λειτουργικά μέσα όπως πίνακες και γραφήματα, διαθέσιμα στους επαγγελματίες ώστε να κατανοήσουν την LCA και να την αντιμετωπίσουν σαν ένα εργαλείο οικολογικού σχεδιασμού, και στη συγκεκριμένη έρευνα υπάρχει πλήθος από τέτοια.

### 3.5 Μελέτη 5

C.K. Chau , T.M. Leung, W.Y. Ng. «A review on Life Cycle Assessment, Life Cycle Energy Assessment and Life Cycle Carbon Emissions Assessment on buildings», Applied Energy (2015)

Το άρθρο αυτό ασχολείται με τα τρία βασικά είδη ανάλυσης κύκλου ζωής (LCA) και επικεντρώνεται στο αν αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως εργαλεία για την λήψη

αποφάσεων όσον αφορά το σχεδιασμό και την κατασκευή κτιρίων. Αυτά τα τρία βασικά είδη είναι η κλασική ανάλυση κύκλου ζωής (LCA) η ανάλυση κύκλου ζωής με βάση τις ενεργειακές απαιτήσεις (LCEA) και η ανάλυση κύκλου ζωής με βάση τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (LCCO<sub>2</sub>A). Παρόλο που αυτά τα τρία είδη χρησιμοποιούν παρόμοιες μεθοδολογίες, τα αποτελέσματα και τα συμπεράσματα στα οποία καταλήγουν έχουν αρκετές διαφοροποιήσεις σε κάποια σημεία. Επίσης το ότι αυτά χρησιμοποιούν διαφορετικές λειτουργικές μονάδες καθιστά την άμεση σύγκριση των αποτελεσμάτων τους καθώς και τον καθορισμό κάποιων σημείων αναφοράς δύσκολη, κάνοντας την χρησιμότητα τους ως εργαλεία λήψης αποφάσεων αμφίβολη (Σχήμα 3.9 και 3.10).

**Table 7**  
Summary of factors which contribute to discrepancies in results between different types of life cycle studies.

Streams of life cycle studies in focus	Contributing factors to discrepancies in their results
Between LCA and LCCO <sub>2</sub> A studies	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Types of resources input and environmental loadings considered</li> </ul>
Between LCA and LCEA studies	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Types of resources input and environmental loadings considered</li> </ul>
Between LCEA and LCCO <sub>2</sub> A studies	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Level of usage of renewable energy</li> <li>• Types of fuel mixes</li> <li>• Types of material processes which involve emitting and/or sequestering carbon</li> </ul>
Within LCA studies	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Types of impact categories included in the assessment</li> <li>• Set of weightings used for aggregating different types of impact categories</li> <li>• Inventory included in different tools</li> <li>• Types of LCA tools employed</li> <li>• Types of functional units</li> </ul>
Within LCEA studies	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Types of energy in focus (primary vs secondary)</li> <li>• Primary energy factor value</li> <li>• Type of functional units</li> </ul>
Within LCCO <sub>2</sub> A studies	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Types of functional units</li> </ul>

Σχήμα 3.9: Παράγοντες που συμβάλουν στη διαφοροποίηση των αποτελεσμάτων

**Table 8**  
A summary of limitations of life cycle studies as decision making support tools.

Category	Limitations
Boundary scoping	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Only focuses on environmental impacts</li> <li>• Some environmental qualities such as indoor air quality are not included</li> <li>• Economic and social dimensions of sustainability are not included</li> <li>• Environmental impacts are assumed to be constant over time</li> <li>• Geographic site specific factors are not included</li> </ul>
Methodology framework	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Different tools may include different types of impact categories</li> <li>• Different studies may adopt different normalization factor, grouping or weighting methods</li> <li>• Different studies may have different assumptions on building configurations, climate conditions, etc.</li> <li>• Assumptions in studies may lead to uncertainties</li> </ul>
Data inventories	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Materials/products from different manufactures cannot be compared</li> <li>• A lack of inventories for new innovative materials</li> <li>• Availability and uncertainty of inventory data can affect results</li> </ul>
Practices	<ul style="list-style-type: none"> <li>• The lack of benchmarks in LCA results</li> <li>• Life cycle evaluations of buildings are more complicated than conventional products</li> <li>• Reluctance to move design timeline</li> <li>• A lack of chain management responsibilities</li> </ul>

### Σχήμα 3.10: Περιορισμοί των μελετών κύκλου ζωής

Για αυτό το λόγο η έρευνα αυτή κάνει μια ανάλυση στις μεθοδολογίες που εφαρμόζει η κάθε LCA προκειμένου να εκτιμήσει τον κύκλο ζωής ενός κτιριακού και τονίζει τις διαφορές και ομοιότητες αυτών των μεθόδων προκειμένου να γίνει πιο κατανοητός ο σκοπός τους. Έτσι βλέπουμε ότι παρά τις διαφορές τους, μπορούμε να καταλήξουμε σε κάποια κοινά και σίγουρα συμπεράσματα όπως το γεγονός ότι η φάση λειτουργίας και τα υλικά κατασκευής αποτελούν το βασικότερο κομμάτι των επιδράσεων που έχει μια κατασκευή στο περιβάλλον.

## 3.6 Μελέτη 6

Adem Atmaca, Nihat Atmaca. «Life cycle energy (*LCEA*) and carbon dioxide emissions (*LCCO<sub>2</sub>A*) assessment of two residential buildings in Gaziantep, Turkey», Energy and Buildings (2015)

Σήμερα τα κτιριακά είναι υπεύθυνα για το 40% της παγκόσμιας χρήσης ενέργειας και του 33% των παγκόσμιων εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Για αυτό το λόγο, αυτή η έρευνα διεξάγει δύο διαφορετικές αναλύσεις κύκλου ζωής με βάση τις ενεργειακές απαιτήσεις (*LCEA*) τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (*LCCO<sub>2</sub>A*) για δύο διαφορετικά κτίρια στην Τουρκία, μια υπαίθρια και μια αστική κατοικία. Αφού περιγράψει πλήρως τις δύο

κατοικίες στη συνέχεια εφαρμόζει τα (*LCEA*) και (*LCCO<sub>2</sub>A*) για κάθε φάση του κύκλου ζωής των κτιρίων λαμβάνοντας υπόψιν κάποιες αβεβαιότητες και κάνοντας κάποιες εύλογες παραδοχές. Κατόπιν κάνει μια άμεση σύγκριση μεταξύ των δύο κτιρίων τόσο για την δαπανημένη ενέργεια όσο και για τις παραγόμενες εκπομπές για κάθε φάση του του κύκλου ζωής τους (Σχήμα 3.11).

Η έρευνα καταλήγει στο ότι ένα κτίριο για να είναι αποδοτικό όσον αφορά την κατανάλωση ενέργειας και τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα κατά την διάρκεια του κύκλου ζωής του θα πρέπει να ληφθούν υπόψιν παράγοντες όπως τα υλικά, η ανθεκτικότητά τους στο χρόνο και η διαθεσιμότητά τους από τοπικές πηγές καθώς επίσης και η ύπαρξη διαθέσιμων εγκαταστάσεων ανακύκλωσης και απόθεσης των υλικών που προκύπτουν κατά την κατεδάφιση.

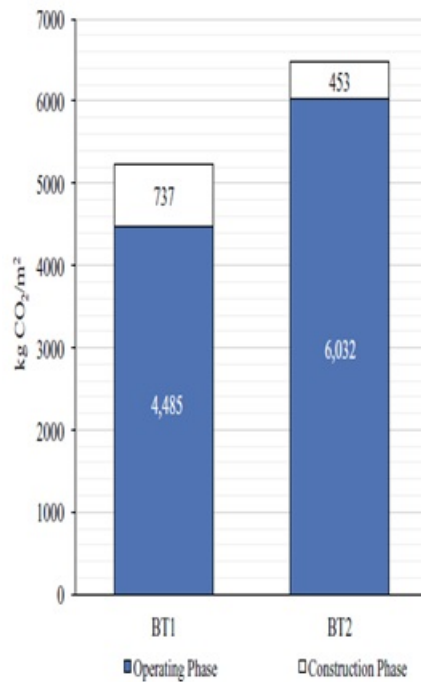


Fig. 11. The CO<sub>2</sub> emissions of BT1 and BT2.

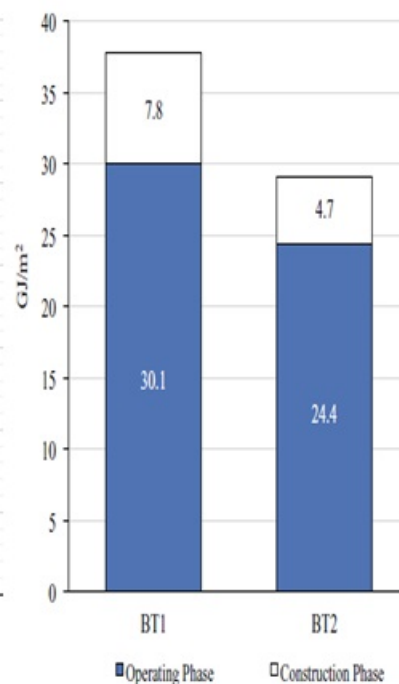


Fig. 10. Primary energy requirements of BT1 and BT2.

Σχήμα 3.11: Ενεργειακές απαιτήσεις και εκπομπές CO<sub>2</sub> στις φάσεις κατασκευής και λειτουργίας για τα δύο κτίρια

## Κεφάλαιο 4

# Ανάλυση κύκλου ζωής ως προς τον ενεργειακό αντίκτυπο και τις εκπομπές του CO<sub>2</sub>

Γενικότερα η LCA είναι στοχευμένη ανάλογα με την ανάλυση που θέλουμε να πραγματοποιήσουμε πάνω στα προβλήματα που δημιουργούνται στο περιβάλλον από την αντίστοιχη διεργασία-προϊόν-κατασκευή που μελετάμε. Τα αποτελέσματα που θα εξάγουμε μπορούν να ενταχθούν σε 2 βασικές κατηγορίες:

1. Επιπτώσεις πάνω σε περιβαλλοντικά θέματα όπως π.χ. παγκόσμια υπερθέρμανση, όξυνση του περιβάλλοντος, η καταστροφή του όζοντος.
2. Γενικότερα θέματα ανησυχίας όπως π.χ. ανθρώπινη υγεία, το φυσικό περιβάλλον και τους πόρους γενικότερα.

Συγκεκριμένα εμείς, στην παρούσα διπλωματική εργασία, θα ασχοληθούμε με δύο πολύ συγκεκριμένες επιπτώσεις που έχει η κατασκευή κτιρίων στο περιβάλλον και αφορούν αφενός τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, και αφετέρου το ενεργειακό αντίκτυπο της κατασκευής. Επομένως θα διεξάγουμε δυο συγκεκριμένα είδη LCA τα οποία είναι πολύ διαδεδομένα, τα αποτελέσματα τους εύκολα ποσοτικοποιούνται και είναι εύχρηστα και κατανοητά, προκειμένου να καταλήξουμε σε κάποια χρήσιμα συμπεράσματα. Επίσης οι λειτουργικές μονάδες και τα αποτελέσματα που προκύπτουν δεν εξαρτώνται τόσο από

τοπικούς ή κρατικούς παράγοντες, πράγμα που σημαίνει ότι οι LCEA και  $LCCO_2A$  μπορούν να εφαρμοστούν γενικά χωρίς να επηρεάζονται από γεωγραφικούς και άλλους παράγοντες. Έτσι για παράδειγμα θα μπορούσαμε αν θέλαμε να τρέξουμε αυτές τις αναλύσεις για δύο ή παραπάνω κτίρια τα οποία βρίσκονται σε διαφορετικές χώρες και τα αποτελέσματα να είναι άμεσα συγκρίσιμα.

## 4.1 Στόχος και Πεδίο

Ο στόχος της συγκεκριμένης ανάλυσης κύκλου ζωής είναι να εκτιμήσει τον περιβαλλοντικό αντίκτυπο, ως προς την ενέργεια που καταναλώνεται και τις εκπομπές του διοξειδίου του άνθρακα, της χρήσης διαφόρων δομικών και μη υλικών που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή ενός αριθμού τυπικών κτιρίων από σκυρόδεμα.

Για να δημιουργηθεί μια πιο κατανοητή εικόνα του κύκλου ζωής ενός κτιρίου είναι απαραίτητη η προσέγγιση του κύκλου ζωής σε φάσεις. Με δεδομένο ότι υπάρχει μεγάλο ενδιαφέρον στην επιλογή υλικών καθώς και στα κριτήρια με τα οποία χαρακτηρίζεται ένα υλικό ως βέλτιστη επιλογή όσον αφορά το περιβάλλον, το αρχικό στάδιο της μελέτης αφορά την ανάλυση του κάθε υλικού ξεχωριστά προτού γίνει ο συνδυασμός αυτών στο δεδομένο κτιριακό μοντέλο.

Σε αυτό το αρχικό στάδιο λοιπόν επιλέχθηκε μια πληθώρα των πιο διαδεδομένων στην αγορά μονωτικών υλικών, σκυροδεμάτων και επιχρισμάτων και έγινε η ανάλυση των ιδιοτήτων τους.

Μετά ακολούθησε η εφαρμογή τους στο κατασκευαστικό μοντέλο, κάθε φορά με διαφορετικούς συνδυασμούς αυτών.

Εδώ λοιπόν έρχεται ο δεύτερος στόχος της διπλωματικής που είναι να δημιουργήσει μια κατάλληλη πλατφόρμα για σύγκριση του περιβαλλοντικού αντίκτυπου που έχουν τα διαφορετικά υλικά, ίδιας όμως κατηγορίας-χρήσης προκειμένου να καταλήξουμε στο βέλτιστο μοντέλο, σε περιβαλλοντικούς όρους.

Οι λειτουργικές μονάδες που χρησιμοποιήθηκαν είναι: MJ/kg υλικού όσον αφορά την απαιτούμενη ενέργεια και kg  $CO_2$ /kg υλικού όσον αφορά τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα.

Πρέπει να τονιστεί ότι η ανάλυση που πραγματοποιήθηκε στην συγκεκριμένη εργασία είναι σε αρχικό στάδιο αφού μελετήθηκε μόνο η φάση κατασκευής και προκειμένου τα αποτελέσματα να θεωρηθούν τελικά απαιτείται περαιτέρω έρευνα στα σημεία που δεν ανήκουν στο αντικείμενο μελέτης της παρούσας διπλωματικής εργασίας και αναλύθηκαν μόνο σε θεωρητικό επίπεδο (π.χ. εκπομπές άλλων ρυπογόνων ουσιών, κατανάλωση ενέργειας στη φάση λειτουργίας, μεταφορά υλικών).

## 4.2 Ανάλυση Υλικών

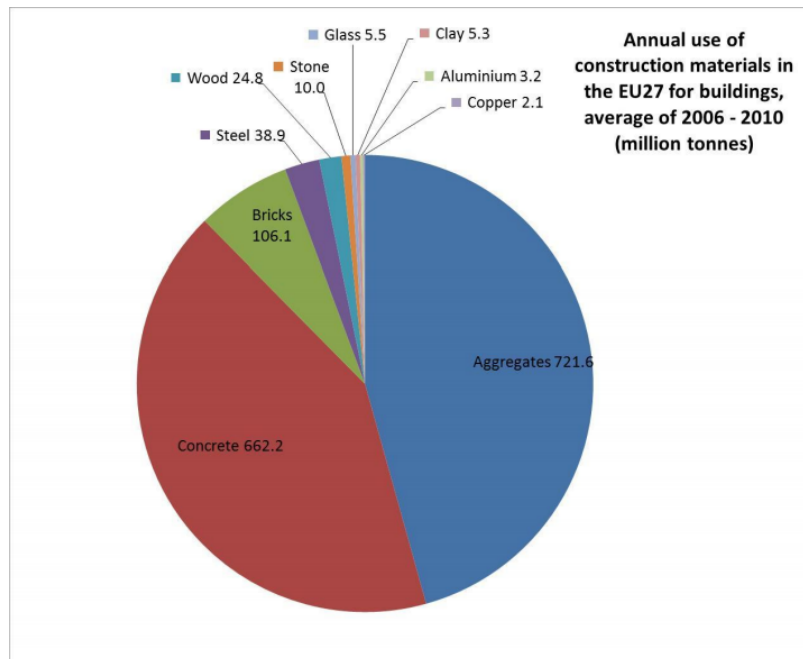
Στις χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης καταναλώθηκαν 1.200-1.800 εκατομμύρια τόνοι κατασκευαστικών υλικών ετησίως, από το 2003 έως το 2011, για κατασκευή νέων κτιρίων και ανακαίνιση παλαιότερων. Στα Σχήματα 4.1 και 4.2 αναπαριστάται το ποσοστό των υλικών που συμμετείχαν στη σύνθεση της συνολικής κατανάλωσης και πληροφορίες για αυτά.



Source: CRI calculations.

Σχήμα 4.1: Δεδομένα της χρήσης κατασκευαστικών υλικών στην Ευρωπαϊκή Ένωση, 2003-2011

Τα δεδομένα και οι πληροφορίες που συγκεντρώθηκαν σχετικά με τη χρήση των κατασκευαστικών υλικών υποδεικνύουν ότι το σκυρόδεμα, τα αδρανή ( άμμος, χαλίκι και θρυμματισμένη πέτρα) καθώς και τα τούβλα, είναι υπεύθυνα για σχεδόν το 90% της συνολικής χρήσης υλικών.

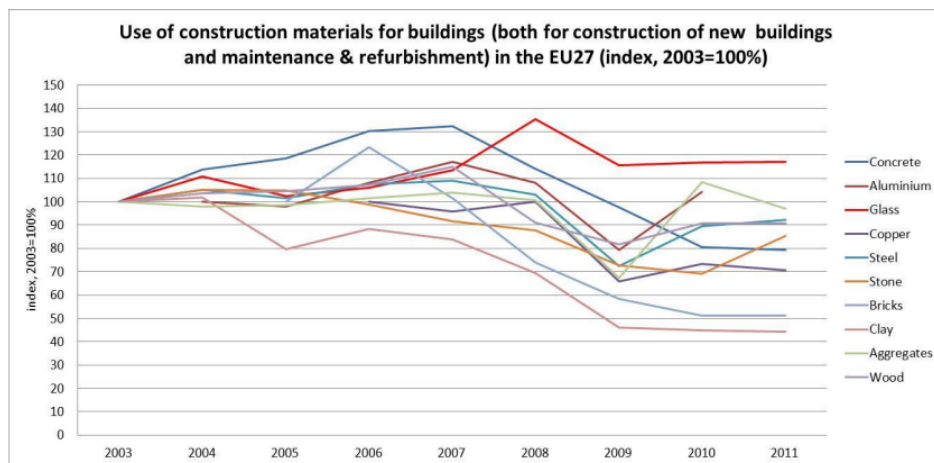


Source: CRI calculations.

Σχήμα 4.2: Μέση ετήσια κατανάλωση κατασκευαστικών υλικών στην Ευρωπαϊκή Ένωση, 2006-2010

Είναι εμφανές ότι το μεγαλύτερο ποσοστό αφορά τα αδρανή, τα οποία καλύπτουν περίπου το 45% του συνόλου των υλικών, κατά βάρος, ακόμα και αν αγνοηθεί η χρήση αυτών στην παραγωγή σκυροδέματος. Το σκυρόδεμα, με 42%, είναι το δεύτερο μεγαλύτερο ποσοστό (κατά βάρος) και ακολουθούν τα τούβλα με 6,7%. Σχετικά με τα μέταλλα, το μεγαλύτερο ποσοστό αφορά τον χάλυβα με 2,5% επί του συνόλου, σε όρους βάρους, ενώ η ξυλεία αντιστοιχεί σε περίπου 1,6% της συνολικής χρήσης υλικών. Τα υπόλοιπα υλικά, συμπεριλαμβανομένων χαλκού, γυαλιού και αλουμινίου, μεταφράζονται σε ποσοστό μικρότερο του 1%. Στο Σχήμα 4.3 φαίνονται οι αλλαγές που έλαβαν χώρα στις χρήσεις των κατασκευαστικών υλικών, στην περίοδο 2003-2011. Παρά το γεγονός ότι δεν διαφαίνεται μια ξεκάθαρη και δικαιολογημένη πορεία με τα χρόνια, είναι εμφανές ότι η οικονομική κρίση επηρέασε δραματικά τον τομέα, από το 2008 και ύστερα, και οδήγησε σε μείωση της κατανάλωσης κατασκευαστικών υλικών.





Source: CRI calculations.

Σχήμα 4.3: Αλλαγές στις χρήσεις των κατασκευαστικών υλικών στην Ευρωπαϊκή Ένωση, 2003-2011

#### 4.2.1 Σκυρόδεμα

Το σκυρόδεμα σαν υλικό χαρακτηρίζεται από χαμηλό κόστος και μεγάλες αντοχές και συνεπώς θεωρείται το οικονομικότερο και ασφαλέστερο οικοδομικό υλικό, με εξαιρετική σχέση κόστους - παρεχόμενων ιδιοτήτων. Αυτός είναι και ο βασικότερος λόγος που χρησιμοποιείται ευρέως στον τομέα των κατασκευών. Το σκυρόδεμα είναι τεχνητό πέτρωμα, παρασκευάζεται με την ανάμειξη αδρανών υλικών, τσιμέντου, νερού και πρόσθετων. Είναι εξαιρετικά εύπλαστο υλικό, αφού μπορεί, όταν είναι νωπό, να λάβει οποιαδήποτε μορφή. Χαρακτηρίζεται δε από ιδιαίτερες ιδιότητες που προσφέρουν ανθεκτικότητα και προστασία από διάφορα επιθετικά περιβάλλοντα έκθεσης. Χάρη στη μεγάλη ευελιξία του είναι το πιο εύχρηστο δομικό υλικό, έχει όμως τη μικρότερη διάρκεια ζωής καθώς πρέπει να χρησιμοποιηθεί το αργότερο εντός μίας ώρας και τριάντα λεπτών από τη παραγωγή του. Ένα σωστά σχεδιασμένο σκυρόδεμα διαθέτει καλή εργασιμότητα όταν είναι φρέσκο και εξαιρετική ανθεκτικότητα και αντοχή όταν σκληραίνει. Καθώς το τσιμέντο στερεοποιείται και σκληρύνεται, το σκυρόδεμα μετατρέπεται σε συμπαγή μονόλιθο.

Το είδος του τσιμέντου που επιλέγεται για χρήση, καθώς και τα αδρανή υλικά, εξαρτώνται από την αντοχή που θέλουμε να επιτύχουμε. Οι διαφορετικές ιδιότητες των πρώτων υλών που αναμιγνύονται στη παραγωγή του σκυροδέματος (μάζα, όγκος, φυσικοχημικά χαρακτηριστικά) ανάγουν την παραγωγή σκυροδέματος σε μια εξαιρετικά

πολύπλοκη και σύνθετη διαδικασία. Οι αυστηρές διατάξεις του προτύπου προβλέπουν τις ελάχιστες δοσολογίες των πρώτων υλών ανάλογα με τις ιδιαιτερότητες της προβλεπόμενης εφαρμογής του σκυροδέματος, όπως η εργασιμότητα, η αντοχή, η πλαστικότητα, το περιβάλλον στο οποίο εκτίθεται, η απόδοση και η διάρκεια ζωής της κατασκευής. Ένα μεγάλο πρόβλημα σχετικά με το σκυρόδεμα είναι η χρήση πρόσθετων (για βελτίωση των ιδιοτήτων του κατά τη παραγωγή και τη χύτευση αλλά και όταν σκληρυνθεί), όπως πχ αμιάντου (αμιαντοσιμέντο), για το οποίο σήμερα υπάρχουν σημαντικές ενδείξεις ότι είναι καρκινογόνο. Ακόμα ένα βασικό πρόβλημα, που ενισχύεται από την τόσο εκτεταμένη χρήση του σκυροδέματος, είναι η ύπαρξη πολύ μεγάλων ποσοτήτων αυτού, οι οποίες τοποθετούνται σε χωματερές ως απόβλητα και δεν ανακυκλώνονται. Έχει υπολογιστεί ότι σχεδόν 50 εκατομμύρια τόνοι σκυροδέματος αποβάλλονται κάθε χρόνο στην Ευρωπαϊκή Ένωση. Ελάχιστες ποσότητες από αυτό το σκυρόδεμα επαναχρησιμοποιούνται ή ανακυκλώνονται γεγονός που δημιουργεί ένα τεράστιο περιβαλλοντικό κόστος. Η προσπάθεια επανάχρησης του σκυροδέματος ορίζεται πλέον ως ζωτικής σημασίας και για το λόγο αυτό πραγματοποιούνται ήδη πολλές μελέτες, σε παγκόσμιο επίπεδο, με αυτό το αντικείμενο. Μέχρι σήμερα έχει αποδειχθεί εργαστηριακά, ωστόσο δεν έχει ακόμα εφαρμοσθεί στη βιομηχανία, ότι είναι δυνατός ο διαχωρισμός του οπλισμού από το σκυρόδεμα, παρ'όλα αυτά τονίζεται ότι είναι μία οικονομικά ασύμφορη διαδικασία. Το γεγονός αυτό αποτρέπει τις βιομηχανίες να προβούν σε ουσιαστική ανακύκλωση του σκυροδέματος και μέχρι στιγμής, η πιο συνήθης τακτική, είναι να χρησιμοποιούν το ανακυκλωμένο σκυρόδεμα στη δημιουργία αδρανών.

Παρά τα προβλήματα που δημιουργούνται εξαιτίας του, το σκυρόδεμα αποτελεί αναντικατάστατο δομικό υλικό και μακράν την πιο διαδεδομένη επιλογή στον κατασκευαστικό τομέα. Μόνη λύση φαίνεται να είναι η προσπάθεια εξυγίανσης του, μέσω της μείωσης της ενσωματωμένης ενέργειας και των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα. Σύμφωνα με έρευνες, η ανάπτυξη ενός νέου υλικού με αναβαθμισμένα χαρακτηριστικά και οικολογικότερη συμπεριφορά διαφαίνεται ως η μόνη ελπίδα για μείωση του περιβαλλοντικού αντίκτυπου της χρήσης σκυροδέματος.

Μία πιο δραστική λύση αποτελεί η αποτελεσματικότερη χρήση του υλικού με μεθόδους βελτιστοποίησης. Ένα καλό παράδειγμα τέτοιας χρήσης είναι τα προκατασκευασμένα στοιχεία τα οποία λόγω της πλήρους αξιοποίησης του υλικού (αυτό χυτεύεται με ακρίβεια σε καλούπια και συνεπώς αποφεύγονται σπατάλες υλικού που συχνά συμβαίνουν στον ξυλότυπο μιας οικοδομής), της ευκολότερης κατασκευής ενός δομικού στοιχείου και συνεπώς της μειωμένης ενσωματωμένης ενέργειάς του αλλά και λόγω της ελάχιστης

χρήσης ξυλοτύπων, που συνεπάγεται μειωμένη κατανάλωση ξύλου, οδηγούν σε σημαντική εξοικονόμηση υλικών .

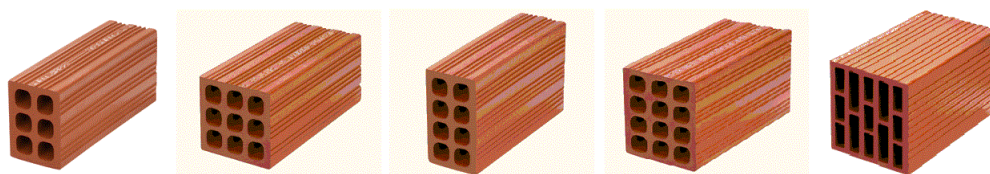
#### 4.2.2 Χάλυβας

Η διαδεδομένη χρήση του οπλισμένου σκυροδέματος κάνει τον χάλυβα ένα επίσης σημαντικό υλικό στην κατασκευή. Οι χάλυβες που χρησιμοποιούνται για τον οπλισμό σκυροδέματος σε οικοδομικά έργα είναι πολλών ειδών και συνήθως διακρίνονται ανάλογα με τη μέθοδο παραγωγής τους, με τη μορφή της επιφάνειας της ράβδου, την ολκιμότητα, τη συγκολλησιμότητα και την αντοχή τους σε διάβρωση. Παρά το γεγονός ότι η απαιτούμενη ενέργεια για την παραγωγή του χάλυβα είναι μικρή, φαίνεται ότι τελικά είναι ένα υλικό με ιδιαίτερη επιβάρυνση στο περιβάλλον, σε σύγκριση με άλλα μέταλλα. Ο βασικότερος λόγος έγκειται κυρίως στην προσπάθεια αποφυγής της διάβρωσης του η οποία επιτυγχάνεται με τη δημιουργία ανοξειδώτου χάλυβα, δηλαδή κράματα σιδήρου με ελάχιστη περιεκτικότητα σε χρώμιο (Cr) 12%. Οι χάλυβες αυτοί είναι ανθεκτικοί σε διάβρωση. Η αντοχή τους σε διαβρωτικό περιβάλλον είναι μεγαλύτερη αν περιέχουν και άλλα κραματικά στοιχεία όπως νικέλιο (Ni), μολυβδένιο (Mo), τιτάνιο (Ti) κ.λπ. Τα κράματα αυτά εκπέμπουν βαρέα μέταλλα κατά την παραγωγή τους, ενώ η εξόρυξη του σιδήρου απαιτεί μεγάλη ενέργεια. Για το λόγο αυτό, τόσο η παραγωγή όσο και η ανακύκλωση του χάλυβα, χαρακτηρίζονται από μεγάλα ποσοστά ενσωματωμένης ενέργειας καθώς και σημαντική μόλυνση.

Το ζήτημα της σύγκρισης του χάλυβα και του σκυροδέματος έχει απασχολήσει πολλούς ερευνητές καθώς από τη μία το σκυρόδεμα απαιτεί μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας για την παραγωγή του, από την άλλη ο χάλυβας χαρακτηρίζεται από σημαντικές εκπομπές αερίων που συμβάλουν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου και επιβαρύνει την ήδη εκτεταμένη εξόρυξη φυσικών πόρων. Συνεπώς το ερώτημα “σκυρόδεμα ή χάλυβας” απαιτεί μεγάλη διερεύνηση προτού μπορέσει να απαντηθεί με σιγουριά. Μία βέβαιη λύση λοιπόν θα ήταν η βελτιστοποίηση των διατομών των δομικών στοιχείων των κτιρίων, με βάση την εμπεριεχόμενη ενέργεια, ώστε να έχουμε όσο το δυνατόν βέλτιστες διατομές ανάλογα με το αποζητούμενο αποτέλεσμα.

### 4.2.3 Τούβλο

Το τούβλο ή ο πλίνθος είναι ένας τεχνητός λίθος με διάφορες διαστάσεις και σχήματα που χρησιμοποιείται, από τους αρχαίους χρόνους αλλά και σήμερα, στην οικοδομική. Τα τούβλα κατασκευάζονται από άργιλο κυρίως και άλλα υλικά. Για την κατασκευή τους ακολουθείται η παρακάτω διαδικασία: Η πρώτη ύλη καθαρίζεται, ζυμώνεται με το νερό από ειδικούς κυλίνδρους, μπαίνει σε καλούπια ή πρέσες και παίρνει διάφορα σχήματα, ψήνεται στον ήλιο ή σε καμίνια ή σε θαλάμους ηλεκτρικούς. Τα καλής ποιότητας αργιλικά δομικά στοιχεία παρουσιάζουν αντοχή σε θλίψη, ανθεκτικότητα στις καιρικές συνθήκες, στην πυρκαγιά και στις χημικές αντιδράσεις. Το τούβλο εν γένει είναι οικολογικό υλικό, παράγεται από καθαρές πρώτες ύλες που υπάρχουν σε αφθονία στη φύση και δεν παρουσιάζει καμία επίπτωση για την υγεία του χρήστη. Τα πρώτα τούβλα ήταν συμπαγή άρα είχαν και μεγαλύτερο βάρος. Από τη μια πλευρά τους είχαν λεία επιφάνεια και από την άλλη μια μικρή λακκούβα για να δένει καλύτερα το τούβλο με τη λάσπη. Η πιο συνηθισμένη τους διάσταση:  $21 \times 10 \times 4$  εκατοστά. Η ανάγκη για μικρότερο βάρος οδηγεί στα διάτρητα τούβλα, αυτά με τα οποία κτίζουμε σήμερα τη συντριπτική πλειονότητα των οικοδομών. Οι τρύπες παρέχουν και κάποιες μονωτικές ιδιότητες. Επίσης χρησιμεύουν στο να προσφύεται καλύτερα η λάσπη και να γίνεται πιο ισχυρή η τοιχοποιία. Διακρίνονται σε κατηγορίες ανάλογα με τις διαστάσεις και τις οπές τους. Κάποια από τα πιο διαδεδομένα είναι: μικρά τούβλα (εξάοπα) με διαστάσεις  $6 \times 9 \times 19$  εκατοστά, μικρά τούβλα (εννιάοπα) με διαστάσεις  $9 \times 9 \times 19$  εκατοστά, εναμισάρια (οκτάοπα) με διαστάσεις  $6 \times 12 \times 19$  εκατοστά, μεγάλα τούβλα (δωδεκάοπα) με διαστάσεις  $9 \times 12 \times 19$  εκατοστά, τουβλίνες ή τουβλέτες με διαστάσεις  $15 \times 18 \times 32$  ή  $18 \times 18 \times 32$  και παρουσιάζονται με τη σειρά που αναφέρθηκαν παρακάτω στο Σχήμα 4.4.



Σχήμα 4.4: Είδη τούβλου

#### 4.2.4 Μονώσεις

Τα θέματα μονώσεων αποτελούν ένα βασικό κομμάτι της μελέτης ενός κτιρίου. Η ανάγκη για παροχή προστασίας από τις συνθήκες που επικρατούν στο εξωτερικό περιβάλλον της κατασκευής, η εξασφάλιση όσο το δυνατόν πιο ποιοτικού και ευχάριστου κλίματος για τους χρήστες καθώς και το μείζον περιβαλλοντικό πρόβλημα των τελευταίων ετών, οδήγησαν σε μία αναγκαιότητα για εκτενή μελέτη των μονωτικών υλικών και ανάπτυξη νέων τεχνολογιών που να ανταποκρίνονται καλύτερα στις αυξημένες απαιτήσεις του κατασκευαστικού τομέα. Κάθε ένα από αυτά τα υλικά οφείλει να έχει αυξημένες αντοχές σε μία σειρά βλαβερών άμεσων και έμμεσων επιρροών και να πληρεί τις απαιτήσεις για ασφάλεια, άνεση, υγεία και οικονομία. Τα μονωτικά υλικά διακρίνονται σε κατηγορίες ανάλογα με το σκοπό τους δηλαδή τη θερμομόνωση, υγραμόνωση, στεγανοποίηση και ηχομόνωση που καλούνται να προσφέρουν. Η παρούσα εργασία εστιάζει σε θέματα θερμομόνωσης και με βάση τις αντίστοιχες απαιτήσεις αναλύει και ερευνά μια σειρά θερμομονωτικών υλικών ως προς την εμπεριεχόμενη ενέργεια τους και τον περιβαλλοντικό τους αντίκτυπο.

Ως Θερμομόνωση ορίζεται η προσπάθεια μείωσης της μεταφοράς θερμότητας μεταξύ αντικειμένων, τα οποία βρίσκονται σε θερμική επαφή ή σε απόσταση ικανή για επίδραση από ακτινοβολία.

Θερμότητα είναι η ενέργεια που μεταφέρεται εξαιτίας της διαφοράς θερμοκρασίας. Η θερμότητα μεταφέρεται από το σώμα υψηλότερης θερμοκρασίας προς το σώμα χαμηλότερης θερμοκρασίας. Η μεταφορά θερμότητας σταματά όταν εξισώνονται οι θερμοκρασίες των σωμάτων. Αυτό ονομάζεται θερμική ισορροπία. Η θερμότητα που μεταφέρεται σε ένα σώμα εξαρτάται από την μάζα του, το είδος του υλικού και από την μεταβολή της θερμοκρασίας του.

Όλα τα υλικά, θερμομονωτικά και μη, μπορούν να εμποδίσουν τη ροή της θερμότητας μέσα από τη μάζα τους. Ο χαρακτηρισμός όμως ενός υλικού ως θερμομονωτικό έγκειται στην ικανότητα του να δυσχεραίνει σε μεγαλύτερο βαθμό τη μετάδοση της θερμότητας. Στόχος των θερμομονωτικών υλικών σε ένα κτίριο είναι να μειώσουν τη θερμική ροή μεταξύ σωμάτων ή χώρων που βρίσκονται σε διαφορετική θερμοκρασία. Η θερμομόνωση μειώνει τη μεταφορά θερμότητας από αγωγή ή ακτινοβολία, εμποδίζοντας ή αντανακλώντας και όχι απορροφώντας την ενέργεια. Χαρακτηριστικό γνώρισμα των θερμομονωτικών υλικών είναι ο μικρός συντελεστής θερμοαγωγιμότητας και η δομή της

μάζας τους στην οποία παρεμβάλλεται εγκλωβισμένος αέρας σε πλέγμα ανοιχτών ή κλειστών κυψελίδων-πόρων.

Στις κτιριακές κατασκευές τα θερμομονωτικά υλικά χαρακτηρίζονται από την τιμή του  $U$  (θερμοπερατότητα). Πρόκειται για την τιμή που χρησιμοποιείται για να δώσει την αποτελεσματικότητα διαφόρων μονωτικών υλικών με διάφορα πάχη. Είναι η θερμική αντίσταση ενός  $m^2$  υλικού συγκεκριμένου πάχους που εκφράζει τη ροή θερμότητας που προκαλείται από τη διαφορά θερμοκρασίας.

Σημαντική και αποτελεσματική κατασκευαστική λύση είναι και η εξωτερική θερμομόνωση. Ως εξωτερική θερμομόνωση ορίζεται ένα σύστημα στο οποίο η μόνωση δεν διακόπτεται στα σημεία ένωσης των διαφορετικών δομικών στοιχείων. Η θερμοπρόσοψη εφαρμόζεται από τη δεκαετία του 1960 στην Δυτική και Κεντρική Ευρώπη, προσφέροντας ιδιαίτερη ευελιξία στην κατασκευή καθώς το θερμομονωτικό υλικό τοποθετείται στην εξωτερική επιφάνεια του κτιρίου, μετά την αποπεράτωση των εργασιών κατασκευής της τοιχοποιίας και αποτελώντας την πλέον αποτελεσματική λύση για την αναδρομική θερμομόνωση υφιστάμενων κτιρίων.

Η θερμομονωτική ικανότητα ενός στερεού υλικού εξαρτάται:

1. από τον όγκο του αέρα που είναι εγκλωβισμένος στους πόρους του στερεού υλικού. Όσο μεγαλύτερο είναι το πορώδες ενός υλικού, δηλαδή ο συνολικός όγκος των πόρων του, τόσο μεγαλύτερη είναι και η ικανότητα του για αντίσταση στη μετάδοση θερμότητας. Αυτό συμβαίνει διότι ο αέρας παρουσιάζει τη μεγαλύτερη αντίσταση θερμοδιαφυγής σε σχέση με κάθε στερεό. Το στερεό υλικό λειτουργεί ως θερμική γέφυρα ενώ ο αέρας που περικλείεται μέσα στους πόρους του αποτελεί το μονωτικό μέσο. Συνεπώς, σαν μια πρώτη εκτίμηση, η μικρότερη πυκνότητα ενός υλικού συνεπάγεται μεγαλύτερη θερμομονωτική ικανότητα.
2. από το μέγεθος και τη δομή των πόρων. Για αυξημένη θερμομονωτική ικανότητα ή αντίστοιχα μικρή θερμική αγωγιμότητα απαιτούνται υλικά με μικρούς, όσο το δυνατόν ίσους και ομοιόμορφα κατανεμημένους πόρους. Σε αυτή την περίπτωση ο αέρας που βρίσκεται εντός των πόρων-κυψελών ακινητοποιείται και δεν διαταράσσεται η ηρεμία του.
3. από το είδος της συμπαγούς ύλης. Σαν συμπλήρωση του (α), ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας ενός υλικού εξαρτάται επίσης από το αν το υλικό αυτό

είναι οργανικό ή ανόργανο. Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας λειτουργεί κατά αντιστοιχία με τη θερμική αγωγιμότητα του υλικού η οποία μειώνεται στα οργανικά θερμομονωτικά υλικά σε σχέση με τα ανόργανα.

4. από την περιεκτικότητα του υλικού σε υγρασία. Η θερμοαγωγιμότητα του νερού είναι κατά πολύ μεγαλύτερη (περίπου 23-25 φορές) από αυτή του αέρα. Έτσι σε περίπτωση που έχουμε εισροή νερού στους πόρους, μειώνεται η ικανότητα του υλικού να θερμομονώνει και για αυτό είναι απαραίτητη πρόβλεψη προστασίας από την υγρασία.

#### 4.2.4.1 Ταξινόμηση θερμομονωτικών υλικών

Για την επιλογή του κατάλληλου θερμομονωτικού υλικού είναι απαραίτητη η γνώση των ιδιοτήτων τους. Παρακάτω θα δοθούν μερικά από τα πιο γνωστά θερμομονωτικά υλικά και κάποια από τα χαρακτηριστικά τους, ενώ θα δοθεί ιδιαίτερη έμφαση στα υλικά τα οποία επιλέχθηκαν για μελέτη στην παρούσα εργασία.

**ΥΑΛΟΒΑΜΒΑΚΑΣ (Glass Wool)** Παράγεται μέσω μιας ειδικής διαδικασίας φυγοκέντρισης με κύριες πρώτες ύλες την άμμο και το ανακυκλωμένο γυαλί και μικρές ποσότητες άλλων ορυκτών όπως χαλαζιακή άμμος, ασβεστόλιθος και σόδα. Ως θερμομονωτικό υλικό ο υαλοβάμβακας, ανάλογα με την ποιότητα και το βάρος του, έχει συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας  $\lambda=0,035 \text{ W/mk}$  ( $0,030 \text{ kcal /mh}^\circ \text{C}$ ) έως  $0,040 \text{ W/mk}$  ( $0,035 \text{ kcal/mh}^\circ \text{C}$ ) (πραγματικό και όχι εργαστηριακό), γεγονός που δείχνει ότι έχει υψηλή απόδοση ακόμα και σε μικρά πάχη. Ο υαλοβάμβακας ως θερμομονωτικό υλικό προσφέρει αντοχή στο χρόνο, στην υγρασία, στους μύκητες, στα τρωκτικά και στους οργανικούς διαλύτες, καθώς οι ίνες του γυαλιού από τις οποίες αποτελείται είναι εξ' ολοκλήρου ανόργανο προϊόν. Επίσης προσφέρει διαπνοή (ατμοπερατότητα) που επιτρέπει στη φυσική υγρασία ενός χώρου να διαπεράσει τη μάζα του από τη ζεστή στην κρύα του πλευρά χωρίς να δημιουργεί συμπύκνωση υδρατμών, διατηρώντας έτσι τον χώρο που περιβάλλει ζεστό το χειμώνα και δροσερό το καλοκαίρι. Μάλιστα τα προϊόντα υαλοβάμβακα που προτείνονται για χρήση στους εξωτερικούς τοίχους και στις προσόψεις των οικοδομών είναι ακόμη σε υψηλό βαθμό «υδροφοβισμένα» ώστε εκτός του ότι επιτρέπουν τη διαπνοή των υδρατμών από μέσα προς τα έξω αποκλείουν και την παραμικρή είσοδο σταγόννας νερού μέσα στη μάζα τους έστω και αν είναι εκτεθειμένα στη

βροχή. Επίσης σημαντικό χαρακτηριστικό του είναι η πολύ μικρή αύξηση του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας σχετικά με την αύξηση της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος. Η απόδοσή του είναι δηλαδή εξίσου καλή και τις κρύες μέρες του χειμώνα και κατά τους καύσωνες του καλοκαιριού, πράγμα που δε συμβαίνει με τα οργανικά μονωτικά υλικά. Τέλος ο υαλοβάμβακας προσφέρει σύγχρονη ηχομόνωση και πυροπροστασία ως το μοναδικό ίσως υλικό—μαζί με τον πετροβάμβακα—που συνδυάζει σε υψηλό βαθμό τις δύο αυτές ιδιότητες μαζί με τη θερμομόνωση.

Ο υαλοβάμβακας διατίθεται στην αγορά σε διάφορες μορφές όπως πάπλωμα σε ρολά με ή χωρίς επένδυση αλουμινίου, πάπλωμα σε ρολά με επικάλυψη υαλοϋφάσματος, πλάκες υαλοβάμβακα ενισχυμένες ή όχι με υαλοϋφάσμα ή υαλοβάμβακας σε κοχύλια (Σχήμα 4.5)



Σχήμα 4.5: Είδη υαλοβάμβακα

Περιβαλλοντικές ιδιότητες:

- Εξαιτίας της ενέργειας που καταναλώνεται κατά την τήξη των πρώτων υλών του η εμπεριεχόμενη ενέργεια του υαλοβάμβακα είναι υψηλή.
- Οι πρώτες ύλες του υαλοβάμβακα είναι σε αφθονία. Για την παραγωγή του χρησιμοποιούνται κατά βάση μεγάλες ποσότητες ανακυκλωμένου γυαλιού.
- Τα απορρίμματα του υαλοβάμβακα, θεωρούνται επικίνδυνα για το περιβάλλον και η διαχείρισή τους πρέπει να είναι ανάλογη.



- Τα υλικά παραγωγής του υαλοβάμβακα είναι καθαρά υλικά ορυκτών, που δεν εγχυμονούν κινδύνους για την υγεία των χρηστών τους. Δεν ισχύει οπωσδήποτε το ίδιο για τις συγκολλητικές ύλες που αναμιγνύονται στη μάζα τους. Αν χρησιμοποιηθούν συνδετικές ουσίες από φορμόλη ή ουρία απελευθερώνουν μεγάλες ποσότητες τοξικής φορμαλδεΐδης. Είναι απαραίτητη η ενημέρωση των καταναλωτών για την προέλευση, το είδος και την ποιότητα αυτών των πρόσθετων υλικών. Βλάβες στην υγεία μπορεί όμως να προέλθουν από τις προσμίξεις των μονώσεων και εξαιτίας της ινώδους μορφής του υλικού, όπως στους ορυκτοβάμβακες.

**ΠΕΤΡΟΒΑΜΒΑΚΑΣ (Rock Wool)** Ο πετροβάμβακας αποτελείται από ίνες οξειδίου πυριτίου - αλουμινίου και έχει θερμομονωτικές και ηχομονωτικές ιδιότητες. Είναι άκαυστος και παράγεται με τήξη πετρωμάτων στους 1550-1600 °C, με αντίστοιχη διαδικασία παραγωγής με αυτή του υαλοβάμβακα. Αν και οι ίνες αυτές καθαυτές είναι αγωγοί της θερμότητας, ο συνδυασμός τους στον πετροβάμβακα περιέχει τόσο μεγάλο ποσοστό ελεύθερου χώρου (αέρα) που ακόμη και όταν συμπιέζονται σε ρολά ή σε πλάκες, ο πετροβάμβακας έχει εξαιρετικές μονωτικές ιδιότητες. Τα προϊόντα πετροβάμβακα έχουν συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας ( $\lambda$ ) μεταξύ 0,03 και 0,04 W/mK σε θερμοκρασία περιβάλλοντος καθώς επίσης και ηχομονωτικές ιδιότητες (σε αντίθεση με άλλα οικοδομικά θερμομονωτικά υλικά που δεν έχουν τόσο καλές ηχομονωτικές ιδιότητες όπως η εξηλασμένη και η διογκωμένη πολυστερίνη). Η κυριότερη χρήση του πετροβάμβακα είναι σαν μονωτικό υλικό στις οικοδομές, αλλά χρησιμοποιείται και σε βιομηχανικές εφαρμογές, ιδιαίτερα σε σχετικά υψηλές θερμοκρασίες μέχρι 1000 °C. Μια σημαντική εφαρμογή είναι στη ναυπηγική βιομηχανία. Χρησιμοποιείται επίσης ως υπόστρωμα σε υδροπονικές εφαρμογές.

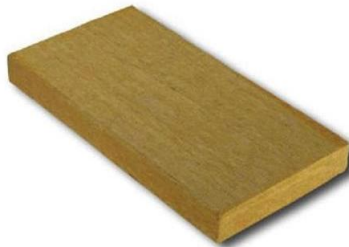
Οι πετροβάμβακες δεν ελκύουν τα τρωκτικά. Αφήνουν την υγρασία να περάσει μέσα τους (στεγνώνουν εύκολα) και δεν αναπτύσσουν μούχλα, εκτός αν παραμείνουν σε υγρό περιβάλλον. Ο πετροβάμβακας διατίθεται στην αγορά σε μορφή ρολού παπλώματος απλού ή με επικάλυψη αλουμινίου, σκληρών πλακών με ή χωρίς ενίσχυση αλουμινίου. Για να μπορεί να εφαρμοστεί σε συγκεκριμένες θέσεις, χρησιμοποιούνται και ειδικά προϊόντα με ενσωματωμένο γαλβανισμένο πλέγμα (Σχήμα 4.6, 4.7, 4.8).



Σχήμα 4.6: Πετροβάμβακας GEOLAN σε ρολό



Σχήμα 4.7: Πετροβάμβακας KNAUF σε πλάκα



Σχήμα 4.8: Πετροβάμβακας GEOLAN σε πλάκα

Περιβαλλοντικές ιδιότητες:

- Σε αντιστοιχία με τον υαλοβάμβακα, λόγω της ενέργειας που καταναλώνεται κατά την τήξη των πετρωμάτων, η εμπεριεχόμενη ενέργεια των μονώσεων πετροβάμβακα είναι σχετικά υψηλή, σε σύγκριση με άλλες ορυκτές μονώσεις.
- Οι φυσικοί πόροι του πετροβάμβακα είναι άφθονοι.

- Οι μονώσεις πετροβάμβακα είναι ανακυκλώσιμες.
- Τα πετρώματα των μονώσεων πετροβάμβακα δεν εγκυμονούν κινδύνους για την υγεία. Για τις συνδετικές ίνες όμως ισχύουν αυτά που αναφέρθηκαν και στον υαλοβάμβακα.

**ΟΡΥΚΤΟΒΑΜΒΑΚΑΣ (Mineral Wool)** Ο φυσικός ορυκτοβάμβακας προσφέρει εξαιρετική θερμομόνωση, ηχομόνωση και αντίσταση στη φωτιά. Οι μονώσεις ορυκτοβάμβακα παρασκευάζονται από ορυκτές πρώτες ύλες, όπως ασβέστη, τσιμέντο, άμμο και νερό οι οποίες τήκονται σε θερμοκρασίες 1400 – 1500 °C , αναμιγνύονται με συνθετικές ρητίνες (σε ποσοστό 7% του όγκου των πρώτων υλών) οι οποίες λειτουργούν ως συγκολλητικές ύλες και σκληρύνονται με χρήση θερμού αέρα. Στο μείγμα προστίθενται επίσης, σε ποσοστό 1 % του όγκου, υλικά που δημιουργούν πόρους, υλικά αδιαβροχοποίησης, διαποτισμού και λάδια. Δημιουργείται μία μάζα που μορφοποιείται σε ίνες οι οποίες διατίθενται ως χυτή μόνωση ή μορφοποιούνται παραπέρα με συμπύκνωση, σε μαλακές και εύκαμπτες πλάκες ή σε σκληρές μονωτικές πλάκες (Σχήμα 4.9, 4.10)



Σχήμα 4.9: Ορυκτοβάμβακας σε ρολό με και χωρίς αλουμίνιο



Σχήμα 4.10: Ορυκτοβάμβακας σε πλάκες

Περιβαλλοντικές ιδιότητες:

- Η εμπεριεχόμενη ενέργεια του ορυκτοβάμβακα είναι υψηλή, εξαιτίας της ενέργειας που καταναλώνεται κατά την τήξη των πετρωμάτων του.
- Τα αποθέματα των πρώτων υλών του ορυκτοβάμβακα είναι άφθονα. Προέρχονται μάλιστα από πηγές γειτονικές στους τόπους παρασκευής του.
- Τα απορρίμματα ορυκτοβάμβακα θεωρούνται επικίνδυνα για το περιβάλλον και η διαχείρισή τους πρέπει να είναι ανάλογη.
- Τα ορυκτά του ορυκτοβάμβακα είναι καθαρά υλικά πετρωμάτων, που δεν εγκυμονούν κινδύνους για την υγεία των χρηστών τους. Βλάβες στην υγεία μπορεί όμως να προέλθουν από τις προσμίξεις των μονώσεων.

Τα τελευταία χρόνια υπήρξαν καινοτομίες στην παραγωγή μονωτικού ορυκτοβάμβακα με δημιουργία νέων τεχνολογιών που πλεονεκτούν χάρις ένα συνδέτη χωρίς φορμαλδεΐδη, ο οποίος παράγεται από ταχέως ανανεώσιμα οργανικά υλικά, δεν περιλαμβάνει χημικά με βάση το πετρέλαιο και περιέχει 70% λιγότερη ενέργεια. Η τεχνολογία αυτή ενισχύει τα περιβαλλοντικά χαρακτηριστικά του ορυκτοβάμβακα χωρίς να επηρεάζονται η θερμική, ακουστική και η απόδοση πυρασφάλειας που διαθέτει.

**ΑΦΡΩΔΕΣ ΓΥΑΛΙ (Foam Glass)** Οι μονώσεις αφρώδους γυαλιού ανήκουν στις ανόργανες ορυκτές μονώσεις. Παρασκευάζονται κυρίως από ανακυκλωμένο γυαλί με την προσθήκη μικρών ποσοτήτων ασβεστόλιθου, άμμου και δολομίτη. Η θερμομονωτική ικανότητα του αφρώδους γυαλιού, που οφείλεται στον εγκλωβισμό ακίνητων αερίων στις κυψελίδες του, είναι καλή, με συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας για τις πλάκες  $\lambda = 0,04 - 0,06 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  και για τα τρίμματα  $\lambda = 0,09 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ . Επίσης δεν απορροφά υγρασία, ούτε προσβάλλεται από αυτή. Κινδυνεύει μόνο στον παγετό, όταν παγώσει νερό συγκεντρωμένο σε ανοιχτές κυψελίδες της επιφάνειάς του. Και τότε όμως η φθορά του είναι μόνο επιφανειακή. Δεν έχει ηχομονωτικές ιδιότητες, είναι άκαυστο υλικό και έχει υψηλό κόστος. Οι μονώσεις αφρώδους γυαλιού δεν κινδυνεύουν από μούχλα, αποσύνθεση και παράσιτα. Είναι ανθεκτικές σε οργανικά διαλυτικά, οξέα και ασθενή αλκαλικά. Οι πλάκες αφρώδους γυαλιού είναι ελαφρές και πολύ ανθεκτικές στην πίεση και σε παραμορφώσεις (Σχήμα 4.11).

Περιβαλλοντικές ιδιότητες:

- Η εμπεριεχόμενη ενέργεια του αφρώδους γυαλιού είναι πολύ υψηλή, εξαιτίας της μεγάλης ποσότητας θερμικής ενέργειας που απαιτείται, στην πρώτη φάση για την τήξη των πρώτων υλών και στη δεύτερη φάση για την αφροποίηση.
- Οι πρώτες ύλες του αφρώδους γυαλιού είναι άφθονες. Η παραγωγή του ανακυκλώνει μεγάλες ποσότητες χρησιμοποιημένου γυαλιού.
- Το αφρώδες γυαλί μπορεί να ξαναχρησιμοποιηθεί, αν δεν έχει επαλειφθεί με ασφαλτικά υλικά, όχι όμως να ανακυκλωθεί. Τα απορρίμματα του διοχετεύονται σε υγειονομική ταφή, χωρίς πρόσθετες περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις. Χρησιμοποιούνται συχνά σε υποστρώματα οδοποιίας.
- Τα υλικά παραγωγής του αφρώδους γυαλιού είναι καθαρά υλικά ορυκτών, ακίνδυνα για την υγεία των χρηστών του. Οι μονώσεις όμως έχουν το σοβαρό μειονέκτημα ότι δεν αναπνέουν με αποτέλεσμα να εμποδίζουν την άδηλη αναπνοή των χώρων με το περιβάλλον. Δημιουργούν στο κτιριακό κέλυφος φράγμα υδρατμών, που ευνοεί τη συμπύκνωση υδρατμών και τη συσσώρευση υγρασίας στο εσωτερικό των τοιχοποιιών. Εγκλωβίζουν επίσης τις τοξικές εκπομπές του κτιριακού εξοπλισμού στους εσωτερικούς χώρους.



Σχήμα 4.11: Πλάκα αφρώδους γυαλιού

**ΞΥΛΟΜΑΛΛΟ (Wood Wool)** Οι μονώσεις ξυλόμαλλου έχουν μορφή σκληρών θερμοηχομονωτικών πλακών (Σχήμα 4.12). Είναι ευρύτατα γνωστές με το όνομα Heraklith, διότι η εταιρεία Heraklith είχε αγοράσει παλαιότερα όλες τις εταιρείες παραγωγής τους. Σήμερα υπάρχουν και νέες εταιρείες, που παράγουν μονώσεις ξυλόμαλλου (π.χ. Agepan, Celit, DHD, Gutex, Hofatex, Homatherm, Inthermo, Kronoply, Pavatex, Steico, Unger Diffutherm κ.α.). Οι πλάκες ξυλόμαλλου παρασκευάζονται από λεπτές, μακριές λωρίδες ροκανισμένου ξύλου κωνοφόρων,

συνήθως πεύκου ή έλατου, συγκολλημένες μεταξύ τους με ορυκτές συγκολλητικές ύλες. Στεγνοί κορμοί τοποθετούνται σε κατάλληλα μηχανήματα – ροκάνια που ζύνουν το ξύλο και αποκολλούν λωρίδες. Ακολουθεί επεξεργασία των λωρίδων με υλικά προστασίας του ξύλου. Στη συνέχεια οι λωρίδες διαποτίζονται με συγκολλητική ύλη, συμπιέζονται και ξηραίνονται σε υψηλές θερμοκρασίες.

Οι συγκολλητικές ύλες είναι τσιμέντο, μαγνησίτης (λευκόλιθος, ανθρακικό ορυκτό του μαγνήσιου) ή και γύψος. Όταν στεγνώσουν εγκλωβίζουν τον αέρα που περιέχεται στο ξυλόμαλλο και ταυτόχρονα συγκολλούν τις ίνες του.

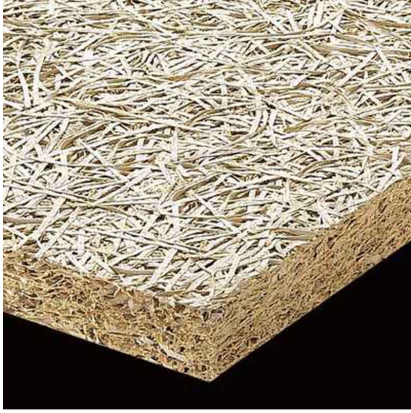
Το ξυλόμαλλο παρουσιάζει, συγκρινόμενο με άλλα θερμομονωτικά υλικά, σχετικά υψηλές τιμές θερμικής αγωγιμότητας με συντελεστή  $\lambda = 0,09-0,10 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ , δηλαδή απαιτεί αύξηση του πάχους της θερμομονωτικής στρώσης. Το μειονέκτημα αυτό εξισορροπείται από άλλα πλεονεκτήματα που προσφέρει, όπως σταθερότητα των πλακών του, εξαιρετική πρόσφυση στο οπλισμένο σκυρόδεμα, χωρίς πρόσθετη στήριξη, καθώς και εξίσου καλή πρόσφυση του επιχρίσματος πάνω στην επιφάνειά του.

Το ξυλόμαλλο παρουσιάζει μικρή αντίσταση στη διάχυση υδρατμών ( $\mu = 2 - 5$ ), αλλά και μικρή ταχύτητα προσρόφησης υδρατμών. Έτσι, ενώ η εξωτερική του επιφάνεια υγραίνεται, η υγρασία δεν διεισδύει γρήγορα στη μάζα του και στεγνώνει εύκολα, χωρίς να συγκρατεί υγρασία. Μπορεί όμως να εμφανίσει παραμορφώσεις, όταν εκτεθεί για μεγάλο χρονικό διάστημα στη βροχή. Γιαυτό πρέπει να επιχρίεται σε σύντομο χρονικό διάστημα μετά την τοποθέτησή του. Έχει καλές ηχομονωτικές ιδιότητες, ανάλογες με τις θερμομονωτικές, καθώς επίσης αναφλέγεται δύσκολα και καίγεται πολύ αργά. Οι μονώσεις ξυλόμαλλου έχουν σχετικά μεγάλο βάρος. Είναι σκληρές, άκαμπτες και μη ελαστικές. Κόβονται με κοπτικά μηχανήματα, χειροκίνητα ή ηλεκτρικά και έχουν σχετικά υψηλό κόστος.

Περιβαλλοντικές ιδιότητες:

- Η εμπεριεχόμενη ενέργεια στις πλάκες ξυλόμαλλου είναι χαμηλή. Η τιμή της υπολογίζεται περίπου σε  $165 \text{ kWh/m}^3$ .
- Οι πρώτες ύλες της παραγωγής ξυλόμαλλου είναι ανανεώσιμες (ξύλο) ή άφθονες (τσιμέντο, μαγνησίτης).
- Οι κατεστραμμένες πλάκες ξυλόμαλλου, που δεν μπορούν να ξαναχρησιμοποιηθούν καταλήγουν στα οικοδομικά απορρίμματα (μπάζα). Δεν υπάρχει σήμερα άλλος τρόπος ανακύκλωσης τους.

- Το ξυλόμαλλο είναι υλικό καθαρό και ακίνδυνο για τους ζωντανούς οργανισμούς, αναπνέει και επιτρέπει την άδηλη αναπνοή των δομικών στοιχείων που περιβάλλει.



Σχήμα 4.12: Πλάκες Ξυλόμαλλου διαφορετικών πυκνοτήτων

**ΜΟΝΩΣΕΙΣ ΑΠΟ ΦΕΛΛΟ (Cork)** Οι μονώσεις φελλού παράγονται αποκλειστικά στις χώρες, όπου φύεται φελλοφόρος δρυς. Ο εξωτερικός φλοιός της φελλοφόρου δρυός είναι μία κρούστα ρηγματώδης, σκληρή, ανελαστική και πλούσια σε ρητίνες, ακατάλληλος για την παραγωγή προϊόντων φελλού (π.χ. πωμάτων φιαλών), αλλά χρήσιμος ως πρώτη ύλη παραγωγής μονώσεων. Ο φλοιός της εξωτερικής απόξεσης ξηραίνεται επί 6 μήνες φυσικά, καθαρίζεται καλά, θρύβεται και αλέθεται. Παράγεται ένα χοντρόκοκκο μείγμα. Ακολουθεί επεξεργασία του μείγματος (ψήσιμο) σε αεροστεγή δοχεία με υδρατμούς υψηλής θερμοκρασίας (350 °C,). Τα θρύμματα διογκώνονται και ταυτόχρονα αποδεσμεύεται και ενεργοποιείται η ζουμπερίνη, η ρητίνη του φελλού, η οποία τα συγκολλά μεταξύ τους. Οι θερμοκρασίες που απαιτούνται είναι ανάλογες της περιεκτικότητας του αρχικού μείγματος σε ρητίνες. Συχνά προστίθενται στο μείγμα φυσικές ίνες, όπως γιούτας, που το καθιστούν εύπλαστο, συνεκτικό και επιτρέπουν τη κοπή λεπτών φύλλων φελλού.

Όταν οι θερμοκρασίες επεξεργασίας είναι πολύ υψηλές, παράγονται δύσσομες εκπομπές, ύποπτες πρόκλησης καρκίνου, χωρίς αυτό να έχει ακόμη επιβεβαιωθεί επίσημα. Μετά την

ψύξη της μάζας του επεξεργασμένου μείγματος, αποκόβονται οι πλάκες του φελλού. Αυτές είναι οι μονωτικές πλάκες ψημένου φελλού, που έχουν τη μεγαλύτερη κυκλοφορία στην αγορά (Σχήμα 4.13).



Σχήμα 4.13: Πλάκες Φελλού

Από τη μάζα του διογκωμένου μείγματος, με μικρή πρόσθετη επεξεργασία, παράγονται και προϊόντα χυτής μόνωσης φελλού (Σχήμα 4.14).



Σχήμα 4.14: Χυτή μόνωση φελλού



Από το αρχικό, άψητο μείγμα, με την προσθήκη συνθετικών υλικών, ασφαλτικών διαλυμάτων ή χημικών συγκολλητικών υλών, παράγονται οι πεπιεσμένες (ή εμποτισμένες) πλάκες φελλού.

Η θερμική αγωγιμότητα των μονώσεων φελλού είναι χαμηλή, με συντελεστή  $\lambda = 0,042 - 0,046 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ . Επίσης εμφανίζουν σχετικά μικρή αντίσταση στη διάχυση υδρατμών. Έκθεσή σε χρόνια υγρασία μειώνει τη θερμομονωτική τους ικανότητα. Ο φελλός είναι πολύ ανθεκτικός σε αποσύνθεση, στους μύκητες, έντομα και παράσιτα εξαιτίας της υψηλής του περιεκτικότητας σε ρητίνες. Αναπνέει και έτσι συμβάλλει στην καλή ποιότητα του εσωτερικού αέρα και στην ευεξία των εσωτερικών χώρων. Οι μονώσεις φελλού έχουν καλές ηχομονωτικές και θερμομονωτικές ιδιότητες αλλά κατατάσσονται στα υλικά μέτριας πυραντίστασης, εκτός και εάν υποστούν ειδική επεξεργασία. Κατά την καύση τους δεν παράγονται επικίνδυνα καυσαέρια. Είναι πολύ ελαφρές, έχουν μεγάλο χρόνο ζωής και το κόστος τους είναι μέτριο.

Περιβαλλοντικές ιδιότητες:

- Η εμπεριεχόμενη ενέργεια των μονώσεων ψημένου φελλού είναι περίπου  $440 \text{ kWh}/\text{m}^3$ , της χυτής μόνωσης είναι  $270 - 380 \text{ kWh}/\text{m}^3$ . Όταν μεταφέρονται σε μεγάλη απόσταση από τις χώρες παραγωγής (Πορτογαλία) οι τιμές αυτές αυξάνονται.
- Η πρώτη ύλη των μονώσεων είναι ανανεώσιμη. Στις χώρες παραγωγής πρέπει να αποφεύγονται οι μονοκαλλιέργειες.
- Οι μονώσεις φελλού, όταν διατηρούνται σε καλή κατάσταση, ξαναχρησιμοποιούνται. Ανακυκλώνονται πλήρως ή αφομοιώνονται από το περιβάλλον, αφού κλείσουν τον κύκλο ζωής τους.
- Οι μονώσεις ψημένου φελλού είναι ακίνδυνες για την υγεία. Η επικινδυνότητα των πεπιεσμένων, εμποτισμένων μονώσεων εξαρτάται από τη χημική σύσταση των υλικών συγκόλλησης που περιέχουν, όπως Enzipren (καρκινογόνο), φορμαλδεΰδη ή ασφαλτικά διαλύματα.

**ΛΙΝΑΡΟΜΑΛΛΟ (Flax Wool)** Οι μονώσεις λιναριού παρασκευάζονται από τις κοντές ίνες του φυτού, που περισσεύουν από τη νηματουργική και υφαντουργική επεξεργασία των πολύτιμων μακριών ινών του. Οι ίνες στρώνονται με χτένια σε μορφή παπλώματος. Συγκολλούνται με τη χρήση φυσικής κόλλας, όπως αμυλόκολλας της πατάτας. Δημιουργούνται έτσι πλάκες (Σχήμα 4.16) διαφόρων βαθμών σκληρότητας και πάχους 40 – 160 mm. Όταν οι πλάκες έχουν πάχος > 100 mm, ενισχύονται με πολυεστερικές ίνες.

Η θερμική αγωγιμότητα των μονώσεων λιναριού είναι μικρή, με συντελεστή  $\lambda = 0,040 - 0,045 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ . Ακόμα προσροφούν από τον αέρα υγρασία και την αποδίδουν εξίσου εύκολα. Εξισορροπούν την υγρασία των εσωτερικών χώρων. Δεν προσβάλλονται από την υγρασία, ούτε από μύκητες.

Οι ίνες λιναριού περιέχουν κυρίως κυτταρίνη. Γι αυτό δεν προσβάλλονται από τα έντομα που τρέφονται με κερατίνη, όπως οι ψύλλοι. Οι μονώσεις λιναριού έχουν καλές ηχομονωτικές ιδιότητες ενώ για την αύξηση της πυραντίστασης των μονώσεων λιναριού προστίθενται, κατά την παρασκευή τους, επιβραδυντές φωτιάς, όπως: βορικά άλατα, φωσφορική ή θειική αμμωνία ή υδρύαλος. Τέλος είναι εύκολα επεξεργάσιμες και σχετικά προσιτού κόστους.



Σχήμα 4.15: Θερμομονωτικές πλάκες λιναριού

**ΜΟΝΩΣΕΙΣ ΚΥΤΤΑΡΙΝΗΣ (Cellulose)** Οι μονώσεις κυτταρίνης παράγονται από μηχανικά τεμαχισμένο χαρτί εφημερίδων. Τα πολύ μικρά τεμάχια χαρτιού εκτίθενται σε υδρατμούς, ξαίνονται και εμποτίζονται με βορικά άλατα ή θειικό αργίλιο για να αυξηθεί η αντοχή τους στη φωτιά. Στη συνέχεια στεγνώνονται, καθαρίζονται από τη σκόνη και συσκευάζονται, με μορφή νιφάδων σε σάκους. Για την παραγωγή θερμομονωτικών πλακών

κυτταρίνης οι νιφάδες της κυτταρίνης συμπιέζονται με την προσθήκη υδρατμών σε πρέσες και προστίθενται πάλι υλικά πυροπροστασίας (Σχήμα 4.16)

Η θερμική αγωγιμότητα των μονώσεων κυτταρίνης είναι χαμηλή, με συντελεστή  $\lambda = 0,040 - 0,050 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ . Η αντίσταση στη διάχυση υδρατμών των μονώσεων κυτταρίνης είναι  $\mu = 1 - 2$ . Η κυτταρίνη προσροφά από τον αέρα υγρασία και την αποδίδει εξίσου εύκολα. Εξισορροπεί την υγρασία των χώρων. Δεν προσβάλλεται από την υγρασία, ούτε από μύκητες. Οι μονώσεις κυτταρίνης έχουν εξίσου καλές ηχομονωτικές ιδιότητες όσο και θερμομονωτικές. Η κυτταρίνη είναι υλικό μέτριας πυραντίστασης. Με την προσθήκη αλάτων, βορικού οξέος ή θειικού αργίλιου, βελτιώνεται η πυραντίσταση και η αντοχή της σε παράσιτα. Τέλος διασφαλίζει την άδηλη αναπνοή των δομικών στοιχείων. Είναι εύκολα επεξεργάσιμη και ελαστική. Κόβεται δύσκολα αλλά θρυμματίζεται εύκολα. Έχει μικρή αντοχή σε θλίψη και χαμηλό κόστος.



Σχήμα 4.16: Συσκευασμένες νιφάδες κυτταρίνης

Περιβαλλοντικές ιδιότητες:

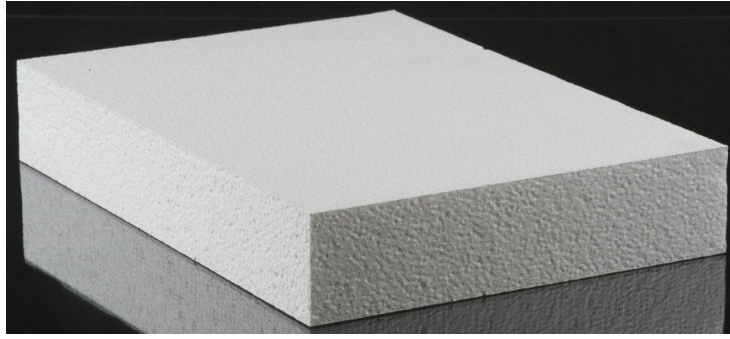
- Η εμπεριεχόμενη ενέργεια στις μονώσεις κυτταρίνης είναι πολύ χαμηλή, περίπου  $50 \text{ kWh}/\text{m}^3$ .
- Η πρώτη ύλη των μονώσεων κυτταρίνης είναι προϊόν ανακύκλωσης χαρτιού, το οποίο προέρχεται από ανανεώσιμους πόρους.
- Οι μονώσεις κυτταρίνης, αφού κλείσουν τον κύκλο ζωής τους, αφομοιώνονται από το περιβάλλον.
- Η κυτταρίνη είναι ακίνδυνη για την υγεία.

## **ΔΙΟΓΚΩΜΕΝΗ ΠΟΛΥΣΤΕΡΙΝΗ (Expanded Polystyrene EPS) Η**

διογκωμένη πολυστερίνη αποτελείται από κόκκους πολυστυριλίου, που τους ονομάζουμε κυψελίδες και είναι θερμοπλαστικοί. Οι κυψελίδες διογκώνονται και ενώνονται με θέρμανση και πίεση υδρατμών, αφήνοντας μικρά κενά μεταξύ τους. Έτσι, έχουμε την ύπαρξη τριχοειδών και ανοιχτή κυψελωτή δομή.

Έχει μεγαλύτερη ελαστικότητα και επομένως απορροφά ευκολότερα τα κρουστικά σοκ. Έτσι μειώνεται ο κίνδυνος εμφάνισης ρωγμών στα επιχρίσματα. Η διαστατική σταθερότητα της διογκωμένης πολυστερίνης στο φάσμα των συνηθισμένων θερμοκρασιών είναι καλύτερη από αυτή της εξηλασμένης που έχει και μεγαλύτερο συντελεστή γραμμικής διαστολής. Μόνο η διογκωμένη πολυστερίνη EPS δεν μεταβάλλει τον συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας  $\lambda$  στο χρόνο, με αποτέλεσμα να παρέχει αξιόπιστη θερμομόνωση για όσα χρόνια λειτουργεί το κτίριο. Έχει μικρότερο συντελεστή αντίστασης στη διάχυση υδρατμών, με αποτέλεσμα να αναπνέει καλύτερα το κτίριο, ενώ ταυτόχρονα πιθανή υγρασία που μπορεί να βρεθεί πίσω από σύστημα εξωτερικής θερμομόνωσης (είτε κατά την φάση κατασκευής είτε κάποιας αστοχίας σε άλλα δομικά στοιχεία του κτιρίου) μπορεί εξαιτίας της αυξημένης διαπνοής να εξατμιστεί. Είναι φθηνότερη κατά 25-30% της εξηλασμένης. Οι πλάκες EPS (Σχήμα 4.17) είναι το πλέον ενδεδειγμένο υλικό για εφαρμογές εξωτερικής θερμομόνωσης με βάση την διεθνή πρακτική και εμπειρία ( με ποσοστό πάνω από 80% έναντι περίπου 1% της XPS. Η διογκωμένη πολυστερίνη είναι φιλική προς το περιβάλλον.

Η διογκωμένη πολυστερίνη παρουσιάζει και μειονεκτήματα. Αρχικά η υδατοαπορρόφηση, έχει σαν συνέπεια την μείωση της θερμομονωτικής της ικανότητας. Σε κάθε περίπτωση πάντως τα επιχρίσματα των συστημάτων εξωτερικής θερμομόνωσης προστατεύουν το θερμομονωτικό υλικό από την υγρασία και γενικότερα από τα καιρικά φαινόμενα και συνεπώς η αντοχή του συστήματος εξωτερικής θερμομόνωσης εξαρτάται από την αξιοπιστία και ποιότητα των επιχρισμάτων του. Άλλο ένα χαρακτηριστικό που συχνά μειονεκτεί η διογκωμένη πολυστερίνη είναι η αντοχή της στη συμπίεση.



Σχήμα 4.17: Πλάκα EPS

Περιβαλλοντικές ιδιότητες:

- Όπως όλα τα συνθετικά υλικά, ένα τμήμα της ρύπανσης που συμπεριλαμβάνεται στην παραγωγή του υλικού οφείλεται στην εξόρυξη του πετρελαίου και στη δημιουργία ενδιάμεσων προϊόντων.
- Προέρχεται από μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (υδρογονάνθρακες) και η κατανάλωση ενέργειας για την παραγωγή του είναι αρκετά υψηλή.
- Προκαλεί ρύπανση λόγω διαφυγής τοξικών αερίων, όπως χλωροφθοράνθρακες (CFC) : πεντανίου που καταστρέφουν τη στρωβίδα του όζοντος και στυρενίου που αποτελούν νευροτοξικές ουσίες και ενοχοποιούνται για καρκινογενέσεις. Σε περίπτωση πυρκαγιάς απελευθερώνονται κι άλλες τοξικές ουσίες.
- Μπορεί να ανακυκλωθεί σε ποσοστό 20% , χρήση βρίσκει στην ενσωμάτωση με προϊόντα τσιμέντου προκειμένου να δημιουργηθεί ελαφροσκυρόδεμα για δάπεδα και οροφές.

**ΕΞΗΛΑΣΜΕΝΗ ΠΟΛΥΣΤΕΡΙΝΗ (Extruded Polystyrene XPS)** Η εξηλασμένη πολυστερίνη (Σχήμα 4.18) παράγεται με την διαδικασία της εξήλασης και είναι παράγωγο του πετρελαίου. Είναι κλειστής κυψελωτής δομής και δεν εμφανίζει κενά μεταξύ των κυψελίδων. Η κλειστή κυψελωτή δομή της εξηλασμένης πολυστερίνης, είναι αυτή που της προσδίδει τα σημαντικότερα πλεονεκτήματά της, έναντι της διογκωμένης πολυστερίνης.

Η εξηλασμένη πολυστερίνη έχει σχεδόν μηδενική απορροφητικότητα σε υγρασία και πολύ μεγάλη αντοχή σε συμπίεση. Χαρακτηρίζεται από ψηλότερο θερμομονωτικό συντελεστή σε σχέση με τη διογκωμένη πολυστερίνη και δεν προσβάλλεται από μύκητες και βακτήρια.

Η εξηλασμένη πολυστερίνη δεν αναπνέει με αποτέλεσμα να δημιουργούνται ανθυγιεινοί χώροι διαβίωσης, συμπυκνώσεις υδρατμών κλπ. Επίσης είναι καιόμενη, σε αντίθεση με την αυτοσβεννήμενη διογκωμένη πολυστερίνη η οποία δεν αναφλέγεται ούτε μεταδίδει τη φωτιά. Ακόμα μεταβάλλει τον συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας  $\lambda$  στο χρόνο. Ένα ακόμα βασικό μειονέκτημα της εξηλασμένης πολυστερίνης είναι το ότι αποδίδει χλωροφθοράνθρακα, το γνωστό σε όλους μας φρέον, που είναι επικίνδυνο αέριο και είναι ο λόγος που η εξηλασμένη πολυστερίνη ανήκει στη Μαύρη Λίστα της Greenpeace. Το φρέον που εκπέμπεται εκτός ότι είναι ανθυγιεινό, είναι και υπεύθυνο για την σταδιακή μείωση του  $\lambda$ , όσο αυτό απελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα. Το γεγονός βέβαια ότι σταδιακά το φρέον χάνεται είναι πολύ λογικό, αν αναλογιστεί κανείς ότι πρόκειται για το ίδιο πτητικό αέριο, που πρέπει να ανανεώνουμε κάθε 2-3 χρόνια στα κλιματιστικά μας, που αν και πρόκειται για κλειστό κύκλωμα, σταδιακά διαφεύγει.



Σχήμα 4.18: Πλάκες XPS

Περιβαλλοντικές ιδιότητες:

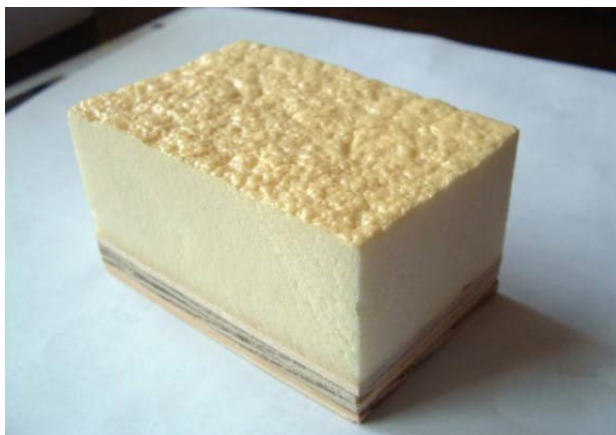
Η εξηλασμένη πολυστερίνη έχει παρόμοιες περιβαλλοντικές επιπτώσεις με τη διογκωμένη, απλά κατά την παραγωγή της υφίσταται ακόμα περισσότερη κατανάλωση ενέργειας.

**ΠΟΛΥΟΥΡΕΘΑΝΗ (Polyurethane)** Είναι το θερμομονωτικό υλικό με το μικρότερο συντελεστή θερμοπερατότητας  $\lambda=0,022$  W/m.k. Παράγεται από ανάμιξη οργανικών ουσιών με παρουσία καταλύτη και μετέπειτα διόγκωση. Η δομή της αποτελείται από κλειστές κυψέλες με τη στερεά ύλη να καταλαμβάνει ποσοστό 90-96% του συνολικού όγκου του.

Στο εμπόριο διατίθεται με τη μορφή πλακών (Σχήμα 4.19) ή προκατασκευασμένων πανό και χρησιμοποιούνται για θερμομονώσεις δωμάτων, δοκούς, τοιχία, υποστυλώματα με πρόβλεψη κατάλληλης επικάλυψης για προστασία από την ηλιακή ακτινοβολία, ψευδοροφών, κάτω μέρος κεκλιμένων στεγών, ψυγείων κλπ.

Η πολυουρεθάνη μπορεί να εφαρμοστεί και επί τόπου στο έργο με ψεκάσμο σε καθαρές επιφάνειες, απαλλαγμένες από ξένες ουσίες (λίπη, υγρασία, σκόνες κλπ.) για την καλή επικόλλησή της. Σε διαφορετική περίπτωση, από την κακή επικόλληση δημιουργούνται φουσκάματα που συν τω χρόνω καταστρέφουν τη μόνωση. Ο ψεκάσμος μπορεί να γίνει και σε επιφάνειες που είναι δύσκολη η τοποθέτηση πλακών, όπως κυλινδρικές ή θολωτές. Δεν διαβρώνεται από χημικές ουσίες, δεν προσβάλλεται από σήψη, έντομα και τρωκτικά, αντέχει σε θερμοκρασία  $-50^{\circ}\text{C}$  έως  $+110^{\circ}\text{C}$  και αν και αυτοσβενόμενο υλικό σε περίπτωση πυρκαγιάς σε θερμοκρασία άνω των  $200^{\circ}\text{C}$  εκλύει μικρές ποσότητες βλαβερών αερίων για την υγεία.

Τα σύγχρονα πολυουρεθανικά υλικά δεν εκπέμπουν επιβλαβή στοιχεία και μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως δομικά υλικά και για εσωτερικούς χώρους. Δεν επιβαρύνουν το όζον και βοηθούν στη μείωση των εκπομπών του  $\text{CO}_2$ .



Σχήμα 4.19: Δείγμα πλάκας πολυουρεθάνης

Ακολουθεί μια κατάταξη των μονωτικών υλικών ως προς τη δυνατότητα που παρέχουν για οικολογική δόμηση από το περισσότερο στο λιγότερο ευμενές για το στόχο αυτό.

1. φελλός, κυτταρίνη, ξυλόμαλλο, λιναρόμαλλο

2. ορυκτοβάμβακας
3. διογκωμένη πολυστερίνη, υαλοβάμβακας
4. εξηλασμένη πολυστερίνη, πολυουρεθάνη

### 4.3 Ανάλυση ως προς τον ενεργειακό αντίκτυπο (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. Αν θέλαμε να το εκφράσουμε αυτό με μια μαθηματική έκφραση αυτή θα ήταν της μορφής:

$$E = E_{\text{extraction}} + E_{\text{manufacture}} + E_{\text{onsite}} + E_{\text{operation}} + E_{\text{demolition}} + E_{\text{recycling}} + E_{\text{disposal}} \quad (4.1)$$

όπου:

το  $E$  αντιπροσωπεύει την συνολική ενέργεια που καταναλώθηκε καθ' όλη την διάρκεια ζωής της κατασκευής μας, και

το  $E_j$  αντιπροσωπεύει την ενέργεια που καταναλώθηκε σε κάθε φάση του κύκλου ζωής ξεχωριστά.

Προκειμένου όμως μια τέτοιου είδους μελέτη να έχει αποτέλεσμα ικανό για σύγκριση με άλλες, θα πρέπει οι ενέργειες που υπολογίζονται σε κάθε φάση να έχουν τις ίδιες μονάδες και όχι για παράδειγμα αλλού να εκφράζονται σε MJ και αλλού σε kWh.

#### 4.3.1 Μεθοδολογίες που ακολουθήθηκαν

**Φάση Κατασκευής** Αρκετά συχνά, συνηθίζεται οι ενέργειες που καταναλώνονται στα πρώτα τρία στάδια του κύκλου ζωής μιας κατασκευής (δηλαδή  $E_{\text{extraction}}$ ,



$E_{manufacture}$ ,  $E_{onsite}$ ) να ομαδοποιούνται όλες μαζί ως η ενέργεια που απαιτήθηκε καθ' όλη την διαδικασία της κατασκευής (ενσωματωμένη ενέργεια ή embodied energy). Σε αυτή την ομάδα εντάσσεται όλη η ενέργεια που απαιτήθηκε για τις εξής διαδικασίες:

- Παράγωγή των πρώτων υλών.
- Μεταφορά τους στο χώρο κατασκευής.
- Ανέγερση της κατασκευής μας.
- Ανακαίνιση-Επιδιορθώσεις που πιθανόν να χρειαστούν με την πάροδο του χρόνου.

Όπως καταλαβαίνουμε η ενσωματωμένη ενέργεια μπορεί να διαχωριστεί σε δύο κατηγορίες, την αρχικά απαιτούμενη ενέργεια (initial energy) και την ενέργεια που απαιτείται σε βάθος χρόνου, μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής μας (recurring energy).

Ως initial energy ορίζεται το σύνολο της ενέργειας που καταναλώνεται για την εξαγωγή και την κατασκευή ενός υλικού, την μεταφορά του και την ανέγερση της κατασκευής.

Ως recurring energy ορίζεται το σύνολο της ενέργειας που καταναλώνεται για την συντήρηση, επισκευή, αποκατάσταση, ανακαίνιση ή αντικατάσταση υλικών κατά τη διάρκεια ζωής του κτιρίου.

Για να υπολογιστεί η ενσωματωμένη ενέργεια (embodied energy) ενός κτιρίου, ένας μεγάλος αριθμός μελετών έχουν υιοθετήσει μια “ bottom-up ” τεχνική ή αλλιώς τεχνική προσέγγισης με βάση τις διαδικασίες που πραγματοποιούνται. Αυτή η τεχνική εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις διαθέσιμες βάσεις δεδομένων για τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στην κατασκευή καθώς και τα σχέδια-προδιαγραφές του κτιρίου για το οποίο γίνεται η μελέτη. Αυτή η τεχνική είναι γενικά επαρκής και κατάλληλη όταν οι πληροφορίες σχετικά με την κατασκευή, το σχέδιο και τις ποσότητες που χρησιμοποιήθηκαν είναι ακριβείς. Επιπλέον χρειαζόμαστε δεδομένα και πληροφορίες για τους συντελεστές ενεργειακής επιβάρυνσης. Αυτοί οι συντελεστές εκφράζουν την ενέργεια που καταναλώνεται για την παραγωγή ενός κιλού (kg) για το κάθε υλικό που χρησιμοποιήθηκε. Καταλαβαίνουμε τώρα την σημασία της ακρίβειας που πρέπει να υπάρχει τόσο στα σχέδια όσο και στην ποσότητα των υλικών που χρησιμοποιούνται. Έτσι η μαθηματική έκφραση με βάση την οποία υπολογίζουμε την αρχική ενσωματωμένη ενέργεια είναι η εξής :

$$E_{emb,initial} = \sum_1^i \alpha_i \times m_i \quad (4.2)$$

Όπου:

$\alpha$  είναι ο συντελεστής ενεργειακής επιβάρυνσης σε MJ/kg

$m$  είναι η μάζα σε kg του αντίστοιχου υλικού.

Προσοχή πρέπει να δοθεί στο ότι η μάζα δεν περιλαμβάνει μόνο την τελική ποσότητα που χρησιμοποιήθηκε αλλά και την φύρα ποσότητα που πήγε στράφι.

Όσον αφορά τώρα την recurring embodied energy αυτή προκύπτει διότι, όπως είναι φυσιολογικό, η διάρκεια ζωής κάποιων εκ των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν είναι μικρότερη απ' την διάρκεια ζωής της κατασκευής μας. Για τον υπολογισμό λοιπόν της recurring embodied energy χρησιμοποιούμε τους λεγόμενους συντελεστές αντικατάστασης οι οποίοι εκφράζουν το πόσες φορές θα χρειαστούν κάποια υλικά να αντικατασταθούν κατά την διάρκεια ζωής της κατασκευής μας.

$$E_{emb,recurring} = \sum_1^i \alpha_i \times m_i \times R_f \quad (4.3)$$

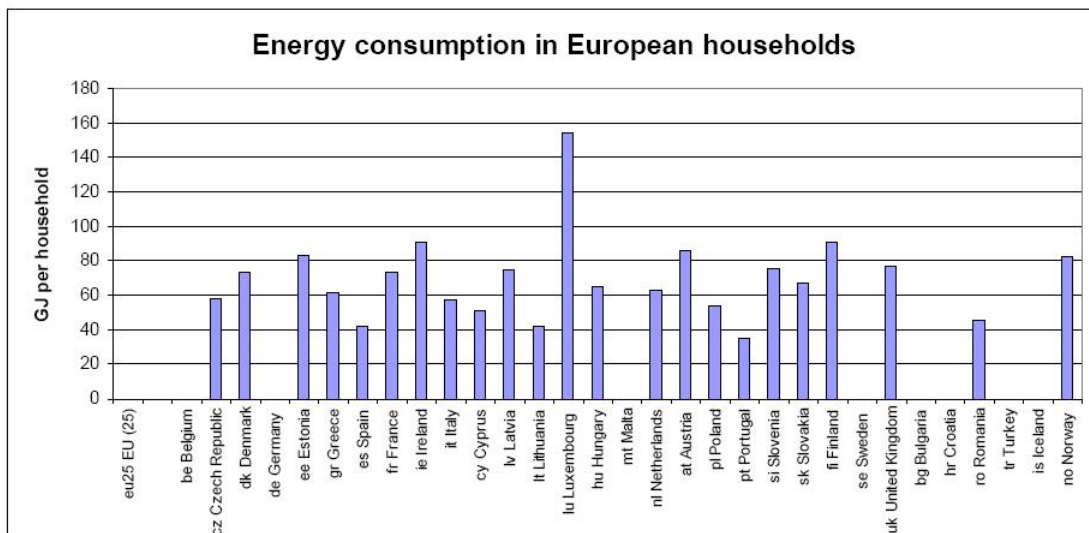
όπου  $R_f$  είναι ο αντίστοιχος συντελεστής αντικατάστασης

Έτσι τελικά προκύπτει ότι το σύνολο της embodied energy που καταναλώθηκε είναι το άθροισμα των άλλων δύο, δηλαδή:

$$E_{embodied} = E_{emb,initial} + E_{emb,recurrent} \quad (4.4)$$

**Φάση Λειτουργίας** Η ενέργεια που καταναλώνεται κατά την φάση λειτουργίας της κατασκευής μας είναι η ενέργεια που απαιτείται για την πραγματοποίηση όλων των καθημερινών λειτουργιών που πραγματοποιούνται στην κατασκευή μας 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 (acidification). Προκειμένου να κατανοήσουμε καλύτερα την συμβολή αυτής της φάσης ας κάνουμε μια μικρή αναφορά στα ελληνικά δεδομένα συγκριτικά με τις υπόλοιπες χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης για ίδιου τύπου κτίρια.

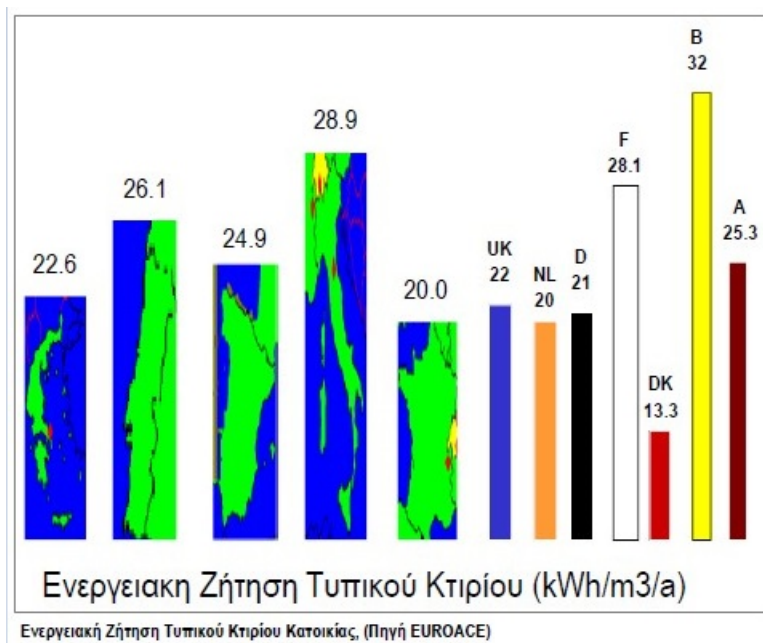
Ξεκινώντας λοιπόν με τα κτίρια κατοικιών, σύμφωνα με την Eurostat στα ελληνικά νοικοκυριά αναλογεί περίπου 61GJ (Giga Joule) ετήσιας κατανάλωσης/νοικοκυριό , ποσοστό σχεδόν διπλάσιο από αυτό της Πορτογαλίας και μεγαλύτερο κατά 30% από της Ισπανίας (Σχήμα 4.20).



Σχήμα 4.20: Μέση ενεργειακή κατανάλωση των νοικοκυριών στην Ευρώπη

Μια καλύτερη σύγκριση, προκειμένου να οδηγηθούμε σε ασφαλέστερα συμπεράσματα, θα ήταν να λάβουμε υπόψιν μας την επιφάνεια κάθε νοικοκυριού, το βαθμό χρήσης του κτιρίου και τους κατοίκους του. Έτσι με βάση μια τέτοια σύγκριση (δηλαδή ενεργειακή

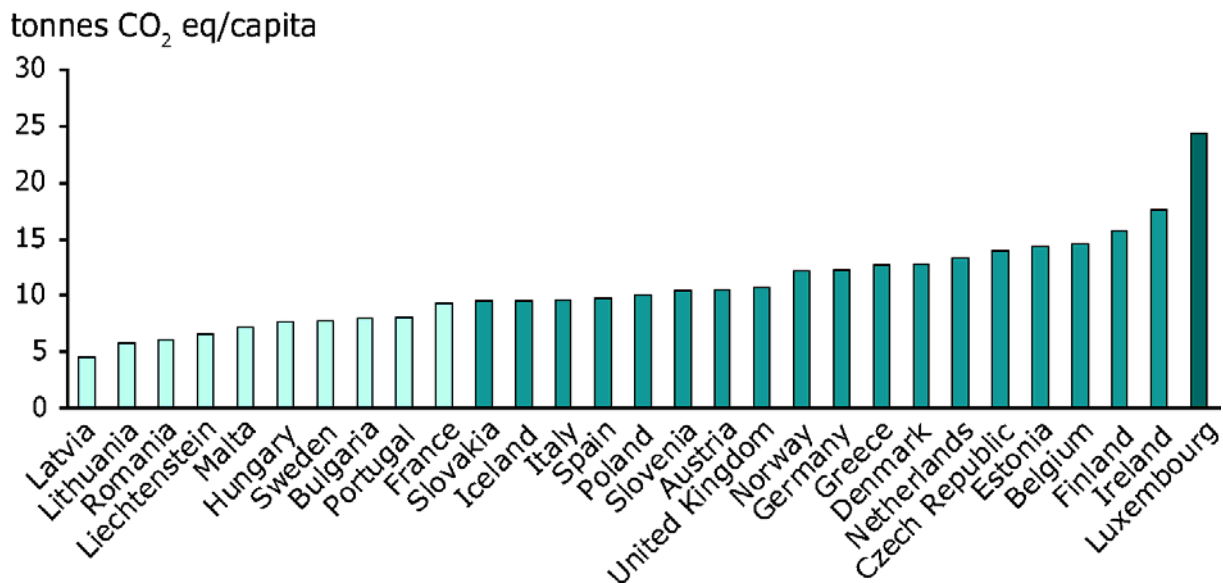
ζήτηση τυπικού κτιρίου σε  $\text{KWh}/\text{m}^3/\text{κάτοικο}$  ) πραγματοποιήθηκε από τον Ευρωπαϊκό οργανισμό EUROACE και διαπιστώθηκε ότι η ενεργειακή κατανάλωση στην Ελλάδα για λόγους θέρμανσης είναι μεγαλύτερη από χώρες με κατ' εξοχήν ψυχρότερο κλίμα όπως η Γερμανία, Δανία και Βρετανία (Σχήμα 4.21).



Σχήμα 4.21: Ενεργειακή ζήτηση τυπικού κτιρίου κατοικίας

Αυτές οι έρευνες, των οποίων τα αποτελέσματα είναι εκφρασμένα σε ενεργειακές μονάδες, μπορούν πολύ εύκολα να μεταφραστούν σε εκπομπές  $\text{CO}_2$  προκειμένου να γίνει μια πιο άμεση αξιολόγηση-σύνδεση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που έχει η φάση λειτουργίας των κτιρίων.

Έτσι λοιπόν σύμφωνα με τον ευρωπαϊκό οργανισμό περιβάλλοντος οι κατοικίες στην Ελλάδα είναι υπεύθυνες για την παραγωγή 12-13 τόνων  $\text{CO}_2$  /κάτοικο/ έτος , τιμή μεγαλύτερη και από χώρες όπως η Νορβηγία, Γερμανία , Αυστρία και η Βρετανία (Σχήμα 4.22).



Σχήμα 4.22: Ετήσιες εκπομπές CO<sub>2</sub> ανά κάτοικο στην Ευρώπη

Καταλήγουμε λοιπόν στο ότι δυστυχώς τα κτίρια κατοικιών στην Ελλάδα είναι τα πιο ενεργοβόρα μέσα στην Ευρώπη και παρουσιάζουν υψηλότερες καταναλώσεις από πολλές βόρειες χώρες πράγμα που σημαίνει ότι υπάρχει μεγάλο περιθώριο αναβάθμισης των ελληνικών κατοικιών με στόχο την εξοικονόμηση ενέργειας στη φάση λειτουργίας.

Αντίστοιχα είναι και τα αποτελέσματα για τα κτίρια γραφείων στην Ελλάδα για τα οποία κάποια ενδεικτικά νούμερα είναι τα εξής :

- 138 KWh/m<sup>2</sup>/έτος . Τόση είναι η κατανάλωση ενός τυπικού κλιματιζόμενου κτιρίου γραφείων.
- 35 KWh/m<sup>2</sup>/έτος. Τόσο είναι το ποσό που αντιστοιχεί στον κλιματισμό.
- 85 KWh/m<sup>2</sup>/έτος. Τόσο είναι το ποσό για θέρμανση.

Για τον υπολογισμό λοιπόν της ενέργειας που καταναλώνεται κατά την φάση λειτουργίας υπάρχουν τρεις προσεγγίσεις που μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε.

1. Η πρώτη προσέγγιση βασίζεται στην πραγματική κατανάλωση ενέργειας που υπολογίζεται από λογαριασμούς ή από ενεργειακές επιθεωρήσεις.

2. Η δεύτερη προσέγγιση βασίζεται σε βάσεις δεδομένων χρήσης ενέργειας. Όμως μέσω αυτών των βάσεων μόνο ένα μέσο επίπεδο κατανάλωσης ενέργειας μπορεί να υπολογιστεί για ένα συγκεκριμένο τύπο του κτιρίου, π.χ. γραφεία ή κατοικίες. Για παράδειγμα, οι βάσεις δεδομένων από την Energy Information Administration (EIA) στις ΗΠΑ χρησιμοποιήθηκαν για να εκτιμηθεί η ποσότητα της ηλεκτρικής ενέργειας και η κατανάλωση φυσικού αερίου για τα τυπικά κτίρια γραφείων στην περιοχή Midwest.
3. Η Τρίτη προσέγγιση βασίζεται σε μοντέλα προσομοίωσης. Για αυτή την μέθοδο απαιτούνται πληροφορίες σχετικά με το χρονοδιάγραμμα λειτουργίας, τις υπαίθριες καιρικές συνθήκες, την συμπεριφορά των κατοίκων, το σχήμα και τον προσανατολισμό του κτιρίου, τα είδη των δομικών υλικών και τα συστήματα επικοινωνίας του κτιρίου. Αυτές οι μέθοδοι προσομοίωσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό της συνολικής ενεργειακής κατανάλωσης του κτιρίου η οποία περιλαμβάνει την θέρμανση, ψύξη και φωτισμό. Η θέρμανση και η ψύξη των χώρων του κτιρίου αποτελούν ένα σημαντικό ποσοστό της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας και γι' αυτό έχουν γίνει επίκεντρο για πολλές μελέτες προσομοίωσης. Για την προσομοίωση της κατανάλωσης ενέργειας για την θέρμανση και ψύξη των χώρων ενός κτιρίου μπορούν να χρησιμοποιηθούν δύο μέθοδοι, η στατική και η δυναμική μέθοδος. Η στατική μέθοδος δεν λαμβάνει υπόψιν της την μεταβλητή του χρόνου σε αντίθεση με την δυναμική. Έτσι η στατική μέθοδος, η οποία είναι και απλούστερη χρησιμοποιείται κυρίως για κτίρια με ένα σταθερό πρόγραμμα λειτουργίας. Αντίθετα η δυναμική, η οποία είναι και πιο πολύπλοκη μπορεί να διαχειριστεί ακόμα και προσωρινές συνθήκες. Λογισμικά προσομοίωσης που υιοθετούν την στατική μέθοδο είναι το DOE-2, ενώ αυτά που ακολουθούν την δυναμική είναι το BLAST, EnergyPlus, ESP-r και το TRNSYS. Ανεξάρτητα από την μέθοδο προσομοίωσης που χρησιμοποιείται, τα αποτελέσματα είναι πολύ ευαίσθητα λόγω των παραδοχών που γίνονται για τους ατομικούς παράγοντες, οι οποίοι είναι μερικές φορές δύσκολο να προβλεφθούν με ακρίβεια, π.χ. συμπεριφορά των κατοίκων, καιρικές συνθήκες κλπ.

Στόχος της παρούσας διπλωματικής, όπως προαναφέρθηκε, ήταν η μελέτη του περιβαλλοντικού αντίκτυπου των κατασκευαστικών υλικών κατά τη φάση κατασκευής επομένως η φάση λειτουργίας δεν λήφθηκε υπόψιν.

**Φάση Κατεδάφισης** Η ενέργεια που καταναλώνεται κατά την κατεδάφιση στο τέλος του κύκλου ζωής της κατασκευής μας είναι άθροισμα της ενέργειας που καταναλώνεται από την ίδια την διαδικασία της κατεδάφισης και της ενέργειας που απαιτείται για την μεταφορά των αποβλήτων. Η ενέργεια κατεδάφισης αντιπροσωπεύει μόνο ένα αμελητέο ποσοστό της συνολικής ενέργειας του κύκλου ζωής. Το ποσοστό αυτό εκτιμάται ότι είναι 0,2% της συνολικής πρωτογενούς ενέργειας που καταναλώνεται στον κύκλο ζωής ενός πανεπιστημίου, ενός κτιρίου γραφείων ή μιας μονοκατοικίας. Το αντίστοιχο ποσοστό για ένα ενεργειακά αποδοτικό σπίτι είναι μόλις 0,3%.

#### 4.4 Εκπομπές $CO_2$ ( $LCCO_2A$ )

Αντίστοιχα με την ανάλυση κύκλου ζωής μίας κατασκευής, ως προς το ενεργειακό της αντίκτυπο, έτσι και η ανάλυση κύκλου ζωής ως προς τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα υπολογίζονται από τη σχέση:

$$CO_2 = CO_{2_{extraction}} + CO_{2_{manufacture}} + CO_{2_{onsite}} + CO_{2_{operation}} + CO_{2_{demolition}} + CO_{2_{recycling}} + CO_{2_{disposal}} \quad (4.5)$$

Οι ενσωματωμένες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, (δηλαδή αυτές που αντιστοιχούν στο embodied phase) περιλαμβάνουν όχι μόνο τις εκπομπές από τον ορυκτό άνθρακα κατά την παραγωγή των υλικών (fossil carbon emissions), αλλά επίσης και τις εκπομπές του διοξειδίου του άνθρακα που παράγονται ως αποτέλεσμα χημικών αντιδράσεων που συμβαίνουν κατά την διαδικασία της βιομηχανικής παραγωγής. Έτσι οι ενσωματωμένες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα μπορούν να εκφραστούν ως εξής:

$$CO_{2_{embodied}} = CO_{2_{fossil}} + CO_{2_{process}} \quad (4.6)$$

Λόγω της έλλειψης δεδομένων για τα ελληνικά εργοστάσια βιομηχανικής παραγωγής, στην παρούσα διπλωματική διπλωματική εργασία οι εκπομπές  $CO_{2_{process}}$  δεν υπολογίστηκαν. Ωστόσο οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό και των δύο κατηγοριών εκπομπών αναλύονται παρακάτω.

#### 4.4.1 Εκπομπές ορυκτού άνθρακα

Η ποσότητα των εκπομπών του ορυκτού άνθρακα δεν επηρεάζεται μόνο από την ποσότητα της πρωτογενούς ενέργειας που απαιτείται για την παραγωγή ενός συγκεκριμένου υλικού, αλλά και από την ποιότητα της πηγής από όπου προέρχεται η πρωτογενής ενέργεια. Η ποσότητα των εκπομπών του ορυκτού άνθρακα που συνδέεται με ένα συγκεκριμένο τύπο υλικών μπορεί να υπολογισθεί με μία εκ των δύο μεθόδων που παρουσιάζονται παρακάτω.

##### Μέθοδος 1

Αυτή η μέθοδος υπολογίζει τις εκπομπές πολλαπλασιάζοντας την ποσότητα της ενέργειας που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή των υλικών επί τις κατάλληλες τιμές των συντελεστών καυσίμων.

$$CO_{2_{fossil}} = e_i \times \beta_i \times m_i \quad (4.7)$$

όπου

$e_i$  είναι ο συντελεστής ενεργειακής έντασης του εκάστοτε υλικού,

$\beta_i$  είναι ο μέσος συντελεστής εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα για την παραγωγή του εκάστοτε υλικού και

$m_i$  είναι η μάζα του αντίστοιχου δομικού υλικού.

##### Μέθοδος 2

Αυτή η μέθοδος υπολογίζει τις εκπομπές απευθείας πολλαπλασιάζοντας τις ποσότητες των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν επί τους αντίστοιχους συντελεστές εκπομπών των υλικών.

$$CO_{2_{fossil}} = \sum_1^i \rho_i \times m_i \quad (4.8)$$



όπου

$\rho_i$  είναι ο συντελεστής εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα που αναλογεί στο κάθε υλικό και

$m_i$  είναι η μάζα του αντίστοιχου δομικού υλικού.

#### 4.4.2 Εκπομπές κατά την διαδικασία της βιομηχανικής παραγωγής

Αυτές οι εκπομπές προκύπτουν από χημικές αντιδράσεις που πραγματοποιούνται κατά την διαδικασία της βιομηχανικής παραγωγής. Το ποσοστό αυτών των εκπομπών, ειδικά για την περίπτωση του σκυροδέματος, ανέρχεται στο 16% των συνολικών «ενσωματωμένων» εκπομπών. Η ποσότητα αυτών των εκπομπών είναι βέβαια μικρή σε σχέση με αυτές των άλλων φάσεων του κύκλου ζωής της κατασκευής μας.

Σε ένα κύκλο ζωής ενός κτιρίου, οι εκπομπές που παράγονται κατά την βιομηχανική διαδικασία οφείλονται κυρίως στην παραγωγή τσιμέντου και χάλυβα. Η παραγωγή τσιμέντου έχει αποδειχθεί ότι είναι η μεγαλύτερη πηγή παραγωγής εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα στον κατασκευαστικό κλάδο, αν εξαιρέσουμε τις διαδικασίες παραγωγής ενέργειας. Κατά την παραγωγή του τσιμέντου εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα παράγονται κατά την χημική αντίδραση της διαπύρωσης (calcination).

**Διαπύρωση (Calcination)** Οι εκπομπές του  $CO_2$  που προκύπτουν από την διαδικασία πύρωσης (ή αλλιώς διαπύρωσης) δημιουργούνται μέσα από μία χημική αντίδραση που μετατρέπει τον ασβεστόλιθο σε τσιμέντο, οξείδιο του ασβεστίου και διοξείδιο του άνθρακα σε πολύ υψηλή θερμοκρασία. Η ποσότητα του άνθρακα που εκπέμπεται κατά τη διάρκεια της πύρωσης του ασβεστόλιθου, κατά την παραγωγή τσιμέντου, μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας το ακόλουθο μοντέλο που αναπτύχθηκε από τους Pommer και Pade.

$$CO_{2_{calcination}}(kg) = \beta \times m_{cement} \times p_{clinker} \quad (4.9)$$

όπου

$\beta$  είναι το διοξείδιο του άνθρακα που εκπέμπεται ανά  $kg$  παραγόμενου κλίνκερ, έχει τιμή 0.51

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

$p_{clinker}$  είναι το ποσοστό κλίνκερ που περιέχει το τσιμέντο

Η αντίδραση όμως αυτή (calcination) παρατηρείται και κατά την παραγωγή του χάλυβα οπλισμού. Αυτό συμβαίνει διότι ο ασβεστόλιθος ( $CaCO_3$ ) και ο δολομίτης ( $CaMg(CO_3)_2$ ) χρησιμοποιούνται συχνά για την απομάκρυνση ακαθαρσιών όπως το θείο και ο φώσφορος. Ο Hong εκτίμησε ότι για κάθε τόνο παραγόμενου χάλυβα παράγονται 0.426 τόνοι διοξειδίου του άνθρακα. Στην παρούσα διπλωματική εργασία, το φαινόμενο της Διαπύρωσης αγνοήθηκε λόγω έλλειψης δεδομένων.

**Ενανθράκωση (Carbonation)** Κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής ενός προϊόντος από τσιμέντο, κάποια ποσότητα διοξειδίου του άνθρακα ξανά απορροφάται από το προϊόν μέσω της αντίδρασης της ενανθράκωσης. Ο βαθμός της ενανθράκωσης 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. Οι συνολικές εκπομπές κατά την διαδικασία της βιομηχανικής παραγωγής είναι τελικά:

$$CO_{2_{process}} = m_{cement} \times \gamma_{cement} - m_{cement} \times \mu_{cement} \quad (4.10)$$

όπου

$CO_{2_{process}}$  είναι οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα ( $kgCO_2$ ) που οφείλονται κατά αποκλειστικότητα στην παραγωγή τσιμέντου.

$m_{cement}$  είναι η μάζα του τσιμέντου που χρησιμοποιήθηκε κατά την κατασκευή του κτιρίου ( $kg$ ),

$\gamma_{cement}$  είναι οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα που οφείλονται στην αντίδραση της διαπύρωσης ( $kgCO_2 / kg_{cement}$ ),

$\mu_{cement}$  είναι η ποσότητα  $CO_2$  που απορροφάται ανά κιλό τσιμέντου κατά την διάρκεια του κύκλου ζωής της κατασκευής μας λόγω της ενανθράκωσης.

Παρ'όλα αυτά το ποσοστό του διοξειδίου του άνθρακα που απορροφάται είναι πάρα πολύ μικρό σε σχέση με τις συνολικές εκπομπές κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής μιας κατασκευής, ακόμα και στην περίπτωση που μετά την κατεδάφιση του κτιρίου μας σπάσουμε και αφήσουμε εκτεθειμένο το σκυρόδεμα μας (προκειμένου να απορροφήσει όσο τον δυνατόν περισσότερο  $CO_2$ ). Για να γίνει αντιληπτό πόσο μικρό είναι αυτό το ποσοστό αρκεί να αναφέρουμε ότι οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα που προκύπτουν από τη λειτουργία των μηχανημάτων για την θραύση του σκυροδέματος μετά την κατεδάφιση της κατασκευής μας είναι περίπου ίση με το ποσοστό του  $CO_2$  που απορροφάται κατά την ενανθράκωση για αυτό επιλέχθηκε να αμεληθεί στην παρούσα εργασία. Οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα που οφείλονται στην παραγωγή σκυροδέματος εκτιμώνται να είναι  $0.033 kgCO_2/kg$  σκυροδέματος.

#### 4.4.3 Εκπομπές κατά την φάση κατεδάφισης-απόθεσης αποβλήτων

Πέρα από τις εκπομπές ορυκτού άνθρακα και τις εκπομπές κατά την διαδικασία της βιομηχανικής παραγωγής μερικές φορές και οι εκπομπές που αφορούν την απόθεση των υλικών συμπεριλαμβάνονται στο  $LCCO_2A$ . Διοξείδιο του άνθρακα εκπέμπεται κατά τη μεταφορά των αποβλήτων (που προκύπτουν από την κατεδάφιση) σε χώρους απόθεσης. Αυτές οι εκπομπές μπορούν να υπολογιστούν από τη σχέση :

$$CO_{2wastedisposal} = \frac{m_{outgoing}}{\varphi} \times d \times \omega \quad (4.11)$$

όπου

$CO_{2wastedisposal}$  είναι η συνολική ποσότητα  $CO_2$  από την απόθεση των αποβλήτων  $kgCO_2/t$

,

$m_{outgoing}$  είναι η μάζα των εξερχόμενων υλικών ( $t$ ) ,

$\varphi$  είναι το ποσοστό φορτίου των φορτηγών ,

$d$  είναι η απόσταση μεταφοράς και

$\omega$  είναι το ποσοστό εκπομπών  $CO_2$  για την μεταφορά φορτίου ( $kgCO_2/t\ km$ ) .

Αφού τα στερεά απόβλητα έχουν αποτεθεί σε χωματερές αποβλήτων ή σε χώρους υγειονομικής ταφής, μετά από ένα ορισμένο χρονικό διάστημα , τα περισσότερα από τα οργανικά υλικά θα έχουν αρχίσει να αποικοδομούνται. Η διαδικασία της βιοαποικοδόμησης θα είναι είτε αερόβια είτε αναερόβια. Τα κύρια προϊόντα αποικοδόμησης είναι το διοξείδιο του άνθρακα ( $CO_2$ ), νερό και θερμότητα για την αερόβια διαδικασία και το μεθάνιο ( $CH_4$ ) και  $CO_2$  για την αναερόβια διαδικασία. Η διαδικασία κατεδάφισης-απόθεσης αποβλήτων δεν μελετήθηκε στην παρούσα εργασία λόγω μη εφαρμογής της στην πλειοψηφία των κτιρίων, γεγονός που έχει ως συνέπεια την πλήρη έλλειψη δεδομένων.

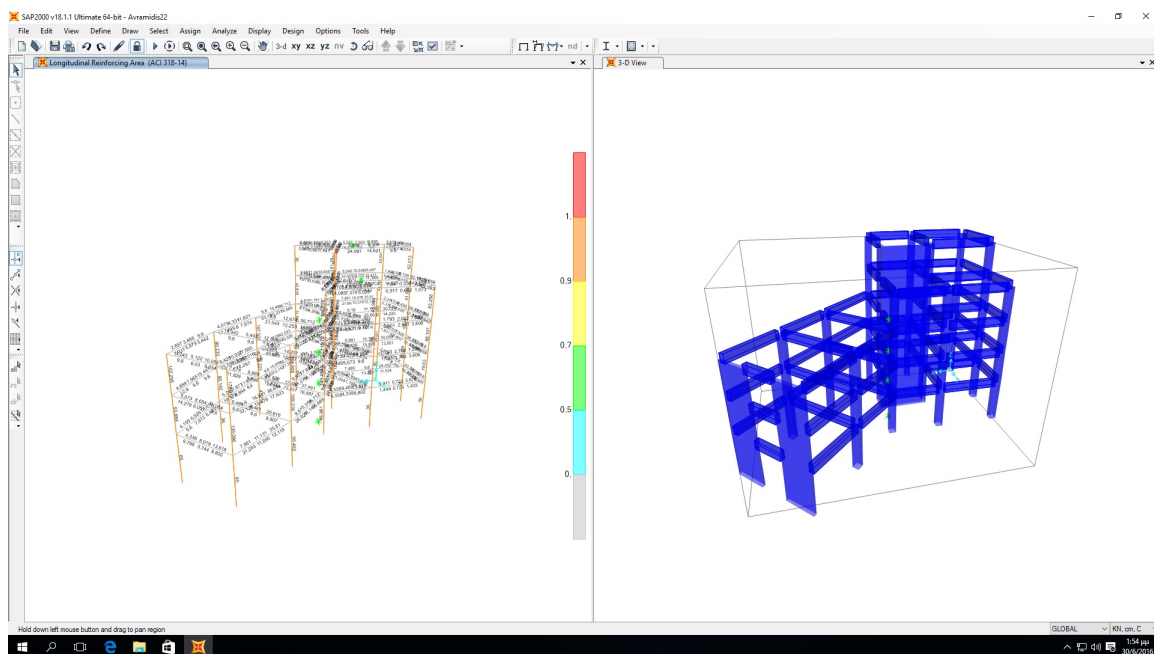
# Κεφάλαιο 5

## Εφαρμογή υπολογισμού *LCEA* , *LCCO<sub>2</sub>A*

### 5.1 Δομικός σχεδιασμός στο SAP

Το πρόγραμμα SAP2000 της εταιρίας Computer and Structures Inc. μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανάλυση κατασκευών διαφορετικού τύπου όπως κτίρια, γέφυρες, φράγματα κλπ. Προσφέρει δυνατότητες στατικής και δυναμικής ανάλυσης, τόσο γραμμικής όσο και μη γραμμικής, συνδυασμούς διαφορετικών πεπερασμένων στοιχείων. Δεδομένου αυτού μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε πλαίσια στοιχεία (frame elements) για την προσομοίωση δικτυωμάτων και δοκών, επιφανειακά (shell) και επίπεδα (plane) στοιχεία, μη γραμμικά στοιχεία σύζευξης (non-linear link) και τρισδιάστατα στοιχεία (solid elements). Πολλά διαφορετικά είδη δράσεων μπορούν επίσης να σχεδιαστούν, όπως φορτία λόγω ίδιου βάρους, κατανεμημένα, επικόμβια, λόγω θερμοκρασιακών μεταβολών κ.α. Τα κτίρια στα παραδείγματα μας προσομοιώθηκαν με τη βοήθεια του στατικού προγράμματος SAP2000.

### 5.1.1 Μοντέλο 1



Σχήμα 5.1: Μοντέλο 1 στο SAP2000

Το κτίριο αποτελείται από 5 ορόφους. Το ύψος του ισογείου είναι 4m ενώ τα ύψη των υπόλοιπων ορόφων είναι ίσα με 3m. Οι περιμετρικές δοκοί φέρουν μπατικές τοιχοποιίες βάρους  $3,6 \text{ KN/m}^2$ . Στις εσωτερικές δοκούς εδράζεται δρομική τοιχοποιία  $2,1 \text{ KN/m}^2$  πλην των δοκών του 4ου και 5ου ορόφου. Περιμετρικά και σε όλες τις στάθμες πλην της τελευταίας, το δώμα φέρει στηθαίο από μπατική τοιχοποιία ύψους 1m. Τα δάπεδα έχουν επίστρωση από μάρμαρο βάρους  $1,3 \text{ KN/m}^2$ . Το ωφέλιμο φορτίο θεωρείται κατανεμημένο και ίσο με  $Q= 2,0 \text{ KN/m}^2$ . Το ίδιο βάρος των πλακών υπολογίστηκε αναλυτικά και έγινε κατανομή στις δοκούς με βάση τις φορτικές επιφάνειες επιρροής. Το ίδιο βάρος των στοιχείων λαμβάνεται αυτόματα από το πρόγραμμα προσομοίωσης αφού έχουμε εισάγει τις ιδιότητες των υλικών και τη γεωμετρία των διατομών.

Δεδομένα φάσματος σχεδιασμού: EAK2000

Ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας: II

Κατηγορία εδάφους : A  $\vartheta=1$  ,  $q= 3.5$

Κατηγορία σπουδαιότητας: Σ2

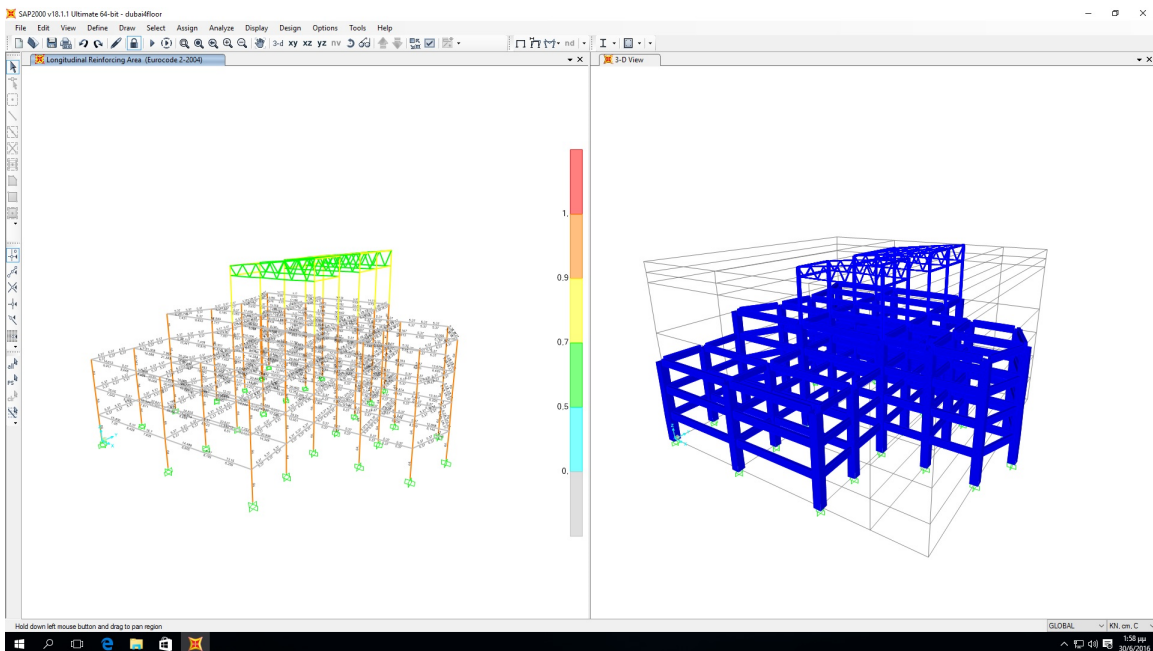
Ποσοστό κρίσιμης απόσβεσης  $\zeta=5\%$

Δεδομένα-Παραδοχές

Μονάδες: σύστημα μονάδων S.I. (Μήκος cm, δύναμη kN, χρόνος sec)

Υλικό: Οπλισμένο σκυρόδεμα C25/30 (Μέτρο ελαστικότητας  $E= 3.1 \times 10^7 \text{KN/m}^2$ , λόγος Poisson  $\nu=0.2$  , ειδικό βάρος  $\gamma=25 \text{KN/m}^3$  ) και χάλυβας B500C.

## 5.1.2 Μοντέλο 2



Σχήμα 5.2: Μοντέλο 2 στο SAP2000

Το κτίριο αποτελείται από 4 ορόφους. Το ύψος του κάθε ορόφου είναι 3m. Οι δοκοί φέρουν μπατικές τοιχοποιίες βάρους  $3.6 \text{KN/m}^2$ . Περιμετρικά και σε όλες τις στάθμες πλην της τελευταίας, το δώμα φέρει στηθαίο από μπατική τοιχοποιία ύψους 1m. Τα δάπεδα έχουν επίστρωση από μάρμαρο βάρους  $1,3 \text{KN/m}^2$ . Το ωφέλιμο φορτίο θεωρείται κατανεμημένο και ίσο με  $Q= 2,0 \text{KN/m}^2$ . Το ίδιο βάρος των πλακών υπολογίστηκε αναλυτικά και έγινε κατανομή στις δοκούς με βάση τις φορτικές επιφάνειες επιρροής. Το ίδιο βάρος των στοιχείων λαμβάνεται αυτόματα από το πρόγραμμα

προσομοίωσης αφού έχουμε εισάγει τις ιδιότητες των υλικών και τη γεωμετρία των διατομών.

Δεδομένα φάσματος σχεδιασμού: ΕΑΚ2000

Ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας: ΙΙ

Κατηγορία εδάφους : Α  $\nu=1$  ,  $q= 3.5$

Κατηγορία σπουδαιότητας: Σ2

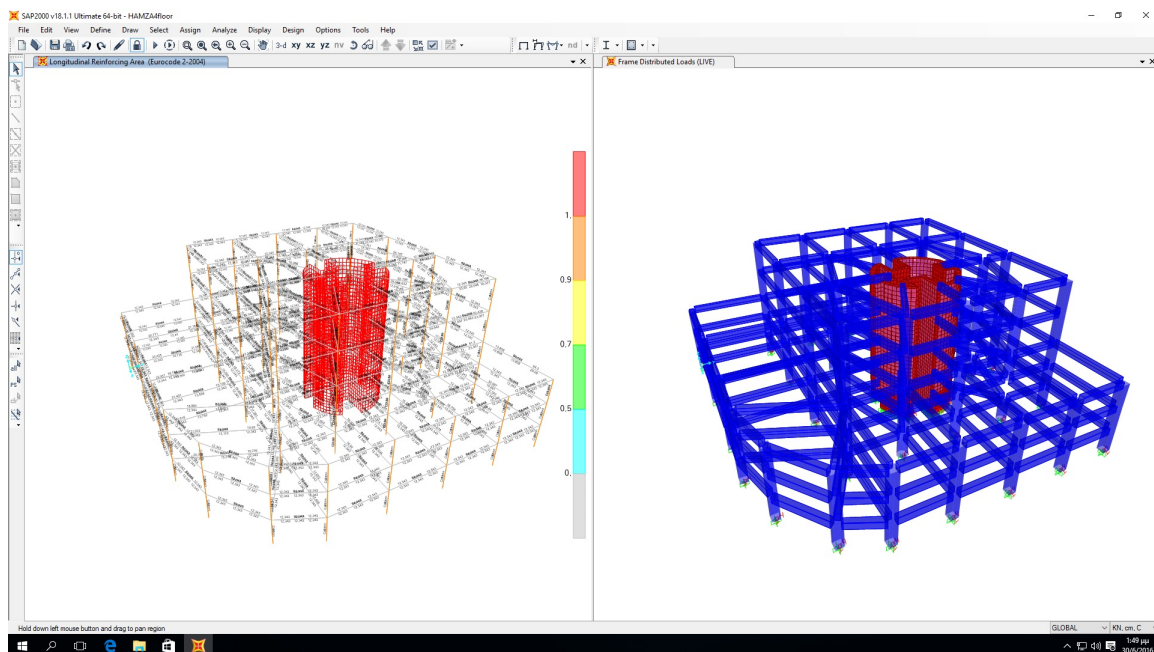
Ποσοστό κρίσιμης απόσβεσης  $\zeta=5\%$

Δεδομένα-Παραδοχές

Μονάδες: σύστημα μονάδων S.I. (Μήκος cm, δύναμη kN, χρόνος sec)

Υλικό: Οπλισμένο σκυρόδεμα C20/25 (Μέτρο ελαστικότητας  $E= 2.9 \times 10^7 \text{ KN/m}^2$ , λόγος Poisson  $\nu=0.2$  , ειδικό βάρος  $\gamma=25 \text{ KN/m}^3$  ) και χάλυβας B500C.

### 5.1.3 Μοντέλο 3



Σχήμα 5.3: Μοντέλο 3 στο SAP2000



Το κτίριο αποτελείται από 5 ορόφους. Το ύψος των τριών πρώτων ορόφων είναι 3m ενώ των δύο τελευταίων είναι 4m. Οι δοκοί φέρουν μπατικές τοιχοποιίες βάρους  $3.6 \text{ KN/m}^2$ . Περιμετρικά και σε όλες τις στάθμες πλην της τελευταίας, το δώμα φέρει στηθαίο από μπατική τοιχοποιία ύψους 1m. Τα δάπεδα έχουν επίστρωση από μάρμαρο βάρους  $1,3 \text{ KN/m}^2$ . Το ωφέλιμο φορτίο θεωρείται κατανεμημένο και ίσο με  $Q= 2,0 \text{ KN/m}^2$ . Το ίδιο βάρος των πλακών υπολογίστηκε αναλυτικά και έγινε κατανομή στις δοκούς με βάση τις φορτικές επιφάνειες επιρροής. Το ίδιο βάρος των στοιχείων λαμβάνεται αυτόματα από το πρόγραμμα προσομοίωσης αφού έχουμε εισάγει τις ιδιότητες των υλικών και τη γεωμετρία των διατομών.

Δεδομένα φάσματος σχεδιασμού: EAK2000

Ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας: II

Κατηγορία εδάφους : A  $\nu=1$  ,  $q= 3.5$

Κατηγορία σπουδαιότητας: Σ2

Ποσοστό κρίσιμης απόσβεσης  $\zeta=5\%$

Δεδομένα-Παραδοχές

Μονάδες: σύστημα μονάδων S.I. (Μήκος cm, δύναμη kN, χρόνος sec)

Υλικό: Οπλισμένο σκυρόδεμα C28/35 (Μέτρο ελαστικότητας  $E= 3.2 \times 10^7 \text{ KN/m}^2$ , λόγος Poisson  $\nu=0.2$  , ειδικό βάρος  $\gamma=25 \text{ KN/m}^3$  ) και χάλυβας B500C.

## 5.2 Δημιουργία βιβλιοθήκης διαθέσιμων υλικών

Δημιουργήθηκε ένας συγκεντρωτικός πίνακας-βιβλιοθήκη (Πίνακας 5.1) κάποιων διαθέσιμων υλικών καθώς και των χαρακτηριστικών τους στοιχείων που απαιτούνται για την πραγματοποίηση της LCA και της βελτιστοποίησης που θα ακολουθήσει στο κεφάλαιο 6. Οι πυκνότητες ( $p$ ) καθώς και οι συντελεστές θερμικής αγωγιμότητας ( $lamda$ ) που αντιστοιχούν στο κάθε υλικό καταγράφηκαν με βάση τον Κανονισμό Ενεργειακής Απόδοσης Κτιρίων (Κ.Εν.Α.Κ) ενώ οι συντελεστές ενεργειακής επιβάρυνσης ( $EE$ ) και εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα ( $ECO_2$ ) λήφθηκαν από τον

κατάλογο ICEv2 (Inventory of Carbon and Energy, version 2.0) του University of Bath. Οι συντελεστές αντικατάστασης (*Replacement Factors*) επιλέχθηκαν ύστερα από μελέτη και σύγκριση υφιστάμενων ερευνών.

	a/a	EE (MJ/kg)	ECO2 (kgCO2/gr)	RF	p (kg/m3)	lamda
RConcrete 20/25 MPa	1	1.884	0.1792	0	2400	2.5
RConcrete 25/30 MPa	2	1.924	0.1852	0	2400	2.5
RConcrete 28/35 MPa	3	1.964	0.1912	0	2400	2.5
RConcrete 32/40 MPa	4	2.024	0.2022	0	2400	2.5
steel	5	20.1	1.37	0	7850	50
Expanded Polystyrene	6	88.6	2.55	1.1	12	0.033
Cork	7	4	0.98	1.1	100	0.042
Flax	8	39.5	1.7	1.1	20	0.038
Polyurethane Flexible Foam	9	102.1	4.06	1.1	30	0.023
Woodwool	10	20	0.98	1.1	360	0.09
Mineral wool	11	16.6	1.2	1.1	50	0.032
Glass wool	12	28	1.54	1.1	20	0.033
Rockwool	13	16.8	1.05	1.1	50	0.033
Ασβεστοτσιμεντοκονίαμα 1800	14	0.97	0.146	1.5	1800	0.87
Ασβεστοτσιμεντοκονίαμα 1900	15	1.11	0.171	1.5	1900	1
Asphalt	16	51	0.4	2	1050	0.17
Asphalt, 4% binder content	17	2.86	0.059	2	2100	0.7
Asphalt sheets	18	1.5	0.05	2	1100	0.23
General-Common Bricks	19	3	0.23	1.1	1500	0.45
Ceramic Tiles	20	12	0.74	3	2000	1.84
Clay Tiles	21	6.5	0.45	3	2000	1
Marble Tiles	22	3.33	0.192	1.5	2800	3.5
Natural Perite	23	0.66	0.03	2	600	0
Windows PVC framed	24	2310	118	1.5	0	0

Πίνακας 5.1: Βιβλιοθήκη διαθέσιμων υλικών

Οι συντελεστές ενεργειακής επιβάρυνσης και εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα που αντιστοιχούν στις διάφορες ποιότητες οπλισμένου σκυροδέματος, περιλαμβάνουν και την επιρροή των ράβδων οπλισμού με την παραδοχή ότι η ποσότητα οπλισμού είναι 110kg ανά κυβικό μέτρο ( $m^3$ ) σκυροδέματος.

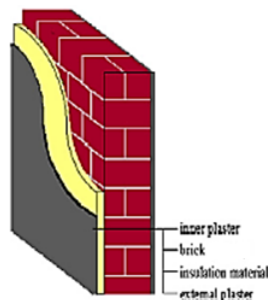
Τα υλικά μόνωσης (με a/a από 6-13), τα οποία θα αποτελέσουν και τις μεταβλητές της περιβαλλοντικής βελτιστοποίησης στο κεφάλαιο 6, επιλέχθηκαν με κριτήριο την ποιικιλία τόσο σε μονωτικές ιδιότητες όσο και στην οικολογική συμπεριφορά τους.

Οι συντελεστές ενεργειακής επιβάρυνσης και εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα για τα παράθυρα είναι ανά μονάδα παραθύρου, διαστάσεων  $1.2m \times 1.2m$ .

### 5.3 Υπολογισμός απαιτούμενων ποσοτήτων υλικών

Για το κάθε μοντέλο, με βάση το στατικό του προσομοίωμα, υπολογίστηκε το είδος και το πλήθος των δομικών στοιχείων τα οποία κατόπιν ομαδοποιήθηκαν με βάση την απαίτηση για μόνωση (εσωτερικά-εξωτερικά) και έπειτα με βάση τις διαστάσεις των διατομών τους και το μήκος τους. Τα στρώματα των υλικών για τα δομικά στοιχεία είναι επίχρισμα-σκυρόδεμα-επίχρισμα για τα εσωτερικά στοιχεία που δεν υπάρχει η απαίτηση θερμομόνωσης και επίχρισμα-μόνωση-σκυρόδεμα-επίχρισμα για τα εξωτερικά.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία για τον υπολογισμό των μη δομικών στοιχείων (τοιχοποιίες) λήφθηκαν υπόψη μόνο οι εξωτερικές και αμελήθηκαν οι εσωτερικές. Η επιλογή αυτή έγινε λόγω του είδους των κτιρίων τα οποία προορίζονται για χρήση γραφείων. Για τις εξωτερικές τοιχοποιίες (Σχήμα 5.4) υπολογίστηκε το εμβαδόν τους αφαιρώντας την κρέμαση των δοκών και τις επιφάνειες των παραθύρων. Οι στρώσεις για τις εξωτερικές τοιχοποιίες είναι επίχρισμα-μόνωση-τούβλα-επίχρισμα. Χρησιμοποιήθηκε ένα είδος τούβλων διάστασης 17cm.



Σχήμα 5.4: Τυπική διάταξη υλικών εξωτερικής τοιχοποιίας

Για τα παράθυρα έγινε η παραδοχή της ύπαρξης ενός παραθύρου διαστάσεων  $1.2m \times 1.2m$  ανά τοιχοποιία.

Τέλος για τα δάπεδα έγινε ο διαχωρισμός σε εσωτερικά δάπεδα με επικάλυψη μαρμάρου και σε βατά δώματα με επικάλυψη κεραμικών πλακιδίων και υπολογίστηκε το εμβαδόν τους χωριστά. Για τα εσωτερικά δάπεδα και τα βατά δώματα, τα στρώματα των υλικών

διαμορφώθηκαν όπως φαίνεται στους αναλυτικούς πίνακες υπολογισμού των ποσοτήτων που ακολουθούν.

Αφού υπολογίστηκαν οι όγκοι όλων των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν με βάση τα παραπάνω βήματα στη συνέχεια πολλαπλασιάστηκαν με την αντίστοιχη πυκνότητα του κάθε υλικού και έτσι προέκυψε ο συγκεντρωτικός πίνακας μαζών όλων των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν σε κάθε κατασκευή.

Στο μοντέλο 1, με βάση το στατικό προσομοίωμα, ομαδοποιήθηκαν αρχικά τα στοιχεία μας σε κατηγορίες ανάλογα με τις διαστάσεις τους. Συγκεκριμένα είχαμε τρεις κατηγορίες εξωτερικής τοιχοποιίας με μήκη 4, 6 και 7m, τρεις κατηγορίες εξωτερικών δοκών μήκους 4, 6 και 7m, τρεις κατηγορίες εσωτερικών δοκών με μήκη 4.5, 5.5 και 7m, δύο κατηγορίες εξωτερικών και εσωτερικών υποστυλωμάτων με ύψη 3 και 4m. Ωστόσο το πλήθος και το είδος των στρωμάτων στοιχείων ίδιας κατηγορίας είναι σε όλα κοινό. Επιλέχθηκε ως μονωτικό υλικό τοιχοποιίας και δομικών στοιχείων η διογκωμένη πολυστερίνη, πάχους 5cm και ως μονωτικό υλικό δαπέδων και δώματος η πολυουρεθάνη σε μορφή αφρού, πάχους 5cm. Επιλέχθηκε ποιότητα σκυροδέματος C25/30 και επιχρίσματα ασβεστοσιμεντοκονιάματος πάχους 2cm, πυκνότητας  $\rho = 1800kg/m^3$ , εκτός από το εξωτερικό επίχρισμα τοιχοποιίας το οποίο, κυρίως για λόγους ποιότητας στη χρήση υλικών, επιλέχθηκε να είναι πυκνότητας  $\rho = 1900kg/m^3$ . Έχει γίνει πρόβλεψη αφαίρεσης της επιφάνειας που καλύπτουν τα παράθυρα,  $54.72m^2$ , από τη συνολική επιφάνεια των τοίχων. Στη στήλη των βαρών φαίνονται οι συνολικές ποσότητες σε kg των υλικών του κάθε στρώματος, κάθε στοιχείου (Πίνακας 5.2,5.3).

ΕΙΔΟΣ				ΠΟΣΟΤΗΤΑ	ΜΗΚΟΣ (m)	ΥΨΟΣ (m)	ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ (m <sup>2</sup> )	ΟΓΚΟΣ (m <sup>3</sup> )	ΒΑΡΟΣ (Kg)
Εξωτερική Τοιχοποιία				12	4	2.25	108		
				22	6	2.25	297		
				4	7	2.25	63		
α/α	Στρώσεις Δομικού Στοιχείου	Πυκνότητα ρ (Kg/m <sup>3</sup> )	Πάχος Στρώσης (m)						
1	Ασβεστοτσιμεντοκονίαμα 1900	1900	0.02					8.2656	15705
2	Οπτοπλινθοδομή	1500	0.17					70.2576	105386
3	Διογκωμένη Πολυστερίνη	12	0.05					20.664	247.97
4	Ασβεστοτσιμεντοκονίαμα 1800	1800	0.02					8.2656	14878
Εξωτερική Δοκός				15	4	0.75	45		
				29	6	0.75	130.5		
				6	7	0.75	31.5		
α/α	Στρώσεις Δομικού Στοιχείου	Πυκνότητα ρ (Kg/m <sup>3</sup> )	Πάχος Στρώσης (m)						
1	Ασβεστοτσιμεντοκονίαμα 1800	1800	0.02					4.14	7452
2	Οπλισμένο σκυρόδεμα C25/30	2400	0.4					82.8	198720
3	Διογκωμένη Πολυστερίνη	12	0.05					10.35	124.2
4	Ασβεστοτσιμεντοκονίαμα 1800	1800	0.02					4.14	7452
Εσωτερική Δοκός				8	4.5	0.75	27		
				14	5.5	0.75	57.75		
				6	7	0.75	31.5		
α/α	Στρώσεις Δομικού Στοιχείου	Πυκνότητα ρ (Kg/m <sup>3</sup> )	Πάχος Στρώσης (m)						
1	Ασβεστοτσιμεντοκονίαμα 1800	1800	0.02					2.325	4185
2	Οπλισμένο σκυρόδεμα C25/30	2400	0.4					46.5	111600
3	Ασβεστοτσιμεντοκονίαμα 1800	1800	0.02					2.325	4185
ΕΙΔΟΣ				ΠΟΣΟΤΗΤΑ	ΜΗΚΟΣ (m)	ΥΨΟΣ (m)	ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ (m <sup>2</sup> )	ΟΓΚΟΣ (m <sup>3</sup> )	ΒΑΡΟΣ (Kg)
Εξωτερικό Υποστύλωμα				40	0.6	3	72		
				12	0.6	4	28.8		
α/α	Στρώσεις Δομικού Στοιχείου	Πυκνότητα ρ (Kg/m <sup>3</sup> )	Πάχος Στρώσης (m)						
1	Ασβεστοτσιμεντοκονίαμα 1800	1800	0.02					2.016	3628.8
2	Οπλισμένο σκυρόδεμα C25/30	2400	0.6					60.48	145152
3	Διογκωμένη Πολυστερίνη	12	0.05					5.04	60.48
4	Ασβεστοτσιμεντοκονίαμα 1800	1800	0.02					2.016	3628.8
Εσωτερικό Υποστύλωμα				11	0.6	3	19.8		
				4	0.6	4	9.6		
α/α	Στρώσεις Δομικού Στοιχείου	Πυκνότητα ρ (Kg/m <sup>3</sup> )	Πάχος Στρώσης (m)						
1	Ασβεστοτσιμεντοκονίαμα 1800	1800	0.02					0.588	1058.4
2	Οπλισμένο σκυρόδεμα C25/30	2400	0.6					17.64	42336
3	Ασβεστοτσιμεντοκονίαμα 1800	1800	0.02					0.588	1058.4

Πίνακας 5.2: Υπολογισμός απαιτούμενων υλικών(kg) δομικών στοιχείων και τοιχοποιίας Μοντέλου 1

ΕΙΔΟΣ				ΠΟΣΙΟΤΗΤΑ			ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ (m <sup>2</sup> )	ΟΓΚΟΣ (m <sup>3</sup> )	ΒΑΡΟΣ (Kg)
Εσωτερικό Δάπεδο				2			203		
				1			100		
				1			60		
α/α	Στρώσεις Δομικού Στοιχείου	Πυκνότητα ρ (Kg/m <sup>3</sup> )	Πάχος Στρώσης (m)						
1	Μαρμάρινες πλάκες	2800	0.02					11.32	31696
2	Ασβεστοτσιμεντοκονίαμα 1800	1800	0.02					11.32	20376
3	Περλιτόδεμα	600	0.05					28.3	16980
4	Πολυουρεθάνη σε αφρό	30	0.05					28.3	849
5	Οπλισμένο σκυρόδεμα C25/30	2400	0.2					113.2	271680
Βατό Δώμα				1			103		
				1			40		
				1			60		
α/α	Στρώσεις Δομικού Στοιχείου	Πυκνότητα ρ (Kg/m <sup>3</sup> )	Πάχος Στρώσης (m)						
1	Ασβεστοτσιμεντοκονίαμα 1800	1800	0.02					4.06	7308
2	Οπλισμένο σκυρόδεμα C25/30	2400	0.2					40.6	97440
3	Καθαρή άσφαλτος	1050	0.002					0.406	426.3
4	Πολυουρεθάνη σε αφρό	30	0.05					10.15	304.5
5	Κισρόδεμα, ελαφροσκυρόδεμα	500	0.08					16.24	8120
6	Ασφαλτικά φύλλα (ασφαλτόπανα)	1100	0.0045					0.9135	1004.9
7	Κεραμικά πλακίδια δαπέδου	2000	0.025					5.075	10150
Windows PVC framed				38	1.2	1.2	54.72		

Πίνακας 5.3: Υπολογισμός απαιτούμενων υλικών(kg) δαπέδων Μοντέλου 1

Στο μοντέλο 2, με βάση το στατικό προσομοίωμα, ομαδοποιήθηκαν αρχικά τα στοιχεία μας σε κατηγορίες ανάλογα με τις διαστάσεις τους. Συγκεκριμένα είχαμε τρεις κατηγορίες εξωτερικής τοιχοποιίας με μήκη 5, 5.5 και 10m, τρεις κατηγορίες εξωτερικών δοκών μήκους 5, 5.5 και 10m, τέσσερις κατηγορίες εσωτερικών δοκών με μήκη 5, 7, 7.7 και 10m, μία κατηγορία εξωτερικών και εσωτερικών υποστυλωμάτων με ύψος 3m. Ωστόσο το πλήθος και το είδος των στρωμάτων στοιχείων ίδιας κατηγορίας είναι σε όλα κοινό. Επιλέχθηκε ως μονωτικό υλικό τοιχοποιίας, δομικών στοιχείων, δαπέδων και δώματος η πολυουρεθάνη σε μορφή αφρού, πάχους 5cm. Επιλέχθηκε ποιότητα σκυροδέματος C20/25 και επιχρίσματα ασβεστοτσιμεντοκονιάματος πάχους 2cm, πυκνότητας  $\rho = 1800\text{kg/m}^3$ , εκτός από το εξωτερικό επίχρισμα τοιχοποιίας το οποίο, κυρίως για λόγους ποιικιλίας στη χρήση υλικών, επιλέχθηκε να είναι πυκνότητας  $\rho = 1900\text{kg/m}^3$ . Έχει γίνει πρόβλεψη αφαίρεσης της επιφάνειας που καλύπτουν τα παράθυρα,  $80.64\text{m}^2$ , από τη συνολική επιφάνεια των τοίχων. Στη στήλη των βαρών φαίνονται οι συνολικές ποσότητες σε kg των υλικών του κάθε στρώματος, κάθε στοιχείου (Πίνακας 5.4, 5.5).

ΕΙΔΟΣ				ΠΟΣΟΤΗΤΑ	ΜΗΚΟΣ (m)	ΥΨΟΣ (m)	ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ (m <sup>2</sup> )	ΟΓΚΟΣ (m <sup>3</sup> )	ΒΑΡΟΣ (Kg)
Τοιχοποιία				12	10	2.3	276		
				32	5	2.3	368		
				12	5.5	2.3	151.8		
α/α	Στρώσεις Δομικού Στοιχείου	Πυκνότητα ρ (Kg/m <sup>3</sup> )	Πάχος Στρώσης (m)						
1	Ασβεστοσιμεντοκονίαμα 1900	1900	0.02					14.3032	27176.1
2	Οπτοπλινθοδομή	1500	0.17					121.577	182366
3	Πολυουρεθάνη σε αφρό	30	0.05					35.758	1072.74
4	Ασβεστοσιμεντοκονίαμα 1800	1800	0.02					14.3032	25745.8
Εξωτερική Δοκός				16	10	0.7	112		
				44	5	0.7	154		
				16	5.5	0.7	61.6		
α/α	Στρώσεις Δομικού Στοιχείου	Πυκνότητα ρ (Kg/m <sup>3</sup> )	Πάχος Στρώσης (m)						
1	Ασβεστοσιμεντοκονίαμα 1800	1800	0.02					6.552	11793.6
2	Οπλισμένο σκυρόδεμα C20/25	2400	0.3					98.28	235872
3	Πολυουρεθάνη σε αφρό	30	0.05					16.38	491.4
4	Ασβεστοσιμεντοκονίαμα 1800	1800	0.02					6.552	11793.6
Εσωτερική Δοκός				24	10	0.7	168		
				42	5	0.7	147		
				8	7	0.7	39.2		
				8	7.7	0.7	43.12		
α/α	Στρώσεις Δομικού Στοιχείου	Πυκνότητα ρ (Kg/m <sup>3</sup> )	Πάχος Στρώσης (m)						
1	Ασβεστοσιμεντοκονίαμα 1800	1800	0.02					7.9464	14303.5
2	Οπλισμένο σκυρόδεμα C20/25	2400	0.3					119.196	286070
3	Ασβεστοσιμεντοκονίαμα 1800	1800	0.02					7.9464	14303.5
ΕΙΔΟΣ				ΠΟΣΟΤΗΤΑ	ΜΗΚΟΣ (m)	ΥΨΟΣ (m)	ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ (m <sup>2</sup> )	ΟΓΚΟΣ (m <sup>3</sup> )	ΒΑΡΟΣ (Kg)
Εξωτερικό Υποστύλωμα				56	0.8	3	134.4		
α/α	Στρώσεις Δομικού Στοιχείου	Πυκνότητα ρ (Kg/m <sup>3</sup> )	Πάχος Στρώσης (m)						
1	Ασβεστοσιμεντοκονίαμα 1800	1800	0.02					2.688	4838.4
2	Οπλισμένο σκυρόδεμα C20/25	2400	0.8					107.52	258048
3	Πολυουρεθάνη σε αφρό	30	0.05					6.72	201.6
4	Ασβεστοσιμεντοκονίαμα 1800	1800	0.02					2.688	4838.4
Εσωτερικό Υποστύλωμα				19	0.8	3	45.6		
				27	0.8	3	64.8		
α/α	Στρώσεις Δομικού Στοιχείου	Πυκνότητα ρ (Kg/m <sup>3</sup> )	Πάχος Στρώσης (m)						
1	Ασβεστοσιμεντοκονίαμα 1800	1800	0.02					2.208	3974.4
2	Οπλισμένο σκυρόδεμα C20/25	2400	0.8					88.32	211968
3	Ασβεστοσιμεντοκονίαμα 1800	1800	0.02					2.208	3974.4

Πίνακας 5.4: Υπολογισμός απαιτούμενων υλικών(kg) δομικών στοιχείων και τοιχοποιίας Μοντέλου 2

ΕΙΔΟΣ				ΠΟΣΟΤΗΤΑ			ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ (m <sup>2</sup> )	ΟΓΚΟΣ (m <sup>3</sup> )	ΒΑΡΟΣ (Kg)
Εσωτερικό Δάπεδο				2			672		
				1			472		
α/α	Στρώσεις Δομικού Στοιχείου	Πυκνότητα $\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> )	Πάχος Στρώσης (m)						
1	Μαρμάρινες πλάκες	2800	0.02					36.32	101696
2	Ασβεστοτσιμεντοκονίαμα 1800	1800	0.02					36.32	65376
3	Περλιτόδεμα	600	0.05					90.8	54480
4	Πολυουρεθάνη σε αφρό	30	0.05					90.8	2724
5	Οπλισμένο σκυρόδεμα C20/25	2400	0.2					363.2	871680
Βατό Δώμα				1			472		
				1			200		
α/α	Στρώσεις Δομικού Στοιχείου	Πυκνότητα $\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> )	Πάχος Στρώσης (m)						
1	Ασβεστοτσιμεντοκονίαμα 1800	1800	0.02					13.44	24192
2	Οπλισμένο σκυρόδεμα C20/25	2400	0.2					134.4	322560
3	Καθαρή άσφαλτος	1050	0.002					1.344	1411.2
4	Πολυουρεθάνη σε αφρό	30	0.05					33.6	1008
5	Κισηρόδεμα, ελαφροσκυρόδεμα	500	0.08					53.76	26880
6	Ασφαλτικά φύλλα (ασφαλτόπανα)	1100	0.0045					3.024	3326.4
7	Κεραμικά πλακίδια δαπέδου	2000	0.025					16.8	33600
Windows PVC framed				56	1.2	1.2	80.64		

Πίνακας 5.5: Υπολογισμός απαιτούμενων υλικών(kg) δαπέδων Μοντέλου 2

Στο μοντέλο 3, με βάση το στατικό προσομοίωμα, ομαδοποιήθηκαν αρχικά τα στοιχεία μας σε κατηγορίες ανάλογα με τις διαστάσεις τους. Συγκεκριμένα είχαμε πέντε κατηγορίες εξωτερικής τοιχοποιίας με μήκη 4, 7 και 10m στις οποίες όμως διαφέρει το ύψος των δύο τελευταίων ορόφων, τρεις κατηγορίες εξωτερικών δοκών μήκους 4, 7 και 10m, επτά κατηγορίες εσωτερικών δοκών με διαφορετικά μήκη αλλά και πάχος στρώσης σκυροδέματος (όπως φαίνονται αναλυτικά στο σχήμα που ακολουθεί), δύο κατηγορίες εξωτερικών και εσωτερικών υποστυλωμάτων με ύψη 3 και 4m. Ωστόσο το πλήθος και το είδος των στρωμάτων στοιχείων ίδιας κατηγορίας είναι σε όλα κοινό. Επιλέχθηκε ως μονωτικό υλικό τοιχοποιίας και δομικών στοιχείων ο πετροβάμβακας, πάχους 8cm και ως μονωτικό υλικό δαπέδων και δώματος η πολυουρεθάνη σε μορφή αφρού πάχους 5cm. Επιλέχθηκε ποιότητα σκυροδέματος C28/35 και επιχρίσματα ασβεστοτσιμεντοκονιάματος πάχους 2cm, πυκνότητας  $\rho = 1800kg/m^3$ , εκτός από το εξωτερικό επίχρισμα τοιχοποιίας το οποίο, κυρίως για λόγους ποιικιλίας στη χρήση υλικών, επιλέχθηκε να είναι πυκνότητας  $\rho = 1900kg/m^3$ . Έχει γίνει πρόβλεψη αφαίρεσης της επιφάνειας που καλύπτουν τα παράθυρα, 92.16m<sup>2</sup>, από τη συνολική επιφάνεια των τοίχων. Στη στήλη των βαρών φαίνονται οι συνολικές ποσότητες σε kg των υλικών του κάθε στρώματος, κάθε στοιχείου (Πίνακας 5.6,5.7).



ΕΙΔΟΣ				ΠΟΣΟΤΗΤΑ	ΜΗΚΟΣ (m)	ΥΨΟΣ (m)	ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ (m <sup>2</sup> )	ΟΓΚΟΣ (m <sup>3</sup> )	ΒΑΡΟΣ (Kg)
Εξωτερική Τοιχοποιία				2	4	2.2	17.6		
				16	7	3.2	358.4		
				22	7	2.2	338.8		
				12	10	3.2	384		
				12	10	2.2	264		
α/α	Στρώσεις Δομικού Στοιχείου	Πυκνότητα ρ (Kg/m <sup>3</sup> )	Πάχος Στρώσης (m)						
1	Ασβεστοτσιμεντοκονίαμα 1900	1900	0.02					25.4128	48284.3
2	Οπτοπλινθοδομή	1500	0.17					216.0088	324013
3	Πετροβάμβακας	50	0.08					101.6512	5082.56
4	Ασβεστοτσιμεντοκονίαμα 1800	1800	0.02					25.4128	45743
Εξωτερική Δοκός				3	4	0.8	9.6		
				49	7	0.8	274.4		
				30	10	0.8	240		
α/α	Στρώσεις Δομικού Στοιχείου	Πυκνότητα ρ (Kg/m <sup>3</sup> )	Πάχος Στρώσης (m)						
1	Ασβεστοτσιμεντοκονίαμα 1800	1800	0.02					10.48	18864
2	Οπλισμένο σκυρόδεμα C28/35	2400	0.6					314.4	754560
3	Πετροβάμβακας	50	0.08					41.92	2096
4	Ασβεστοτσιμεντοκονίαμα 1800	1800	0.02					10.48	18864
Εσωτερική Δοκός				10	3.6	0.8	28.8		
				10	5	0.8	40		
				16	6.6	0.8	84.48		
				10	6.65	0.8	53.2		
				16	7	0.8	89.6		
				20	7.2	0.8	115.2		
68	10	0.8	544						
α/α	Στρώσεις Δομικού Στοιχείου	Πυκνότητα ρ (Kg/m <sup>3</sup> )	Πάχος Στρώσης (m)						
1	Ασβεστοτσιμεντοκονίαμα 1800	1800	0.02					19.1056	34390.1
2a	Οπλισμένο σκυρόδεμα C28/35	2400	0.5					104.2	1325587
2b		2400	0.6					448.128	
3	Ασβεστοτσιμεντοκονίαμα 1800	1800	0.02					19.1056	34390.1
ΕΙΔΟΣ				ΠΟΣΟΤΗΤΑ	ΜΗΚΟΣ (m)	ΥΨΟΣ (m)	ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ (m <sup>2</sup> )	ΟΓΚΟΣ (m <sup>3</sup> )	ΒΑΡΟΣ (Kg)
Εξωτερικό Υποστύλωμα				57	0.9	3	153.9		
				28	0.9	4	100.8		
α/α	Στρώσεις Δομικού Στοιχείου	Πυκνότητα ρ (Kg/m <sup>3</sup> )	Πάχος Στρώσης (m)						
1	Ασβεστοτσιμεντοκονίαμα 1800	1800	0.02					5.094	9169.2
2	Οπλισμένο σκυρόδεμα C28/35	2400	0.9					229.23	550152
3	Πετροβάμβακας	50	0.08					20.376	1018.8
4	Ασβεστοτσιμεντοκονίαμα 1800	1800	0.02					5.094	9169.2
Εσωτερικό Υποστύλωμα				10	0.9	4	36		
				36	0.9	3	97.2		
α/α	Στρώσεις Δομικού Στοιχείου	Πυκνότητα ρ (Kg/m <sup>3</sup> )	Πάχος Στρώσης (m)						
1	Ασβεστοτσιμεντοκονίαμα 1800	1800	0.02					2.664	4795.2
2	Οπλισμένο σκυρόδεμα C28/35	2400	0.9					119.88	287712
3	Ασβεστοτσιμεντοκονίαμα 1800	1800	0.02					2.664	4795.2

Πίνακας 5.6: Υπολογισμός απαιτούμενων υλικών(kg) δομικών στοιχείων και τοιχοποιίας Μοντέλου 3

ΕΙΔΟΣ				ΠΟΣΟΤΗΤΑ			ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ (m <sup>2</sup> )	ΟΓΚΟΣ (m <sup>3</sup> )	ΒΑΡΟΣ (Kg)
Εσωτερικό Δάπεδο				2			1426		
				2			814		
α/α	Στρώσεις Δομικού Στοιχείου	Πυκνότητα ρ (Kg/m <sup>3</sup> )	Πάχος Στρώσης (m)						
1	Μαρμάρινες πλάκες	2800	0.02					89.6	250880
2	Ασβεστοτσιμεντοκονίαμα 1800	1800	0.02					89.6	161280
3	Περλιτόδεμα	600	0.05					224	134400
4	Πολυουρεθάνη σε αφρό	30	0.05					224	6720
5	Οπλισμένο σκυρόδεμα C28/35	2400	0.2					896	2150400
Βατό Δώμα				1			814		
				1			612		
α/α	Στρώσεις Δομικού Στοιχείου	Πυκνότητα ρ (Kg/m <sup>3</sup> )	Πάχος Στρώσης (m)						
1	Ασβεστοτσιμεντοκονίαμα 1800	1800	0.02					28.52	51336
2	Οπλισμένο σκυρόδεμα C28/35	2400	0.2					285.2	684480
3	Καθαρή άσφαλτος	1050	0.002					2.852	2994.6
4	Πολυουρεθάνη σε αφρό	30	0.05					71.3	2139
5	Κισηρόδεμα, ελαφροσκυρόδεμα	500	0.08					114.08	57040
6	Ασφαλτικά φύλλα (ασφαλτόπανα)	1100	0.0045					6.417	7058.7
7	Κεραμικά πλακίδια δαπέδου	2000	0.025					35.65	71300
Windows PVC framed				64	1.2	1.2	92.16		

Πίνακας 5.7: Υπολογισμός απαιτούμενων υλικών(kg) δαπέδων Μοντέλου 3

## 5.4 Υπολογισμός ενσωματωμένης ενέργειας και εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα κατασκευαστικών υλικών

Η LCA των κτιρίων περιέχει πολλές απλοποιήσεις και παραδοχές που σχετίζονται με τις ενεργειακές απαιτήσεις των κτιρίων στη φάση κατασκευής, λειτουργίας, κατεδάφισης, την εκτιμώμενη διάρκεια ζωής των κτιρίων και την ενσωματωμένη ενέργεια των υλικών που πιθανών να αλλάξει στο μέλλον. Υπάρχει ακόμα σημαντική αβεβαιότητα που συνδέεται με την κατανάλωση ενέργειας και τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα κατά την φάση κατεδάφισης. Η τοποθεσία του κτιρίου, τα υλικά κατασκευής, τα συστήματα-μέσα που χρησιμοποιήθηκαν, οι διαδικασίες παραγωγής υλικών, και άλλοι παράγοντες των οποίων η παραμικρή αλλαγή θα έχει τη δυνατότητα να μεταβληθούν τα αποτελέσματα αυτής της μελέτης. Για το λόγο αυτό τονίζεται ότι θα ακολουθήσουν αρκετές παραδοχές κατά τη διεξαγωγή της παρούσας LCEA και LCCO<sub>2</sub>A.

Αφού υπολογίστηκαν οι απαιτούμενες ποσότητες υλικών, ακολούθησε ο υπολογισμός ενσωματωμένης ενέργειας και εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα με βάση το θεωρητικό υπόβαθρο που περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 4.

Αρχικά υπολογίστηκε η Initial Embodied Energy με βάση τη σχέση (4.2) και οι Initial  $CO_2$  Emissions (εκπομπές ορυκτού άνθρακα) με βάση τη μέθοδο 2, σχέση (4.8). Πιο αναλυτικά, πολλαπλασιάστηκαν οι ποσότητες του κάθε υλικού με τους αντίστοιχους συντελεστές ενεργειακής επιβάρυνσης και εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα. Σε αυτό το σημείο έγιναν οι εξής παραδοχές όσον αφορά τις εκπομπές  $CO_2$  :

1. Οι εκπομπές  $CO_2$  που παράγονται κατά την διαδικασία της διαπύρωσης αγνοήθηκαν λόγω της έλλειψης δεδομένων και του σκοπού της διπλωματικής που είναι η γενικότερη εφαρμογή της για διάφορες ποιότητες σκυροδέματος.
2. Οι εκπομπές που προκύπτουν κατά την ενανθράκωση αγνοήθηκαν διότι μαζί με τις παραγόμενες εκπομπές κατά τη φάση της κατεδάφισης, έχουν ως αποτέλεσμα το συνολικό ποσό των εκπομπών  $CO_2$  να είναι μηδενικό.

Σε δεύτερη φάση έγινε ο υπολογισμός του Recurring Embodied Energy με βάση τις σχέσεις (4.3) και (4.2), και με χρήση του ίδιου τύπου υπολογίστηκαν οι εκπομπές Recurring  $CO_2$  emissions. Πιο αναλυτικά, πολλαπλασιάζοντας τα μεγέθη που προέκυψαν από το προηγούμενο βήμα (Initial Embodied Energy και Initial  $CO_2$  Emissions) με τους αντίστοιχους συντελεστές αντικατάστασης καταλήξαμε στην απαιτούμενη ενέργεια και στις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα που προκύπτουν σε βάθος χρόνου, κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής της εκάστοτε κατασκευής. Η απόθεση των αποβλήτων κατά το τέλος του κύκλου ζωής των κατασκευών μας αγνοήθηκε λόγω έλλειψης δεδομένων.

Έπειτα ακολούθησε ο υπολογισμός των τελικών-ζητούμενων ενεργειακών καταναλώσεων (Total Embodied Energy) και εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (Total  $CO_2$  Emissions) του κάθε υλικού, ο οποίος έγινε σύμφωνα με τη σχέση (4.4), προσθέτοντας δηλαδή τα δύο παραπάνω μεγέθη (Initial και Recurring), αντίστοιχα για την απαιτούμενη ενέργεια και τις εκπομπές.

Αθροίζοντας τις ενεργειακές επιβαρύνσεις του κάθε υλικού που χρησιμοποιήθηκε στην κατασκευή του Μοντέλου 1, παίρνουμε την συνολική επιβάρυνση του κτιρίου μας στο περιβάλλον σε όρους ενέργειας. Πιο αναλυτικά τα αποτελέσματα, το οπλισμένο

σκυρόδεμα ποιότητας C25/30 που επιλέχθηκε για χρήση έδωσε την μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας της τάξης των 1,667,969MJoule, οι μονώσεις πολυστερίνης και πολυουρεθάνης καταναλώνουν ενέργεια 80,498MJoule και 247,321MJoule αντίστοιχα, τα επιχρίσματα ασβεστοτσιμεντοκονιάματος αντιστοιχούν συνολικά σε 225,965MJoule ενώ τα προϊόντα ασφάλτου σε 69,745MJoule. Τα τούβλα που χρησιμοποιήθηκαν στις τοιχοποιίες είναι υπεύθυνα για τη δεύτερη μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας, της τάξης των 663,934MJoule και οι επικαλύψεις των δαπέδων από μάρμαρο και των δωμάτων από κεραμικά πλακάκια αντιστοιχούν σε κατανάλωση ενέργειας 263,869MJoule και 487,200MJoule με τη σειρά που αναφέρθηκαν. Τα παράθυρα από PVC πλήθους 38, αντιστοιχούν σε 219,450MJoule. Η συνολική κατανάλωση ενέργειας των κατασκευαστικών υλικών ανέρχεται στα 3,959,575MJoule (Πίνακας 5.8). Το συνολικό εμβαδόν του κτιρίου 1 είναι 769m<sup>2</sup> επομένως υπολογίζεται κατανάλωση ενέργειας ανά τετραγωνικό ίση με  $5.15 \times 10^3 MJ/m^2$ .

	AMOUNT (kg)	EE (MJ/kg)	RF	INITIAL EE(MJ)	RECURRENT EE(MJ)	TOTAL EE(MJ)
RConcrete 20/25 MPa		1.884	0	0	0	0
RConcrete 25/30 MPa	866928	1.924	0	1667969.47	0	1667969.472
RConcrete 28/35 MPa		1.964	0	0	0	0
RConcrete 32/40 MPa		2.024	0	0	0	0
steel		20.1	0	0	0	0
Expanded Polystyrene	432.648	88.6	1.1	38332.6128	42165.8741	80498.48688
Cork		4	1.1	0	0	0
Flax		39.5	1.1	0	0	0
Polyurethane Flexible Foam	1153.5	102.1	1.1	117772.35	129549.585	247321.935
Woodwool		20	1.1	0	0	0
Mineral wool		16.6	1.1	0	0	0
Glass wool		28	1.1	0	0	0
Rockwool		16.8	1.1	0	0	0
Ασβεστοσιμ. 1800	75210.48	0.97	1.5	72954.1656	109431.248	182385.414
Ασβεστοσιμ. 1900	15704.64	1.11	1.5	17432.1504	26148.2256	43580.376
Asphalt	426.3	51	2	21741.3	43482.6	65223.9
Asphalt, 4% binder content		2.86	2	0	0	0
Asphalt sheets	1004.85	1.5	2	1507.275	3014.55	4521.825
General-Common Bricks	105386.4	3	1.1	316159.2	347775.12	663934.32
Ceramic Tiles	10150	12	3	121800	365400	487200
Clay Tiles		6.5	3	0	0	0
Marble Tiles	31696	3.33	1.5	105547.68	158321.52	263869.2
Natural Perite	16980	0.66	2	11206.8	22413.6	33620.4
Windows PVC framed	38	2310	1.5	87780	131670	219450
						3959575.329

Πίνακας 5.8: Υπολογισμός Embodied Energy Μοντέλου 1

Αντίστοιχα αθροίζοντας τις εκπομπές  $CO_2$  του κάθε υλικού που χρησιμοποιήθηκε στην κατασκευή του Μοντέλου 1, παίρνουμε την συνολική επιβάρυνση του κτιρίου μας στο περιβάλλον, σε όρους εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα. Πιο αναλυτικά τα αποτελέσματα, το οπλισμένο σκυρόδεμα ποιότητας C25/30 που επιλέχθηκε για χρήση έδωσε τις μεγαλύτερες εκπομπές της τάξης των  $160,555kgCO_2$ , οι μονώσεις πολυστερίνης και πολυουρεθάνης εκπέμπουν  $2,316kgCO_2$  και  $9,834kgCO_2$  αντίστοιχα, τα επιχρίσματα ασβεστοτσιμεντοκονιάματος αντιστοιχούν συνολικά σε εκπομπές  $34,165kgCO_2$  ενώ τα προϊόντα ασφάλτου σε  $661kgCO_2$ . Τα τούβλα που χρησιμοποιήθηκαν στις τοιχοποιίες είναι υπεύθυνα για το δεύτερο μεγαλύτερο ποσό εκπομπών, της τάξης των  $50,901kgCO_2$  και οι επικαλύψεις των δαπέδων από μάρμαρο και των δωματίων από κεραμικά πλακάκια αντιστοιχούν σε εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα ίσες με  $15,214kgCO_2$  και  $30,044kgCO_2$  με τη σειρά που αναφέρθηκαν. Τα παράθυρα από PVC πλήθους 38, αντιστοιχούν σε  $11,210kgCO_2$ . Η συνολικές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα προερχόμενες από τα κατασκευαστικά υλικά ανέρχονται στα  $316,432kgCO_2$  (Πίνακας 5.9). Το συνολικό εμβαδόν του κτιρίου 1 είναι  $769m^2$  επομένως υπολογίζονται οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα ανά τετραγωνικό ίσες με  $4.11 \times 10^2 kgCO_2/m^2$ .

	AMOUNT (kg)	ECO2 (kgCO2/kg)	RF	INITIAL CO2 EMIS. (kg)	RECURRENT CO2 EMIS.(kg)	TOTAL CO2 EMIS.(kg)
RConcrete 20/25 MPa		0.1792	0	0	0	0
RConcrete 25/30 MPa	866928	0.1852	0	160555.0656	0	160555.0656
RConcrete 28/35 MPa		0.1912	0	0	0	0
RConcrete 32/40 MPa		0.2022	0	0	0	0
steel		1.37	0	0	0	0
Expanded Polystyrene	432.648	2.55	1.1	1103.2524	1213.57764	2316.83004
Cork		0.98	1.1	0	0	0
Flax		1.7	1.1	0	0	0
Polyurethane Flexible Foam	1153.5	4.06	1.1	4683.21	5151.531	9834.741
Woodwool		0.98	1.1	0	0	0
Mineral wool		1.2	1.1	0	0	0
Glass wool		1.54	1.1	0	0	0
Rockwool		1.05	1.1	0	0	0
Ασβεστοτσιμ. 1800	75210.48	0.146	1.5	10980.73008	16471.09512	27451.8252
Ασβεστοτσιμ. 1900	15704.64	0.171	1.5	2685.49344	4028.24016	6713.7336
Asphalt	426.3	0.4	2	170.52	341.04	511.56
Asphalt, 4% binder content		0.059	2	0	0	0
Asphalt sheets	1004.85	0.05	2	50.2425	100.485	150.7275
General-Common Bricks	105386.4	0.23	1.1	24238.872	26662.7592	50901.6312
Ceramic Tiles	10150	0.74	3	7511	22533	30044
Clay Tiles		0.45	3	0	0	0
Marble Tiles	31696	0.192	1.5	6085.632	9128.448	15214.08
Natural Perite	16980	0.03	2	509.4	1018.8	1528.2
Windows PVC framed	38	118	1.5	4484	6726	11210
						316432.3941

Πίνακας 5.9: Υπολογισμός CO<sub>2</sub> Emissions Μοντέλου 1

Αθροίζοντας τις ενεργειακές επιβαρύνσεις του κάθε υλικού που χρησιμοποιήθηκε στην κατασκευή του Μοντέλου 2, παίρνουμε την συνολική επιβάρυνση του κτιρίου μας στο περιβάλλον σε όρους ενέργειας. Πιο αναλυτικά τα αποτελέσματα, το οπλισμένο σκυρόδεμα ποιότητας C20/25 που επιλέχθηκε για χρήση, έδωσε την μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας της τάξης των 4,118,797MJoule, οι μονώσεις πολυουρεθάνης καταναλώνουν ενέργεια 1,178,770MJoule, τα επιχρίσματα ασβεστοτσιμεντοκονιάματος αντιστοιχούν συνολικά σε 524,362MJoule ενώ τα προϊόντα ασφάλτου σε 230,882MJoule. Τα τούβλα που χρησιμοποιήθηκαν στις τοιχοποιίες είναι υπεύθυνα για την τρίτη μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας, ακολουθώντας αυτή τη φορά τα μονωτικά υλικά, της τάξης των 1,114,904MJoule και οι επικαλύψεις των δαπέδων από μάρμαρο και των δωματίων από κεραμικά πλακάκια αντιστοιχούν σε κατανάλωση ενέργειας 846,619MJoule και 1,612,800MJoule με τη σειρά που αναφέρθηκαν. Τα παράθυρα

από PVC πλήθους 56, αντιστοιχούν σε 323,400MJoule. Η συνολική κατανάλωση ενέργειας των κατασκευαστικών υλικών ανέρχεται στα 10,092,407MJoule (Πίνακας 5.10). Το συνολικό εμβαδόν του κτιρίου 2 είναι 2,488m<sup>2</sup> επομένως υπολογίζεται κατανάλωση ενέργειας ανά τετραγωνικό ίση με 4.06 × 10<sup>3</sup>MJ/m<sup>2</sup>.

	AMOUNT (kg)	EE (MJ/kg)	RF	INITIAL EE(MJ)	RECURRENT EE(MJ)	TOTAL EE(MJ)
RConcrete 20/25 MPa	2186198.4	1.884	0	4118797.79	0	4118797.786
RConcrete 25/30 MPa		1.924	0	0	0	0
RConcrete 28/35 MPa		1.964	0	0	0	0
RConcrete 32/40 MPa		2.024	0	0	0	0
steel		20.1	0	0	0	0
Expanded Polystyrene		88.6	1.1	0	0	0
Cork		4	1.1	0	0	0
Flax		39.5	1.1	0	0	0
Polyurethane Flexible Foam	5497.74	102.1	1.1	561319.254	617451.179	1178770.433
Woodwool		20	1.1	0	0	0
Mineral wool		16.6	1.1	0	0	0
Glass wool		28	1.1	0	0	0
Rockwool		16.8	1.1	0	0	0
Ασβεστοτσιμ. 1800	185133.6	0.97	1.5	179579.592	269369.388	448948.98
Ασβεστοτσιμ. 1900	27176.08	1.11	1.5	30165.4488	45248.1732	75413.622
Asphalt	1411.2	51	2	71971.2	143942.4	215913.6
Asphalt, 4% binder content		2.86	2	0	0	0
Asphalt sheets	3326.4	1.5	2	4989.6	9979.2	14968.8
General-Common Bricks	182365.8	3	1.1	547097.4	601807.14	1148904.54
Ceramic Tiles	33600	12	3	403200	1209600	1612800
Clay Tiles		6.5	3	0	0	0
Marble Tiles	101696	3.33	1.5	338647.68	507971.52	846619.2
Natural Perite	54480	0.66	2	35956.8	71913.6	107870.4
Windows PVC framed	56	2310	1.5	129360	194040	323400
						10092407.36

Πίνακας 5.10: Υπολογισμός Embodied Energy Μοντέλου 2

Αντίστοιχα αθροίζοντας τις εκπομπές CO<sub>2</sub> του κάθε υλικού που χρησιμοποιήθηκε στην κατασκευή του Μοντέλου 2, παίρνουμε την συνολική επιβάρυνση του κτιρίου μας στο περιβάλλον, σε όρους εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα. Πιο αναλυτικά τα αποτελέσματα, το οπλισμένο σκυρόδεμα ποιότητας C20/25 που επιλέχθηκε για χρήση έδωσε τις μεγαλύτερες εκπομπές της τάξης των 391,766kgCO<sub>2</sub>, οι μονώσεις πολυουρεθάνης εκπέμπουν 46,873kgCO<sub>2</sub>, τα επιχρίσματα ασβεστοτσιμεντοκονιάματος αντιστοιχούν συνολικά σε εκπομπές 79,190kgCO<sub>2</sub> ενώ τα προϊόντα ασφάλτου σε 2,191kgCO<sub>2</sub>. Τα τούβλα που χρησιμοποιήθηκαν στις τοιχοποιίες είναι υπεύθυνα για το

δεύτερο μεγαλύτερο ποσό εκπομπών, της τάξης των  $88,082kgCO_2$  και οι επικαλύψεις των δαπέδων από μάρμαρο και των δωματίων από κεραμικά πλακάκια αντιστοιχούν σε εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα ίσες με  $48,814kgCO_2$  και  $99,456kgCO_2$  με τη σειρά που αναφέρθηκαν. Τα παράθυρα από PVC πλήθους 56, αντιστοιχούν σε  $16,520kgCO_2$ . Η συνολικές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα προερχόμενες από τα κατασκευαστικά υλικά ανέρχονται στα  $777,800kgCO_2$  (Πίνακας 5.11). Το συνολικό εμβαδόν του κτιρίου 2 είναι  $2,488m$  επομένως υπολογίζονται οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα ανά τετραγωνικό ίσες με  $3.13 \times 10^2kgCO_2/m^2$ .

	AMOUNT (kg)	ECO2 (kgCO2/kg)	RF	INITIAL CO2 EMIS. (kg)	RECURRENT CO2 EMIS.(kg)	TOTAL CO2 EMIS.(kg)
RConcrete 20/25 MPa	2186198	0.1792	0	391766.7533	0	391766.7533
RConcrete 25/30 MPa		0.1852	0	0	0	0
RConcrete 28/35 MPa		0.1912	0	0	0	0
RConcrete 32/40 MPa		0.2022	0	0	0	0
steel		1.37	0	0	0	0
Expanded Polystyrene		2.55	1.1	0	0	0
Cork		0.98	1.1	0	0	0
Flax		1.7	1.1	0	0	0
Polyurethane Flexible Foam	5497.74	4.06	1.1	22320.8244	24552.90684	46873.73124
Woodwool		0.98	1.1	0	0	0
Mineral wool		1.2	1.1	0	0	0
Glass wool		1.54	1.1	0	0	0
Rockwool		1.05	1.1	0	0	0
Ασβεστοτσιμ. 1800	185133.6	0.146	1.5	27029.5056	40544.2584	67573.764
Ασβεστοτσιμ. 1900	27176.08	0.171	1.5	4647.10968	6970.66452	11617.7742
Asphalt	1411.2	0.4	2	564.48	1128.96	1693.44
Asphalt, 4% binder content		0.059	2	0	0	0
Asphalt sheets	3326.4	0.05	2	166.32	332.64	498.96
General-Common Bricks	182365.8	0.23	1.1	41944.134	46138.5474	88082.6814
Ceramic Tiles	33600	0.74	3	24864	74592	99456
Clay Tiles		0.45	3	0	0	0
Marble Tiles	101696	0.192	1.5	19525.632	29288.448	48814.08
Natural Perite	54480	0.03	2	1634.4	3268.8	4903.2
Windows PVC framed	56	118	1.5	6608	9912	16520
						777800.3841

Πίνακας 5.11: Υπολογισμός  $CO_2$  Emissions Μοντέλου 2

Αθροίζοντας τις ενεργειακές επιβαρύνσεις του κάθε υλικού που χρησιμοποιήθηκε στην κατασκευή του Μοντέλου 3, παίρνουμε την συνολική επιβάρυνση του κτιρίου μας στο περιβάλλον σε όρους ενέργειας. Πιο αναλυτικά τα αποτελέσματα, το οπλισμένο σκυρόδεμα ποιότητας C28/35 που επιλέχθηκε για χρήση, έδωσε την μεγαλύτερη



κατανάλωση ενέργειας της τάξης των 11,298,678 MJoule, οι μονώσεις πολυουρεθάνης (δάπεδα και δώματα) και πετροβάμβακα (τοιχοποιίες και δομικά στοιχεία) καταναλώνουν ενέργεια 1,899,458 MJoule και 289,202 MJoule αντίστοιχα, τα επιχρίσματα ασβεστοτσιμεντοκονιάματος αντιστοιχούν συνολικά σε 1,086,519 MJoule ενώ τα προϊόντα ασφάλτου σε 489,937 MJoule. Τα τούβλα που χρησιμοποιήθηκαν στις τοιχοποιίες είναι υπεύθυνα για κατανάλωση ενέργειας της τάξης των 2,041,283 MJoule και οι επικαλύψεις των δαπέδων από μάρμαρο και των δωματίων από κεραμικά πλακάκια αντιστοιχούν σε κατανάλωση ενέργειας 2,088,576 MJoule και 3,422,400 MJoule με τη σειρά που αναφέρθηκαν. Τα παράθυρα από PVC πλήθους 64, αντιστοιχούν σε 369,600 MJoule. Η συνολική κατανάλωση ενέργειας των κατασκευαστικών υλικών ανέρχεται στα 23,251,767 MJoule (Πίνακας 5.12). Το συνολικό εμβαδόν του κτιρίου 3 είναι 5,906 m<sup>2</sup> επομένως υπολογίζεται κατανάλωση ενέργειας ανά τετραγωνικό ίση με  $3.92 \times 10^3 MJ/m^2$ .

	AMOUNT (kg)	EE (MJ/kg)	RF	INITIAL EE(MJ)	RECURRENT EE(MJ)	TOTAL EE(MJ)
RConcrete 20/25 MPa		1.884	0	0	0	0
RConcrete 25/30 MPa		1.924	0	0	0	0
RConcrete 28/35 MPa	5752891.2	1.964	0	11298678.3	0	11298678.32
RConcrete 32/40 MPa		2.024	0	0	0	0
steel		20.1	0	0	0	0
Expanded Polystyrene		88.6	1.1	0	0	0
Cork		4	1.1	0	0	0
Flax		39.5	1.1	0	0	0
Polyurethane Flexible Foam	8859	102.1	1.1	904503.9	994954.29	1899458.19
Woodwool		20	1.1	0	0	0
Mineral wool		16.6	1.1	0	0	0
Glass wool		28	1.1	0	0	0
Rockwool	8197.36	16.8	1.1	137715.648	151487.213	289202.8608
Ασβεστοτσιμ. 1800	392796	0.97	1.5	381012.12	571518.18	952530.3
Ασβεστοτσιμ. 1900	48284.32	1.11	1.5	53595.5952	80393.3928	133988.988
Asphalt	2994.6	51	2	152724.6	305449.2	458173.8
Asphalt, 4% binder content		2.86	2	0	0	0
Asphalt sheets	7058.7	1.5	2	10588.05	21176.1	31764.15
General-Common Bricks	324013.2	3	1.1	972039.6	1069243.56	2041283.16
Ceramic Tiles	71300	12	3	855600	2566800	3422400
Clay Tiles		6.5	3	0	0	0
Marble Tiles	250880	3.33	1.5	835430.4	1253145.6	2088576
Natural Perite	134400	0.66	2	88704	177408	266112
Windows PVC framed	64	2310	1.5	147840	221760	369600
						23251767.77

Πίνακας 5.12: Υπολογισμός Embodied Energy Μοντέλου 3

Αντίστοιχα αθροίζοντας τις εκπομπές  $CO_2$  του κάθε υλικού που χρησιμοποιήθηκε στην κατασκευή του Μοντέλου 3, παίρνουμε την συνολική επιβάρυνση του κτιρίου μας στο περιβάλλον, σε όρους εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα. Πιο αναλυτικά τα αποτελέσματα, το οπλισμένο σκυρόδεμα ποιότητας C28/35 που επιλέχθηκε για χρήση έδωσε τις μεγαλύτερες εκπομπές της τάξης των  $1,099,952kgCO_2$ , οι μονώσεις πολυουρεθάνης και πετροβάμβακα εκπέμπουν  $75,531kgCO_2$  και  $18,075kgCO_2$  αντίστοιχα, τα επιχρίσματα ασβεστοσιμεντοκονιάματος αντιστοιχούν συνολικά σε εκπομπές  $164,012kgCO_2$  ενώ τα προϊόντα ασφάλτου σε  $4,651kgCO_2$ . Τα τούβλα που χρησιμοποιήθηκαν στις τοιχοποιίες αντιστοιχούν σε ποσό εκπομπών της τάξης των  $156,498kgCO_2$  και οι επικαλύψεις των δαπέδων από μάρμαρο και των δωματίων από κεραμικά πλακάκια αντιστοιχούν σε εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα ίσες με  $120,422kgCO_2$  και  $211,048kgCO_2$  με τη σειρά που αναφέρθηκαν. Τα παράθυρα από PVC πλήθους 64, αντιστοιχούν σε  $18,880kgCO_2$ . Η συνολικές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα προερχόμενες από τα κατασκευαστικά υλικά ανέρχονται στα  $1,881,168kgCO_2$  (Πίνακας 5.13). Το συνολικό εμβαδόν του κτιρίου 3 είναι  $5,906m^2$  επομένως υπολογίζονται οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα ανά τετραγωνικό ίσες με  $3.19 \times 10^2 kgCO_2/m^2$ .

	AMOUNT (kg)	ECO2 (kgCO2/kg)	RF	INITIAL CO2 EMIS. (kg)	RECURRENT CO2 EMIS.(kg)	TOTAL CO2 EMIS.(kg)
RConcrete 20/25 MPa		0.1792	0	0	0	0
RConcrete 25/30 MPa		0.1852	0	0	0	0
RConcrete 28/35 MPa	5752891	0.1912	0	1099952.797	0	1099952.797
RConcrete 32/40 MPa		0.2022	0	0	0	0
steel		1.37	0	0	0	0
Expanded Polystyrene		2.55	1.1	0	0	0
Cork		0.98	1.1	0	0	0
Flax		1.7	1.1	0	0	0
Polyurethane Flexible Foam	8859	4.06	1.1	35967.54	39564.294	75531.834
Woodwool		0.98	1.1	0	0	0
Mineral wool		1.2	1.1	0	0	0
Glass wool		1.54	1.1	0	0	0
Rockwool	8197.36	1.05	1.1	8607.228	9467.9508	18075.1788
Ασβεστοτσιμ. 1800	392796	0.146	1.5	57348.216	86022.324	143370.54
Ασβεστοτσιμ. 1900	48284.32	0.171	1.5	8256.61872	12384.92808	20641.5468
Asphalt	2994.6	0.4	2	1197.84	2395.68	3593.52
Asphalt, 4% binder content		0.059	2	0	0	0
Asphalt sheets	7058.7	0.05	2	352.935	705.87	1058.805
General-Common Bricks	324013.2	0.23	1.1	74523.036	81975.3396	156498.3756
Ceramic Tiles	71300	0.74	3	52762	158286	211048
Clay Tiles		0.45	3	0	0	0
Marble Tiles	250880	0.192	1.5	48168.96	72253.44	120422.4
Natural Perite	134400	0.03	2	4032	8064	12096
Windows PVC framed	64	118	1.5	7552	11328	18880
						1881168.998

Πίνακας 5.13: Υπολογισμός CO<sub>2</sub> Emissions Μοντέλου 3



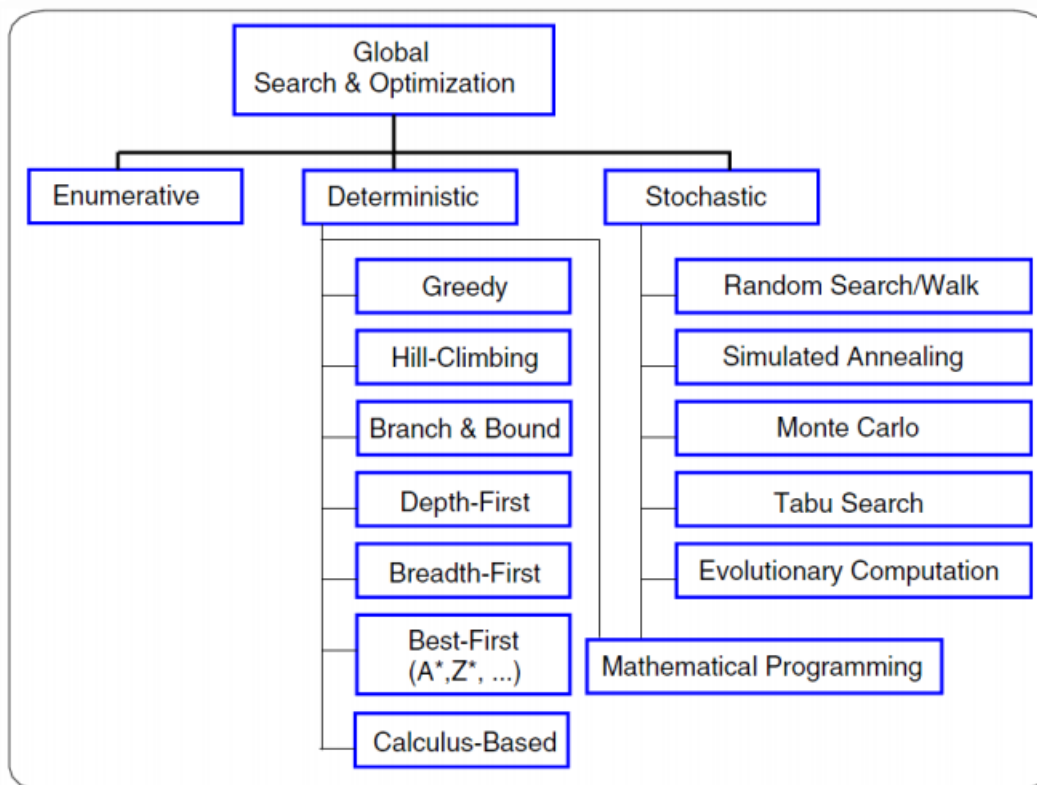
# Κεφάλαιο 6

## Βέλτιστος σχεδιασμός

### 6.1 Επισκόπηση διαθέσιμων αλγορίθμων βελτιστοποίησης

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 βέλτιστες 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:

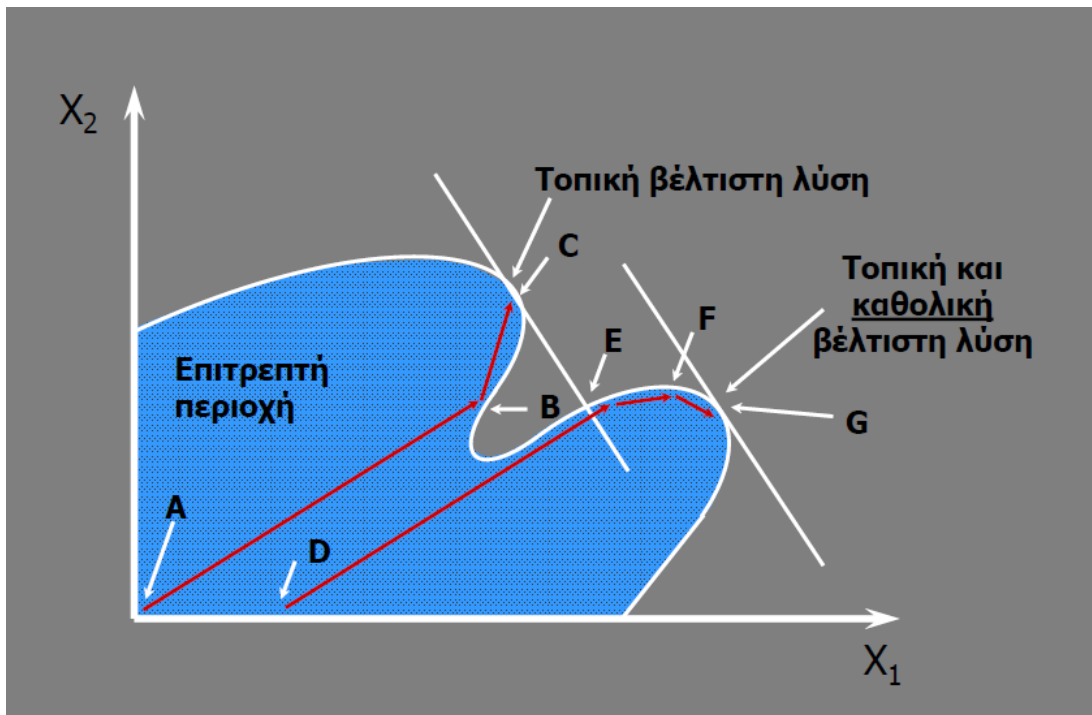
- απαριθμητικοί αλγόριθμοι (enumerative)
- ντετερμινιστικοί αλγόριθμοι (deterministic)
- στοχαστικοί αλγόριθμοι (stochastic)



Σχήμα 6.1: Κατηγορίες αλγορίθμων αναζήτησης και βελτιστοποίησης

**Οι απαριθμητικοί 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 αλγορίθμους 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 (Σχήμα 6.2).



Σχήμα 6.2: 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 πιθανοτικές 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 επίλυσης, 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

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.

## 6.2 Διατύπωση του προβλήματος

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

$F(x)$  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 και

$h(x)$  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 διαμόρφωση του προβλήματος είναι το σημαντικότερο βήμα για να κριθεί επιτυχημένη η διαδικασία βελτιστοποίησης. Ουσιαστικά ως μεταβλητή ορίζεται κάθε μέγεθος που υπεισέρχεται στο πρόβλημα αναφοράς.

Προκειμένου να γίνει η βελτιστοποίηση 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 μεγιστοποίηση 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.

### 6.3 Εφαρμογές βελτιστοποίησης

Πολλοί παράγοντες σχεδιασμού επηρεάζουν τόσο το κόστος όσο και την περιεχόμενη ενέργεια σε κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα και καθορίζονται κυρίως στη φάση της

στατικής μελέτης. Για παράδειγμα για να προσδιοριστεί ένα δομικό στοιχείο κάποιος από τους παράγοντες που πρέπει να προσδιοριστούν είναι: οι διαστάσεις του, η κατηγορία του σκυροδέματος που θα χρησιμοποιηθεί, το είδος και η ποσότητα του χάλυβα που θα οπλίσει τη διατομή. Είναι πολύ δύσκολο να προσδιοριστεί η αξία του κάθε παράγοντα σχεδιασμού και το πώς επηρεάζει το κόστος ή τον περιβαλλοντικό αντίκτυπο, σε σχέση με την αντοχή που προσφέρει στο δομικό στοιχείο, ώστε να ικανοποιεί τους περιορισμούς των κανονισμών κάτω από δεδομένες συνθήκες φόρτισης.

Ο σχεδιασμός των δομικών στοιχείων καθορίζει την αντοχή τους με τέτοιο τρόπο ώστε να μπορούν να ανταπεξέλθουν στις απαιτήσεις σχεδιασμού πάντα υπέρ της ασφαλείας. Οι μεταβλητές σχεδιασμού που επηρεάζουν την αντοχή των μελών είναι: η αντοχή σε θλίψη του σκυροδέματος, η γεωμετρία της διατομής, ο αριθμός των ράβδων που οπλίζει τη διατομή, η διάμετρός τους και η τιμή διαρροής του χρησιμοποιούμενου χάλυβα. Υπάρχουν πολλές εναλλακτικές λύσεις για τη σχεδίαση των διατομών που μπορούν να δημιουργηθούν με βάση συνδυασμούς των τιμών των μεταβλητών σχεδιασμού.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκαν για τα τρία μοντέλα μας, τρία διαφορετικά σενάρια βελτιστοποιήσεων. Το πρώτο εξ' αυτών είχε ως στόχο την βελτιστοποίηση των μοντέλων μας ως προς το κόστος των υλικών (material cost) και συγκεκριμένα την ελαχιστοποίηση του. Αυτή η βελτιστοποίηση έγινε με την χρήση του προγράμματος OCP. Ο OCP (optimization computing platform) αποτελεί μια υπολογιστική πλατφόρμα η οποία αναπτύχθηκε από τον Ν. Λαγαρό και την εταιρία ACE Hellas, ικανή να επιλύει δομικά προβλήματα βελτιστοποίησης και να εντοπίζει τον καθολικά βέλτιστο σχεδιασμό. Χρησιμοποιώντας υπολογιστικές μεθόδους επόμενης γενιάς (μεταευριστικούς 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. 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 παρακάτω.

Όσον αφορά τις άλλες δύο βελτιστοποιήσεις είχαν ως στόχο να ελαχιστοποιήσουν τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις όσον αφορά την απαιτούμενη κατανάλωση ενέργειας καθώς και τις παραγόμενες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, σε κάθε μια από τις κατασκευές που παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 5. Για την υλοποίηση αυτών των βελτιστοποιήσεων

αναπτύχθηκε πρόγραμμα στην Matlab το οποίο δομήθηκε με βάση τη διαδικασία Ανάλυσης Κύκλου Ζωής που αναπτύχθηκε θεωρητικά στο κεφάλαιο 4 και εφαρμόστηκε στο κεφάλαιο 5. Πιο αναλυτικά η αντικειμενική συνάρτηση της οποίας την τιμή προσπαθήσαμε να ελαχιστοποιήσουμε ήταν αφενός το άθροισμα της εμπεριεχόμενης ενέργειας όλων των υλικών της κατασκευής μας αφετέρου το σύνολο των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα που οφείλονται στα υλικά. Οι μεταβλητές (design variables) ως προς τις οποίες έγιναν αυτές οι δύο βελτιστοποιήσεις είναι:

1. Πάχος μόνωσης δομικών στοιχείων από σκυρόδεμα.
2. Πάχος μόνωσης τοιχοποιίας.
3. Υλικό μόνωσης δομικών στοιχείων από σκυρόδεμα.
4. Υλικό μόνωσης τοιχοποιίας .

**Πάχος μόνωσης** Το πάχος μόνωσης των δομικών στοιχείων κυμαίνεται από 40 mm το ελάχιστο πάχος μόνωσης έως 110 mm που είναι η μέγιστη μόνωση που συναντάμε στην ελληνική αγορά. Το ίδιο ισχύει και για τα στοιχεία από σκυρόδεμα αλλά και για την τοιχοποιία.

**Υλικά μόνωσης** Τα διαφορετικά υλικά μόνωσης που έχουμε χρησιμοποιήσει είναι από τα πιο ευρέως διαδεδομένα στην Ευρώπη και την Ελλάδα. Η επιλογή γίνεται μεταξύ 8 υλικών με διαφορετική πυκνότητα (βάρος), διαφορετική θερμική αντίσταση (δείκτης θερμοπερατότητας) και διαφορετική τιμή. Χρησιμοποιούμε τόσο ορυκτές μονώσεις (πετροβάμβακας , υαλοβάμβακας, ορυκτοβάμβακας) όσο και συνθετικά πολυμερή (διογκωμένη πολυστερίνη και πολυουρεθάνη σε αφρό) αλλά και πιο οικολογικά υλικά όπως ο φελλός και το λινάρι.

**Θερμομόνωση τοιχοποιίας** Χρησιμοποιήθηκε θερμοπρόσοψη δηλαδή εξωτερική μόνωση του κελύφους. Είναι η μέθοδος που χρησιμοποιείται κατά κύριο λόγο τα τελευταία χρόνια και προσφέρει ομοιόμορφη προστασία στο κτίριο, περικλείει το κέλυφος σαν μανδύας, μειώνοντας τις θερμογέφυρες. Βασικότερο πλεονέκτημα αποτελεί η εκμετάλλευση ολόκληρης της θερμοχωρητικότητας του τοίχου (ικανότητα για

αποθήκευση θερμότητας) καθώς επίσης και ότι προστατεύει τόσο την τοιχοποιία όσο και τις διάφορες σωληνώσεις που κρύβει από υγρασία και διάβρωση. Μειονέκτημα αποτελεί η καθυστέρηση στην αρχική θέρμανση του χώρου καθώς και ο κίνδυνος εμφάνισης ρηγματώσεως αν δεν εφαρμοσθεί σωστά (απαιτεί λοιπόν, εξειδικευμένο συνεργείο).

**Θερμομόνωση στοιχείων από σκυρόδεμα** Πολύ σημαντικό για ένα σωστό και ολοκληρωμένο αποτέλεσμα είναι να δοθεί προσοχή στη θερμομόνωση των υποστυλωμάτων και των δοκών. Αν και καταλαμβάνουν μικρότερη επιφάνεια σε σχέση με την τοιχοποιία, η μόνωση τους είναι αρκετά κρίσιμη εξαιτίας της μικρής θερμικής αντίστασης που παρουσιάζει το σκυρόδεμα. Για την ακρίβεια στοιχεία από μπετόν έχουν πολύ περισσότερες απώλειες σε σχέση με τα στοιχεία από τούβλο (η θερμική αγωγιμότητα του τούβλου είναι  $\lambda=0.450 (W/mK)$  ενώ του οπλισμένου σκυροδέματος είναι  $\lambda=2.5 (W/mK)$ ). Η μόνωση στο μπετό γίνεται εξωτερικά όταν υπάρχει ο απαιτούμενος χώρος (δεν υπάρχει όμορο κτίριο) προκειμένου να εκμεταλλευτούμε τη θερμοχωρητικότητα των δομικών στοιχείων. Σε συνδυασμό με τη θερμοπρόσοψη της τοιχοποιίας, υπό την προϋπόθεση ότι η εφαρμογή όλων έγινε σωστά και χωρίς κακοτεχνίες, ελαχιστοποιούνται οι θερμογέφυρες και δημιουργείται ένα άρτιο αποτέλεσμα που προσφέρει θερμική άνεση.

Η θερμική αντίσταση ( $R_k$ ) του κάθε υλικού ορίζεται ως :

$$R_k = d_k / \lambda_k \quad (6.1)$$

όπου

$d_k$  είναι το πάχος της κάθε στρώσης υλικού και

$\lambda_k$  είναι ο δείκτης θερμικής αγωγιμότητας του υλικού από το οποίο αποτελείται η κάθε στρώση. Ο δείκτης  $\lambda$  (lamda) βρίσκεται στη βιβλιοθήκη υλικών (Πίνακας 5.1)

Στρώσεις	Πάχος στρώσης $d_k(m)$	Θερμική Αγωγιμότητα υλικού $\lambda (W/mK)$	Θερμική αντίσταση υλικού $R (m^2K/W)$
Εξωτ. Επίχρισμα	0.02	0.87	0.023
Υλικό Μόνωσης	0.04-0.07	0.023-0.042	$R = d/\lambda$
Τούβλο	0.17	0.45	0.38
Εσωτ. Επίχρισμα	0.02	0.87	0.023

Πίνακας 6.1: Τυπική διάταξη θερμοπρόσοψης

Στρώσεις	Πάχος στρώσης $d_k(m)$	Θερμική Αγωγιμότητα υλικού $\lambda (W/mK)$	Θερμική αντίσταση υλικού $P (m^2K/W)$
Εξωτ. Επίχρισμα	0.02	0.87	0.023
Υλικό Μόνωσης	0.04-0.07	0.023-0.042	$R = d/\lambda$
Οπλισμένο Σκυρόδεμα	$dc$	2.5	$R = dc/\lambda$
Εσωτ. Επίχρισμα	0.02	0.87	0.023

Πίνακας 6.2: Τυπική διάταξη εξωτερικών στοιχείων από σκυρόδεμα

Ο δείκτης θερμοπερατότητας  $U (W/m^2K)$  ορίζεται ως:

$$U = 1/R_{o\lambda} \quad (6.2)$$

όπου

$$R_{o\lambda} = R_i + \sum R_k + R_a \quad (6.3)$$

Το  $R_{o\lambda}$  (Θερμική αντίσταση στοιχείου) ισούται με το άθροισμα των  $R$  των υλικών του στοιχείου αυξημένο με το  $R$  της εσωτερικής και εξωτερικής στρώσης αέρα ( $R_i, R_a$ ). (Σχήμα 6.3)

**Πίνακας 3α.** Τιμές συντελεστών θερμικής μετάβασης και αντιστάσεων θερμικής μετάβασης επιφανειακού στρώματος αέρα κατά ISO 6946 (πηγή: ISO 6946).

Α/Α	Κατεύθυνση θερμικής ροής	Συντελεστές θερμικής μετάβασης		Αντιστάσεις θερμικής μετάβασης	
		1/R <sub>i</sub>	1/R <sub>a</sub>	R <sub>i</sub>	R <sub>a</sub>
		W/(m <sup>2</sup> ·K)	W/(m <sup>2</sup> ·K)	(m <sup>2</sup> ·K)/W	(m <sup>2</sup> ·K)/W
1	Οριζόντια θερμική ροή	7,70	25,00	0,13	0,04
2	Κατακόρυφη θερμική ροή προς τα άνω	10,00	25,00	0,10	0,04
3	Κατακόρυφη θερμική ροή προς τα κάτω	5,88	25,00	0,17	0,04

Σχήμα 6.3: Θερμική αντίσταση εσωτερικής και εξωτερικής στρώσης αέρα

Τελικά από τους τύπους 6.12, 6.13 και 6.14 καταλήγουμε στον τελικό τύπο του δείκτη θερμοπερατότητας μεμονωμένου στοιχείου ο οποίος δίνεται:

$$U = 1/(R_i + \sum d_k/\lambda_k + R_a) \quad (6.4)$$

Θα πρέπει το U κάθε στοιχείου να μην υπερβαίνει το μέγιστο επιτρεπόμενο (Σχήμα 6.4) που ορίζει ο Κ.Εν.Α.Κ., με έμφαση στις τοιχοπληρώσεις που αποτελούν και το κρίσιμο στοιχείο της θερμομόνωσης.

Δηλαδή

$$U \leq U_{max} \quad (6.5)$$

**Πίνακας 6.** Μέγιστες επιτρεπόμενες τιμές του συντελεστή θερμοπερατότητας διαφόρων δομικών στοιχείων ανά κλιματική ζώνη (πηγή: Κ.Εν.Α.Κ.).

Δομικό στοιχείο	Σύμβολο	Μέγιστος επιτρεπόμενος συντελεστής θερμοπερατότητας [W/(m <sup>2</sup> ·K)]			
		Ζώνη Α	Ζώνη Β	Ζώνη Γ	Ζώνη Δ
Εξωτερική οριζόντια ή κεκλιμένη επιφάνεια σε επαφή με τον εξωτερικό αέρα (οροφές)	U <sub>R</sub>	0,50	0,45	0,40	0,35
Εξωτερικοί τοίχοι σε επαφή με τον εξωτερικό αέρα	U <sub>T</sub>	0,60	0,50	0,45	0,40
Δάπεδα σε επαφή με τον εξωτερικό αέρα (πιλοτές)	U <sub>FA</sub>	0,50	0,45	0,40	0,35
Εξωτερικοί τοίχοι σε επαφή με μη θερμαινόμενους χώρους	U <sub>TU</sub>	1,50	1,00	0,80	0,70
Εξωτερικοί τοίχοι σε επαφή με το έδαφος	U <sub>TB</sub>	1,50	1,00	0,80	0,70
Δάπεδα σε επαφή με κλειστούς μη θερμαινόμενους χώρους	U <sub>FU</sub>	1,20	0,90	0,75	0,70
Δάπεδα σε επαφή με το έδαφος	U <sub>FB</sub>	1,20	0,90	0,75	0,70
Κουφώματα ανοιγμάτων	U <sub>w</sub>	3,20	3,00	2,80	2,60
Γυάλινες προσόψεις κτηρίων μη ανοιγόμενες ή μερικώς ανοιγόμενες	U <sub>GF</sub>	2,20	2,00	1,80	1,80

Σχήμα 6.4: Μέγιστες επιτρεπόμενες τιμές του συντελεστή θερμοπερατότητας διαφόρων δομικών στοιχείων

Ο μέσος συντελεστής θερμοπερατότητας U<sub>m</sub> προκύπτει από το συνυπολογισμό των συντελεστών όλων των επιμέρους δομικών στοιχείων της θερμαινόμενης ζώνης κατά την ποσοστιαία αναλογία των αντίστοιχων εμβαδών τους. Στον υπολογισμό λαμβάνονται υπόψη τόσο τα αδιαφανή στοιχεία (τοιχοπληρώσεις, υποστυλώματα, οροφή, δοκάρια, δάπεδο) όσο και τα διάφανα (κουφώματα), συμπεριλαμβάνονται ακόμα και οι γραμμικές θερμογέφυρες που υπάρχουν στις συναρμογές των δομικών στοιχείων. Το U<sub>m</sub> δίνεται από τον τύπο:

$$U_m = (\sum_j^n A_j U_j b + \sum_i^v l_i \psi_i b) / (\sum_j^n A_j) \quad (6.6)$$

όπου

*l* το μήκος της θερμογέφυρας

*ψ* ο αντίστοιχος συντελεστής για τον τύπο της θερμογέφυρας και

$b$  μειωτικός συντελεστής για την προσαρμογή των θερμικών απωλειών στις πραγματικές θερμοκρασίες (για επιφάνεια σε επαφή με εξωτερικό αέρα  $b=1$ ).

Στο δεύτερο στάδιο θερμικής επάρκειας ελέγχεται ο μέσος συντελεστής του κτιρίου και πρέπει να είναι μικρότερος από το εκάστοτε  $U$  επιτρεπόμενο ( $Um_{max}$ ), ο οποίος είναι διαφορετικός για κάθε κτίριο και εξαρτάται τόσο από την ενεργειακή ζώνη στην οποία βρίσκεται το κτίριο όσο και από το λόγο  $A/V$  (επιφάνεια/όγκος) της κατασκευής (Σχήμα 6.5).

Δηλαδή

$$Um \leq Um_{max} \quad (6.7)$$

**Πίνακας 7.** Μέγιστες επιτρεπόμενες τιμές του μέσου συντελεστή θερμοπερατότητας ενός κτηρίου ανά κλιματική ζώνη συναρτήσει του λόγου της περιβάλλουσας επιφάνειας του κτηρίου προς τον όγκο του (πηγή: Κ.Εν.Α.Κ.).

Λόγος $A/V$ [ $m^{-1}$ ]	Μέγιστες επιτρεπόμενες τιμές μέσου συντελεστή θερμοπερατότητας $U_m$ [ $W/(m^2 \cdot K)$ ]			
	Ζώνη Α	Ζώνη Β	Ζώνη Γ	Ζώνη Δ
$\leq 0,2$	1,26	1,14	1,05	0,96
0,3	1,20	1,09	1,00	0,92
0,4	1,15	1,03	0,95	0,87
0,5	1,09	0,98	0,90	0,83
0,6	1,03	0,93	0,86	0,78
0,7	0,98	0,88	0,81	0,73
0,8	0,92	0,83	0,76	0,69
0,9	0,86	0,78	0,71	0,64
$\geq 1,0$	0,81	0,73	0,66	0,60

Σχήμα 6.5: Μέγιστες επιτρεπόμενες τιμές του συντελεστή διαπερατότητας κτιρίου



## 6.4 Εφαρμογή σεναρίων περιβαλλοντικής βελτιστοποίησης με χρήση MATLAB

**Μεταβλητές σχεδιασμού:** Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, για αυτά τα δύο είδη βελτιστοποίησης ως μεταβλητές σχεδιασμού ορίστηκαν το πάχος μόνωσης δομικών στοιχείων από σκυρόδεμα, το πάχος μόνωσης τοιχοποιίας, το υλικό μόνωσης δομικών στοιχείων από σκυρόδεμα και το υλικό μόνωσης τοιχοποιίας .

Αυτό που κάνει λοιπόν ο αλγόριθμος που αναπτύχθηκε είναι να επιλέγει ένα τυχαίο συνδυασμό των μεταβλητών μας (πάχος και είδος μόνωσης) και κατόπιν να εξετάζει αν ο συνδυασμός που επέλεξε είναι δεκτός με βάση τους περιορισμούς μας.

**Περιορισμοί:** Οι περιορισμοί μας είναι δύο. Πρώτα απ όλα θα πρέπει με βάση τον συνδυασμό των μεταβλητών που έχουν επιλεγεί, ο συντελεστής θερμοπερατότητας του κάθε δομικού στοιχείου  $U$  να είναι μικρότερος από το αντίστοιχο  $U_{max}$  (Σχέση 6.5) των κανονισμών. Αφού περάσουν επιτυχώς το πρώτο στάδιο ελέγχου όλα μας τα δομικά στοιχεία και οι τοιχοποιίες ύστερα γίνεται ένας δεύτερος έλεγχος όπου συγκρίνεται το  $Um$  της κατασκευής μας με το αντίστοιχο  $Um_{max}$  (Σχέση 6.7) των κανονισμών. Σε οποιοδήποτε σημείο της παραπάνω διαδικασίας κάποιο στοιχείο ή το σύνολο της κατασκευής μας αποτύχει να περάσει τους ελέγχους, ο αλγόριθμος διακόπτεται και επιστρέφει στην τυχαία επιλογή μεταβλητών.

Όταν καταλήξει σε ικανοποιητικό συνδυασμό μεταβλητών τότε ο αλγόριθμος προχωράει και με βάση το κεφάλαιο 5 υπολογίζει το Total Embodied Energy και Total  $CO_2$  Emissions της κατασκευής μας. Όλη αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται για ένα πολύ μεγάλο αριθμό επαναλήψεων (παρατηρήσαμε ότι μετά τις 50,000 επαναλήψεις δεν υπάρχει περαιτέρω βελτιστοποίηση) και στο τέλος ο αλγόριθμος παρουσιάζει το βέλτιστο συνδυασμό με βάση τον οποίο προέκυψε η ελάχιστη απαιτούμενη ενσωματωμένη ενέργεια και το βέλτιστο συνδυασμό με βάση τον οποίο προέκυψαν οι ελάχιστες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα. Ακολουθούν αναλυτικοί πίνακες με τα αποτελέσματα των βελτιστοποιήσεων κάθε μοντέλου. Ο αρχικός σχεδιασμός αντιστοιχεί στα δεδομένα αρχικού σχεδιασμού των μοντέλων στο SAP, τα οποία παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 5.

**Αποτελέσματα:** Στον Πίνακα 6.3 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης με βάση την Ενσωματωμένη Ενέργεια των υλικών. Όπως αναφέρθηκε, οι μεταβλητές σχεδιασμού ήταν το πάχος και το είδος μόνωσης των δομικών και μη στοιχείων συνεπώς δεν υπήρξε καμία αλλαγή στις διατομές από φέροντα οργανισμό ή στις τοιχοποιίες πλην των μονώσεων. Παρατηρούμε ότι δεν υπήρξε μεγάλη ποικιλία στην επιλογή υλικού μόνωσης ύστερα από την βελτιστοποίηση, πράγμα αναμενόμενο λόγω των πολύ καλών ενεργειακών χαρακτηριστικών του φελλού. Ωστόσο παρατηρείται μία σχετική αύξηση των παχών μόνωσης και στα τρία μοντέλα, στο μοντέλο 1 από 5cm σε 6cm για τα δομικά στοιχεία και 4.5cm για τις τοιχοποιίες, στο μοντέλο 2 από 5cm σε 6.5cm για τα δομικά στοιχεία και 4.5cm για τις τοιχοποιίες, στο μοντέλο 3 από 5cm σε 5.5cm για τα δομικά στοιχεία και 4.5cm για τις τοιχοποιίες, προφανώς για λόγους ικανοποίησης των περιορισμών θερμοπερατότητας. Ύστερα από τις βελτιστοποιήσεις παρουσιάστηκε ένα πολύ σημαντικό ποσοστό μείωσης των ενεργειακών καταναλώσεων των υλικών και στα τρία μοντέλα. Πιο συγκεκριμένα στο μοντέλο 1 οι καταναλώσεις, ύστερα από τις νέες επιλογές υλικών, μειώθηκαν από  $5.15 \times 10^3 MJ/m^2$  του αρχικού σχεδιασμού σε  $4.74 \times 10^3 MJ/m^2$ , στο μοντέλο 2 από  $4.06 \times 10^3 MJ/m^2$  σε  $3.71 \times 10^3 MJ/m^2$  και στο μοντέλο 3 από  $3.92 \times 10^3 MJ/m^2$  σε  $3.63 \times 10^3 MJ/m^2$ . Αν και το σενάριο βελτιστοποίησης αφορούσε τις ενεργειακές καταναλώσεις, παρατηρούμε μια σημαντική μείωση και στις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα. Πιο αναλυτικά στο μοντέλο 1 παρουσιάστηκε μείωση από  $4.11 \times 10^2 kgCO_2/m^2$  σε  $3.97 \times 10^2 kgCO_2/m^2$ , στο μοντέλο 2 από  $3.13 \times 10^2 kgCO_2/m^2$  σε  $3.01 \times 10^2 kgCO_2/m^2$  και στο μοντέλο 3 από  $3.19 \times 10^2 kgCO_2/m^2$  σε  $3.03 \times 10^2 kgCO_2/m^2$ .

	Αρχικός Σχεδιασμός			Βελτιστοποίηση με βάση το Embodied Energy		
	Μοντέλο 1	Μοντέλο 2	Μοντέλο 3	Μοντέλο 1	Μοντέλο 2	Μοντέλο 3
Υποστυλώματα 1 (mxm)	0.6 x 0.6	0.8 x 0.8	0.9 x 0.9	0.6 x 0.6	0.8 x 0.8	0.9 x 0.9
Υποστυλώματα 2 (mxm)	-	-	-	-	-	-
Δοκοί 1 (mxm)	0.75 x 0.4	0.7 x 0.3	0.8 x 0.6	0.75 x 0.4	0.7 x 0.3	0.8 x 0.6
Δοκοί 2 (mxm)	-	-	0.8 x 0.5	-	-	0.8 x 0.5
Υλικό μόνωσης δομικών στοιχείων	Διογκωμένη Πολυστερίνη	Πολυουρεθάνη σε αφρό	Πετροβάμβακας	Φελλός	Φελλός	Φελλός
Πάχος μόνωσης δομικών στοιχείων (m)	0.05	0.05	0.05	0.06	0.065	0.055
Υλικό μόνωσης τοιχοποιίας	Διογκωμένη Πολυστερίνη	Πολυουρεθάνη σε αφρό	Πετροβάμβακας	Φελλός	Φελλός	Φελλός
Πάχος μόνωσης τοιχοποιίας (m)	0.05	0.05	0.05	0.045	0.045	0.045
Total Area (m2)	769	2488	5906	769	2488	5906
Total Embodied Energy (Mjoule)	3.96E+06	1.01E+07	2.32E+07	3.64E+06	9.23E+06	2.14E+07
Energy Demand /Net Area (Mjoule/m2)	5.15E+03	4.06E+03	3.92E+03	4.74E+03	3.71E+03	3.63E+03
Total CO2 Emissions (kgCO2)	3.16E+05	7.78E+05	1.88E+06	3.05E+05	7.50E+05	1.79E+06
Total CO2 Emissions/Net Area (kgCO2/m2)	4.11E+02	3.13E+02	3.19E+02	3.97E+02	3.01E+02	3.03E+02
Ποσοστό Βελτιστοποίησης	-	-	-	8.00%	8.52%	7.36%

Πίνακας 6.3: Σενάριο βελτιστοποίησης 1, min(*EmbodiedEnergy*)

Στον Πίνακα 6.4 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης με στόχο την ελαχιστοποίηση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα. Οι μεταβλητές σχεδιασμού και σταθερές λήφθηκαν σε αντιστοιχία με ό,τι περιγράφηκε παραπάνω για την βελτιστοποίηση των ενεργειών. Αυτή τη φορά παρατηρούμε πως το επικρατέστερο υλικό για αυτό το είδος βελτιστοποίησης είναι η διογκωμένη πολυστερίνη και μάλιστα με πάχος μικρότερο ή οριακά ίσο με το επιλεγμένο του αρχικού σχεδιασμού, σε όλες τις περιπτώσεις. Συγκεκριμένα στο μοντέλο 1 μειώθηκε από 5cm σε 4.5cm για τα δομικά στοιχεία και 4cm για τις τοιχοποιίες, στο μοντέλο 2 για τα δομικά στοιχεία έμεινε σταθερό στα 5cm και για τις τοιχοποιίες μειώθηκε στα 4cm, ενώ στο μοντέλο 3 από 5cm μειώθηκε στα 4cm τόσο για τα δομικά στοιχεία όσο και για τις τοιχοποιίες. Όσον αφορά τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, σε αντιστοιχία με τον στόχο της βελτιστοποίησης, μειώθηκαν σε όλα τα μοντέλα. Πιο αναλυτικά στο μοντέλο 1 παρουσιάστηκε μείωση από  $4.11 \times 10^2 \text{kgCO}_2/\text{m}^2$  σε  $3.89 \times 10^2 \text{kgCO}_2/\text{m}^2$ , στο μοντέλο 2 από

$3.13 \times 10^2 kgCO_2/m^2$  σε  $2,97 \times 10^2 kgCO_2/m^2$  και στο μοντέλο 3 από  $3.19 \times 10^2 kgCO_2/m^2$  σε  $3.01 \times 10^2 kgCO_2/m^2$ . Κοινή συμπεριφορά παρατηρήθηκε και στα μεγέθη των ενεργειακών καταναλώσεων και ως μην ήταν το αντικείμενο βελτιστοποίησης. Παρατηρήθηκε λοιπόν αξιοσημείωτη μείωση, πιο συγκεκριμένα στο μοντέλο 1 οι καταναλώσεις, ύστερα από τις νέες επιλογές υλικών, μειώθηκαν από  $5.15 \times 10^3 MJ/m^2$  του αρχικού σχεδιασμού σε  $4.78 \times 10^3 MJ/m^2$ , στο μοντέλο 2 από  $4.06 \times 10^3 MJ/m^2$  σε  $3.73 \times 10^3 MJ/m^2$  και στο μοντέλο 3 από  $3.92 \times 10^3 MJ/m^2$  σε  $3.65 \times 10^3 MJ/m^2$ .

	Αρχικός Σχεδιασμός			Βελτιστοποίηση με βάση τα CO <sub>2</sub> Emissions		
	Μοντέλο 1	Μοντέλο 2	Μοντέλο 3	Μοντέλο 1	Μοντέλο 2	Μοντέλο 3
	Υποστυλώματα 1 (mxm)	0.6 x 0.6	0.8 x 0.8	0.9 x 0.9	0.6 x 0.6	0.8 x 0.8
Υποστυλώματα 2 (mxm)	-	-	-	-	-	-
Δοκοί 1 (mxm)	0.75 x 0.4	0.7 x 0.3	0.8 x 0.6	0.75 x 0.4	0.7 x 0.3	0.8 x 0.6
Δοκοί 2 (mxm)	-	-	0.8 x 0.5	-	-	0.8 x 0.5
Υλικό μόνωσης δομικών στοιχείων	Διογκωμένη Πολυστερίνη	Πολυουρεθάνη σε αφρό	Πετροβάμβακας	Διογκωμένη Πολυστερίνη	Διογκωμένη Πολυστερίνη	Διογκωμένη Πολυστερίνη
Πάχος μόνωσης δομικών στοιχείων (m)	0.05	0.05	0.05	0.045	0.05	0.04
Υλικό μόνωσης τοιχοποιίας	Διογκωμένη Πολυστερίνη	Πολυουρεθάνη σε αφρό	Πετροβάμβακας	Διογκωμένη Πολυστερίνη	Διογκωμένη Πολυστερίνη	Διογκωμένη Πολυστερίνη
Πάχος μόνωσης τοιχοποιίας (m)	0.05	0.05	0.05	0.04	0.04	0.04
Total Area (m <sup>2</sup> )	769	2488	5906	769	2488	5906
Total Embodied Energy (Mjoule)	3.96E+06	1.01E+07	2.32E+07	3.68E+06	9.29E+06	2.15E+07
Energy Demand /Net Area (Mjoule/m <sup>2</sup> )	5.15E+03	4.06E+03	3.92E+03	4.78E+03	3.73E+03	3.65E+03
Total CO <sub>2</sub> Emissions (kgCO <sub>2</sub> )	3.16E+05	7.78E+05	1.88E+06	2.99E+05	7.40E+05	1.77E+06
Total CO <sub>2</sub> Emissions/Net Area (kgCO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup> )	4.11E+02	3.13E+02	3.19E+02	3.89E+02	2.97E+02	3.01E+02
Ποσοστό Βελτιστοποίησης	-	-	-	5.40%	4.87%	5.65%

Πίνακας 6.4: Σενάριο βελτιστοποίησης 2, min(CO<sub>2</sub>Emissions)

## 6.5 Εφαρμογή βελτιστοποίησης με βάση το κόστος υλικών με χρήση του OCP

Ο OCP υποστηρίζει πολλές διαφορετικές αντικειμενικές συναρτήσεις. Ανάλογα με τις απαιτήσεις του εκάστοτε σχεδιασμού, η επιλογή γίνεται από το χρήστη ενώ έχει τη δυνατότητα να χρησιμοποιήσει παραπάνω από μία με την εισαγωγή σταθμικών συντελεστών. Η πλατφόρμα, για την ανάλυση των κατασκευών, βασίζεται στις διαδικασίες σχεδιασμού που προτείνουν οι Ευρωκώδικες και υποστηρίζονται από τα προγράμματα ανάλυσης SAP2000 ή SCADA Pro. Υποστηρίζει ακόμα δύο πιο σύνθετες μεθόδους ανάλυσης: την επαυξητική δυναμική ανάλυση (Βαμβάτσικος και Cornell 2002) καθώς και την επαυξητική δυναμική ανάλυση πολλαπλών στοιχείων (Λαγαρός 2010). Αν είναι επιθυμητό να οριστούν κάποιοι επιπλέον περιορισμοί πέρα των κανονισμών, δίνεται αυτή η δυνατότητα στο χρήστη. Στην παρούσα μελέτη χρησιμοποιήθηκε μόνο η αντικειμενική συνάρτηση κόστους υλικών (material cost) με σκοπό τη βελτιστοποίηση των διατομών των δομικών στοιχείων ώστε να επιτευχθεί το μικρότερο δυνατό κόστος με ασφαλή τρόπο.

**Μεταβλητές σχεδιασμού:** Ως μεταβλητές σχεδιασμού για τη βελτιστοποίηση κόστους δόθηκαν οι διαστάσεις των διατομών σκυροδέματος των δομικών στοιχείων.

**Περιορισμοί:** Για αυτού του είδους την βελτιστοποίηση λήφθηκαν ως περιορισμοί η αντοχή σε κάμψη (bending moment), η αντοχή σε διάτμηση (Shear force), ο έλεγχος βελών (deflection), ο ικανοτικός κόμβου (cross-section capacity) και ο έλεγχος ανηγμένης αξονικής στα υποστυλώματα ανάλογα με την κατηγορία πλαστιμότητας (axial force).

**Αποτελέσματα:** Στον Πίνακα 6.5 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα μετά τη βελτιστοποίηση με βάση το κόστος υλικών και στα τρία μοντέλα. Παρατηρούμε ότι, όπως αναφέραμε παραπάνω, αλλαγές υπέστησαν μόνο οι διατομές σκυροδέματος των δομικών στοιχείων δηλαδή των δοκών και των υποστυλωμάτων. Συγκεκριμένα στο μοντέλο 1 τα υποστυλώματα διαστάσεων  $0.6 \times 0.6$  μετατράπηκαν σε  $0.4 \times 0.4$ , στο μοντέλο 2 από  $0.8 \times 0.8$  σε  $0.6 \times 0.6$  και κάποια σε  $0.8 \times 0.6$  και στο μοντέλο 3 από  $0.9 \times 0.9$  σε  $0.45 \times 0.45$ . Σχετικά με τις δοκούς υπήρξαν επίσης τροποποιήσεις, στο

μοντέλο 1 από  $0.75 \times 0.4$  σε  $0.7 \times 0.4$ , στο μοντέλο 2 αυξήθηκαν, λόγω μη ικανοποίησης των περιορισμών που τέθηκαν για τη βελτιστοποίηση, από  $0.7 \times 0.3$  σε  $0.65 \times 0.6$  ενώ στο μοντέλο 3 στο οποίο είχαμε δύο διαφορετικές κατηγορίες δοκών, η πρώτη από  $0.8 \times 0.6$  μετατράπηκε σε  $0.55 \times 0.4$  και η δεύτερη από  $0.8 \times 0.5$  σε  $0.85 \times 0.3$ . Αλλαγές στις μονώσεις και στις τοιχοποιίες δεν υπήρξαν μιας και ο βελτιστοποιητής δέχεται σαν μοντέλο εισαγωγής μόνο τον σκελετό του κτιρίου κατευθείαν από το SAP2000. Επομένως για τον υπολογισμό στοιχείων όπως οι καταναλώσεις ενέργειας και οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, τα δεδομένα που αφορούν σε αυτά τα στοιχεία λήφθηκαν ίδια με τον αρχικό σχεδιασμό, όπως φαίνεται και στον Πίνακα των αποτελεσμάτων. Ωστόσο οι αλλαγές στις διατομές σκυροδέματος οδήγησαν σε σημαντικές αλλαγές και στον περιβαλλοντικό αντίκτυπο. Πιο συγκεκριμένα μετά τη βελτιστοποίηση οι συνολικές καταναλώσεις ενέργειας του μοντέλου 1 από  $5.15 \times 10^3 MJ/m^2$  έγιναν  $4.84 \times 10^3 MJ/m^2$ , του μοντέλου 3 από  $3.92 \times 10^3 MJ/m^2$  σε  $3.39 \times 10^3 MJ/m^2$  ενώ στο μοντέλο 2 στο οποίο οι διατομές ύστερα από τη βελτιστοποίηση αντιστοιχούσαν σε μεγαλύτερη ποσότητα σκυροδέματος, δεν υπήρξε βελτίωση των περιβαλλοντικών στοιχείων αλλά χειροτέρευση, από  $4.06 \times 10^3 MJ/m^2$  σε  $4.26 \times 10^3 MJ/m^2$ . Σχετικά με τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, τα μεγέθη κινήθηκαν σε αντιστοιχία με τις καταναλώσεις ενέργειας. Στο μοντέλο 1 οι συνολικές καταναλώσεις ενέργειας κινήθηκαν από  $4.11 \times 10^2 kgCO_2/m^2$  σε  $3.81 \times 10^2 kgCO_2/m^2$ , στο μοντέλο 3 από  $3.19 \times 10^2 kgCO_2/m^2$  σε  $2.64 \times 10^2 kgCO_2/m^2$  ενώ στο μοντέλο 3 αυξήθηκαν από  $3.13 \times 10^2 kgCO_2/m^2$  σε  $3.32 \times 10^2 kgCO_2/m^2$ . Τέλος σχετικά με το κόστος των υλικών το οποίο αποτέλεσε και το αντικείμενο βελτιστοποίησης, στο μοντέλο 1 παρουσιάστηκε βελτιστοποίηση της τάξης του 4.29% με το τελικό κόστος να ανέρχεται στα  $2.1 \times 10^4 Euro$ , στο μοντέλο 3 βελτιστοποίηση 33.85% με τελικό κόστος υλικών φέροντα οργανισμού ίσο με  $1.86 \times 10^5 Euro$  ενώ στο μοντέλο 2 στο οποίο παρουσιάστηκε αύξηση των απαιτούμενων υλικών είχαμε τελικό κόστος στα  $1.13 \times 10^5 Euro$  αυξημένο κατά 26% σε σχέση με το κόστος του αρχικού σχεδιασμού.

	Αρχικός Σχεδιασμός			Βελτιστοποίηση με βάση το <b>Material Cost</b>		
	Μοντέλο 1	Μοντέλο 2	Μοντέλο 3	Μοντέλο 1	Μοντέλο 2	Μοντέλο 3
Υποστυλώματα 1 (mxm)	0.6 x 0.6	0.8 x 0.8	0.9 x 0.9	0.4x 0.4	0.6 x 0.6	0.45 x 0.45
Υποστυλώματα 2 (mxm)	-	-	-	-	0.8 x 0.6	-
Δοκοί 1 (mxm)	0.75 x 0.4	0.7 x 0.3	0.8 x 0.6	0.7 x 0.4	0.65 x 0.6	0.55 x 0.4
Δοκοί 2 (mxm)	-	-	0.8 x 0.5	-	-	0.85 x 0.3
Υλικό μόνωσης δομικών στοιχείων	Διογκωμένη Πολυστερίνη	Πολυουρεθάνη σε αφρό	Πετροβάμβακας	Διογκωμένη Πολυστερίνη	Πολυουρεθάνη σε αφρό	Πετροβάμβακας
Πάχος μόνωσης δομικών στοιχείων (m)	0.05	0.05	0.08	0.05	0.05	0.08
Υλικό μόνωσης τοιχοποιίας	Διογκωμένη Πολυστερίνη	Πολυουρεθάνη σε αφρό	Πετροβάμβακας	Διογκωμένη Πολυστερίνη	Πολυουρεθάνη σε αφρό	Πετροβάμβακας
Πάχος μόνωσης τοιχοποιίας (m)	0.05	0.05	0.08	0.05	0.05	0.08
Total Area (m2)	769	2488	5906	769	2488	5906
Total Embodied Energy (Mjoule)	3.96E+06	1.01E+07	2.32E+07	3.72E+06	1.06E+07	2.00E+07
Energy Demand /Net Area (Mjoule/m2)	5.15E+03	4.06E+03	3.92E+03	4.84E+03	4.26E+03	3.39E+03
Total CO2 Emissions (kgCO2)	3.16E+05	7.78E+05	1.88E+06	2.93E+05	8.25E+05	1.56E+06
Total CO2 Emissions/Net Area (kgCO2/m2)	4.11E+02	3.13E+02	3.19E+02	3.81E+02	3.32E+02	2.64E+02
Κόστος Δομικών Υλικών (€)	2.20E+04	8.92E+04	2.81E+05	2.10E+04	1.13E+05	1.86E+05
Ποσοστό Βελτιστοποίησης	-	-	-	4.29%	-26.98%	33.85%

Πίνακας 6.5: Σενάριο βελτιστοποίησης 3, min(*MaterialCost*)

## 6.6 Παρουσίαση-Σύγκριση αποτελεσμάτων Βελτιστοποιήσεων

Σε μία προσπάθεια κυρίως να αναδειχτεί η αξία της βελτιστοποίησης κατά τη μελέτη των κατασκευών αλλά και το όφελος το οποίο υπάρχει σε επόμενα στάδια, δημιουργήθηκαν οι παρακάτω πίνακες οι οποίοι παρουσιάζουν συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα ανά υλικό καθώς και το ποσοστό συνεισφοράς του καθενός στη βελτιστοποίηση.

Στο μοντέλο 1 (Πίνακας 6.6) λόγω της βελτιστοποίησης με βάση το κόστος υλικών, παρατηρήθηκε μία εξίσου σημαντική βελτίωση του περιβαλλοντικού αντίκτυπου. Συγκεκριμένα ειδικά για το σκυρόδεμα το οποίο αποτελεί και τη βασική πηγή εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα αλλά και κατανάλωσης ενέργειας, σημειώθηκε μία μείωση του

περιβαλλοντικού αντίκτυπου της τάξης του 14%, μόνο και μόνο από την βέλτιστη διαστασιολόγηση των διατομών των δομικών στοιχείων. Συμπεραίνουμε λοιπόν πως η βέλτιστη και χωρίς σπατάλες χρήση των υλικών έχει αφενός οικονομικό όφελος, αφετέρου περιβαλλοντικό. Στα υπόλοιπα υλικά της κατασκευής τα οποία αποτέλεσαν σταθερές κατά τη βελτιστοποίηση του κόστους, παρατηρούμε μικρές βελτιώσεις οι οποίες οφείλονται στις μειώσεις των διατομών του φέροντα οργανισμού και άρα των στρωμάτων που τον περιβάλλουν. Τα τούβλα ήταν το μοναδικό υλικό που παρουσίασε αύξηση των εκπομπών αλλά και της ενσωματωμένης ενέργειας (-2.52%), γεγονός που ήταν αναμενόμενο, λόγω της μείωσης των διαστάσεων των δομικών στοιχείων και συνεπώς της αύξησης του εμβαδού της τοιχοποιίας.

Όσον αφορά τα άλλα δύο σενάρια βελτιστοποίησης, τα μέγιστα ποσοστά βελτιστοποίησης παρατηρήθηκαν στον αντίκτυπο των μονωτικών υλικών, με πάνω από 65% βελτίωση τόσο στην ενσωματωμένη ενέργεια τους όσο και στις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, αντίστοιχα για το κάθε είδος βελτιστοποίησης. Το αποτέλεσμα αυτό αν και αναμενόμενο αφού αυτά αποτέλεσαν τη βασική μεταβλητή βελτιστοποίησης του αλγορίθμου που αναπτύχθηκε στη Matlab, είναι αξιοσημείωτο λόγω του πολύ σημαντικού ποσοστού βελτίωσης. Ωστόσο τονίζεται η ανάγκη έρευνας του κατά πόσο ο συνδυασμός αυτός εκτός από περιβαλλοντικό όφελος μπορεί να συνδυαστεί με ένα λογικό κόστος αλλά και συμπεριφορά της κατασκευής ικανή να διατηρήσει τις συνθήκες σε σωστά επίπεδα κατά τη φάση λειτουργίας, ώστε να μην μεταφερθεί εκεί το περιβαλλοντικό βάρος.



Materials	Αρχικός Σχεδιασμός Μοντέλο 1		Βελτιστοποιημένο Μοντέλο 1 Material Cost		Ποσοστά Βελτιστοποίησης		Βελτιστοποιημένο Μοντέλο 1		Ποσοστά Βελτιστοποίησης	
	EE (Mjoule)	CO2 (kg)	EE (Mjoule)	CO2 (kg)	EE (Mjoule)	CO2 (kg)	EE (Mjoule)	CO2 (kg)	EE (Mjoule)	CO2 (kg)
RConcrete 20/25 MPa	0	0	0	0	14.40%	14.40%	0	0	3.32%	3.32%
RConcrete 25/30 MPa	1.67E+06	1.61E+05	1.43E+06	1.37E+05			1.61E+06	1.55E+05		
RConcrete 28/35 MPa	0	0	0	0			0	0		
RConcrete 32/40 MPa	0	0	0	0			0	0		
steel	0	0	0	0			0	0		
Expanded Polystyrene	8.05E+04	2.32E+03	7.64E+04	2.20E+03	1.26%	0.98%	7.91E+04	4.23E+03	66.22%	65.19%
Cork	0	0	0	0			3.16E+04	0.00E+00		
Flax	0	0	0	0			0	0		
Polyurethane Flexible Foam	2.47E+05	9.83E+03	2.47E+05	9.83E+03			0	0		
Woodwool	0	0	0	0			0	0		
Mineral wool	0	0	0	0			0	0		
Glass wool	0	0	0	0			0	0		
Rockwool	0	0	0	0			0	0		
Ασβεστοτσιμ. 1800	1.82E+05	2.75E+04	1.72E+05	2.59E+04	4.13%	4.10%	2.13E+05	3.21E+04	5.64%	6.06%
Ασβεστοτσιμ. 1900	4.36E+04	6.71E+03	4.47E+04	6.88E+03			0.00	0.00		
Asphalt	6.52E+04	5.12E+02	6.52E+04	5.12E+02	0.00%	0.00%	6.52E+04	5.12E+02	0.00%	0.00%
Asphalt, 4% binder content	0	0	0	0			0	0		
Asphalt sheets	4.52E+03	1.51E+02	4.52E+03	1.51E+02			4.52E+03	1.51E+02		
General-Common Bricks	6.64E+05	5.09E+04	6.81E+05	5.22E+04	-2.52%	-2.52%	6.64E+05	5.09E+04	0.00%	0.00%
Ceramic Tiles	4.87E+05	3.00E+04	4.87E+05	3.00E+04	0.00%	0.00%	4.87E+05	3.00E+04	0.00%	0.00%
Clay Tiles	0	0	0	0			0	0		
Marble Tiles	2.64E+05	1.52E+04	2.64E+05	1.52E+04			2.64E+05	1.52E+04		
Natural Perite	3.36E+04	1.53E+03	3.36E+04	1.53E+03	0.00%	0.00%	3.36E+04	1.53E+03	0.00%	0.00%
Windows PVC framed	2.19E+05	1.12E+04	2.19E+05	1.12E+04	0.00%	0.00%	2.19E+05	1.12E+04	0.00%	0.00%

Πίνακας 6.6: Τελικά ποσοστά των τριών σεναρίων βελτιστοποίησης ανά υλικό της κατασκευής 1

Σε αντιστοιχία με αυτά που αναφέρθηκαν για το μοντέλο 1, κινήθηκε και το μοντέλο 2 (Πίνακας 6.7) όσον αφορά τις περιβαλλοντικές βελτιστοποιήσεις. Συγκεκριμένα παρουσιάστηκε μία βελτίωση της περιβαλλοντικής συμπεριφοράς των μονωτικών υλικών, πάνω από 70%. Ωστόσο, όσον αφορά τη βελτιστοποίηση με βάση το κόστος υλικών, λόγω της αύξησης των διατομών σκυροδέματος των δοκών, οι οποίες δεν ικανοποιούσαν τους περιορισμούς, αυξήθηκαν τελικά κατά 12%, τόσο η κατανάλωση ενέργειας όσο και οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα που αντιστοιχούσαν στο σκυρόδεμα.

Materials	Αρχικός Σχεδιασμός Μοντέλο 2		Βελτιστοποιημένο Μοντέλο 2 Material		Ποσοστά Βελτιστοποίησης		Βελτιστοποιημένο Μοντέλο 2		Ποσοστά Βελτιστοποίησης	
	EE (Mjoule)	CO2 (kg)	EE (Mjoule)	CO2 (kg)	EE (Mjoule)	CO2 (kg)	EE (Mjoule)	CO2 (kg)	EE (Mjoule)	CO2 (kg)
RConcrete 20/25 MPa	4.12E+06	3.92E+05	4.62E+06	4.39E+05	-12.12%	-12.12%	4.12E+06	3.92E+05	0.00%	0.00%
RConcrete 25/30 MPa	0	0	0	0			0	0		
RConcrete 28/35 MPa	0	0	0	0			0	0		
RConcrete 32/40 MPa	0	0	0	0			0	0		
steel	0	0	0	0			0	0		
Expanded Polystyrene	0	0	0	0	1.08%	1.08%	2.78E+05	1.13E+04	71.75%	75.86%
Cork	0	0	0	0			5.52E+04	0.00E+00		
Flax	0	0	0	0			0	0		
Polyurethane Flexible Foam	1.18E+06	4.69E+04	1.17E+06	4.64E+04			0	0		
Woodwool	0	0	0	0			0	0		
Mineral wool	0	0	0	0			0	0		
Glass wool	0	0	0	0			0	0		
Rockwool	0	0	0	0			0	0		
Ασβεστοτσιμ. 1800	4.49E+05	6.76E+04	4.34E+05	6.53E+04	2.59%	2.57%	5.11E+05	7.69E+04	2.50%	2.83%
Ασβεστοτσιμ. 1900	7.54E+04	1.16E+04	7.72E+04	1.19E+04			0	0		
Asphalt	2.16E+05	1.69E+03	2.16E+05	1.69E+03	0.00%	0.00%	2.16E+05	1.69E+03	0.00%	0.00%
Asphalt, 4% binder content	0	0	0	0			0	0		
Asphalt sheets	1.50E+04	4.99E+02	1.50E+04	4.99E+02			1.50E+04	4.99E+02		
General-Common Bricks	1.15E+06	8.81E+04	1.18E+06	9.02E+04	-2.54%	-2.42%	1.15E+06	8.81E+04	0.00%	0.00%
Ceramic Tiles	1.61E+06	9.95E+04	1.61E+06	9.95E+04	0.00%	0.00%	1.61E+06	9.95E+04	0.00%	0.00%
Clay Tiles	0	0	0	0			0	0		
Marble Tiles	8.47E+05	4.88E+04	8.47E+05	4.88E+04			8.47E+05	4.88E+04		
Natural Perite	1.08E+05	4.90E+03	1.08E+05	4.90E+03	0.00%	0.00%	1.08E+05	4.90E+03	0.00%	0.00%
Windows PVC framed	3.23E+05	1.65E+04	3.23E+05	1.65E+04	0.00%	0.00%	3.23E+05	1.65E+04	0.00%	0.00%

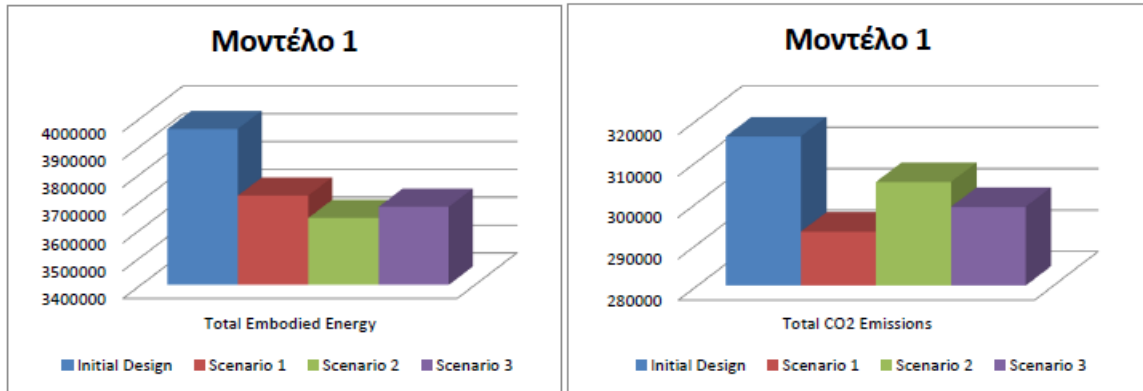
Πίνακας 6.7: Τελικά ποσοστά των τριών σεναρίων βελτιστοποίησης ανά υλικό της κατασκευής 2

Τέλος, όσον αφορά το μοντέλο 3, τα αποτελέσματα έδειξαν κοινή συμπεριφορά με αυτά που αναλύθηκαν στο μοντέλο 1 και παρουσιάζονται αναλυτικά στον Πίνακα 6.8. Κατά την βελτιστοποίηση με βάση το κόστος των υλικών παρουσιάστηκε μία πολύ σημαντική μείωση των διατομών με συνέπεια να έχουμε πάνω από 29% βελτίωση του περιβαλλοντικού αντίκτυπου που προέρχεται από το σκυρόδεμα. Σαν συνέπεια της σημαντικής μείωσης των διατομών των δομικών στοιχείων είχαμε την αύξηση της επιφάνειας της τοιχοποιίας του κτιρίου. Αυτό οδήγησε σε μεγαλύτερη ανάγκη για οπτόπλινθους και επομένως αυξημένες περιβαλλοντικές συνέπειες από την παραπάνω χρήση τούβλων (κατά 10%). Κατά την πραγματοποίηση των βελτιστοποιήσεων στη Matlab παρατηρήθηκε όπως και στα δύο προηγούμενα μοντέλα, εξαιρετική μείωση των επιπτώσεων των μονωτικών υλικών δηλαδή της κατανάλωσης ενέργειας κατά 71% στη βελτιστοποίηση με βάση το  $\min(\text{Embodied Energy})$  και των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα κατά 75% στη βελτιστοποίηση με βάση τις  $\min(\text{CO}_2 \text{ Emissions})$ .

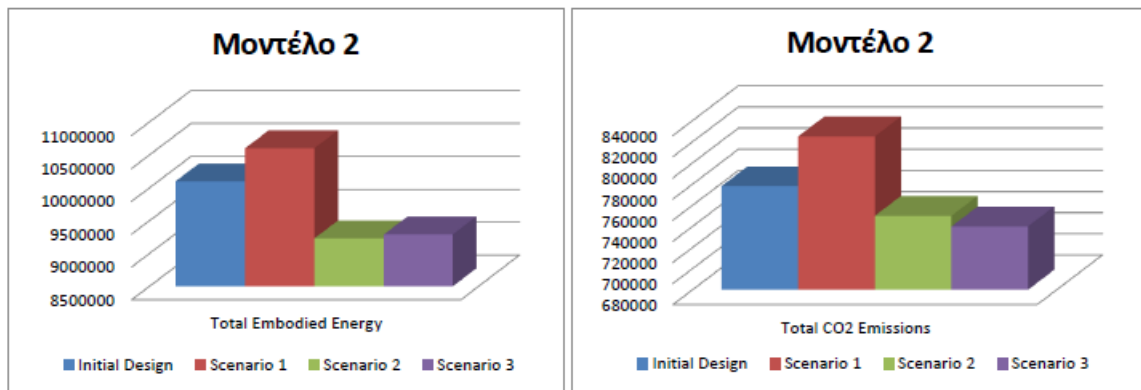
Materials	Αρχικός Σχεδιασμός Μοντέλο 3		Βελτιστοποιημένο Μοντέλο 3 Material Cost		Ποσοστά Βελτιστοποίησης		Βελτιστοποιημένο Μοντέλο 3		Ποσοστά Βελτιστοποίησης	
	EE (Mjoule)	CO2 (kg)	EE (Mjoule)	CO2 (kg)	EE (Mjoule)	CO2 (kg)	EE (Mjoule)	CO2 (kg)	EE (Mjoule)	CO2 (kg)
RConcrete 20/25 MPa	0	0	0	0	29.73%	29.73%	0	0	3.02%	3.02%
RConcrete 25/30 MPa	0	0	0	0			0	0		
RConcrete 28/35 MPa	1.13E+07	1.10E+06	7.94E+06	7.73E+05			1.10E+07	1.07E+06		
RConcrete 32/40 MPa	0.00E+00	0	0.00E+00	0			0	0		
steel	0	0	0	0			0	0		
Expanded Polystyrene	0	0	0	0	1.05%	1.53%	6.59E+05	2.42E+04	65.79%	74.10%
Cork	0	0	0	0			8.93E+04	0.00E+00		
Flax	0	0	0	0			0	0		
Polyurethane Flexible Foam	1.90E+06	7.55E+04	1.90E+06	7.55E+04			0	0		
Woodwool	0	0	0	0			0	0		
Mineral wool	0	0	0	0			0	0		
Glass wool	0	0	0	0			0	0		
Rockwool	2.89E+05	1.81E+04	2.66E+05	1.66E+04			0	0		
Ασβεστοτσιμ. 1800	9.53E+05	1.43E+05	8.63E+05	1.30E+05	7.01%	6.96%	1.06E+06	1.60E+05	2.05%	2.33%
Ασβεστοτσιμ. 1900	1.34E+05	2.06E+04	1.48E+05	2.27E+04			0	0		
Asphalt	4.58E+05	3.59E+03	4.58E+05	3.59E+03	0.00%	0.00%	4.58E+05	3.59E+03	0.00%	0.00%
Asphalt, 4% binder content	0	0	0	0			0	0		
Asphalt sheets	3.18E+04	1.06E+03	3.18E+04	1.06E+03			3.18E+04	1.06E+03		
General-Common Bricks	2.04E+06	1.56E+05	2.25E+06	1.72E+05	-10.11%	-10.11%	2.04E+06	1.56E+05	0.00%	0.00%
Ceramic Tiles	3.42E+06	2.11E+05	3.42E+06	2.11E+05	0.00%	0.00%	3.42E+06	2.11E+05	0.00%	0.00%
Clay Tiles	0	0	0	0			0	0		
Marble Tiles	2.09E+06	1.20E+05	2.09E+06	1.20E+05			2.09E+06	1.20E+05		
Natural Perite	2.66E+05	1.21E+04	2.66E+05	1.21E+04	0.00%	0.00%	2.66E+05	1.21E+04	0.00%	0.00%
Windows PVC framed	3.70E+05	1.89E+04	3.70E+05	1.89E+04	0.00%	0.00%	3.70E+05	1.89E+04	0.00%	0.00%

Πίνακας 6.8: Τελικά ποσοστά των τριών σεναρίων βελτιστοποίησης ανά υλικό της κατασκευής 3

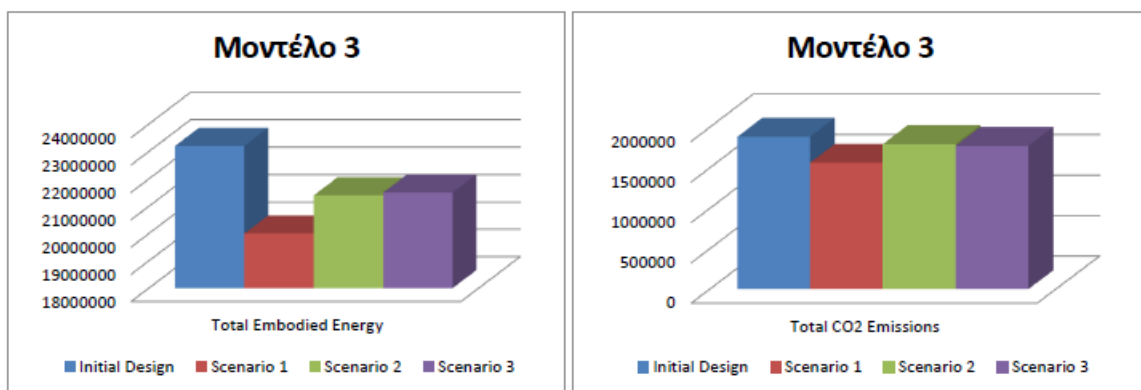
Συγκριτικά γραφήματα αποτελεσμάτων βελτιστοποιήσεων Για την καλύτερη κατανόηση των αποτελεσμάτων δημιουργήθηκαν τα παρακάτω γραφήματα (Σχήμα 6.6-6.8) τα οποία παρουσιάζουν τα ποσά της ενσωματωμένης ενέργειας (*EmbodiedEnergy*) και των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (*CO<sub>2</sub>Emissions*) για τα τρία κτιριακά μοντέλα, στα τέσσερα σενάρια που μελετήθηκαν. Ως *InitialDesign* ορίζεται ο αρχικός σχεδιασμός πριν τις βελτιστοποιήσεις. Το *Scenario1* αναφέρεται στη βελτιστοποίηση του κόστους των υλικών στην οποία πραγματοποιήθηκε αλλαγή στις διατομές φέροντα οργανισμού των δομικών στοιχείων, το *Scenario2* αναφέρεται στη βελτιστοποίηση με βάση το *EmbodiedEnergy* που χρησιμοποιήθηκαν ως κύριες μεταβλητές σχεδιασμού οι μονώσεις των κτιρίων και το *Scenario3* αφορά τη βελτιστοποίηση με βάση τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα και μεταβλητές σχεδιασμού κοινές με το *Scenario2*.



Σχήμα 6.6: Γράφημα αποτελεσμάτων βελτιστοποιήσεων Μοντέλου 1



Σχήμα 6.7: Γράφημα αποτελεσμάτων βελτιστοποιήσεων Μοντέλου 2



Σχήμα 6.8: Γράφημα αποτελεσμάτων βελτιστοποιήσεων Μοντέλου 3

**Παρατηρήσεις σχετικά με τις βελτιστοποιήσεις** Αρχικά παρατηρούμε ότι παρόλο που για τα υλικά των μονώσεων επιτυγχάνεται μια βελτιστοποίηση της τάξης του 65-70%, η τελική βελτιστοποίηση των μοντέλων μας ως προς τις καταναλώσεις ενέργειας και τις εκπομπές του διοξειδίου του άνθρακα είναι μόλις 5-8%. Από το γεγονός αυτό γίνεται αντιληπτή η μικρή επιρροή που έχουν στις περιβαλλοντικές επιπτώσεις των κτιρίων οι μονώσεις σε σύγκριση με αυτές του σκυροδέματος. Ωστόσο, αν και μικρότερες, δεν παύουν να είναι σημαντικές στα πλαίσια της προσπάθειας μείωσης του περιβαλλοντικού κόστους από όπου αυτό είναι δυνατό.

Επιπρόσθετα, στα μοντέλα 1 και 3 όπου με βάση την βελτιστοποίηση του κόστους των υλικών πραγματοποιήθηκε αισθητή μείωση των διατομών του φέροντα οργανισμού, τα ποσά των συνολικών εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα και της ενσωματωμένης ενέργειας των υλικών είναι μικρότερα από τα ποσά των αντίστοιχων βελτιστοποιήσεων. Εξαιρέση αποτελεί το Μοντέλο 1 όσον αφορά τις ενσωματωμένες ενέργειες. Εκεί ο συνδυασμός των υλικών μόνωσης που επιλέχθηκαν κατά τον αρχικό σχεδιασμό και κατ' επέκταση και στον σχεδιασμό με βάση το βέλτιστο κόστος υλικών ήταν κατά πολύ δυσμενέστερος σε σχέση με τις τελικές μονώσεις που επιλέχθηκαν στα άλλα δύο σενάρια βελτιστοποίησης. Τέλος, στο μοντέλο 2 στο οποίο, όπως προαναφέρθηκε, πραγματοποιήθηκε αύξηση των διατομών σκυροδέματος των δοκών, παρατηρούμε ότι υπήρξε και αύξηση της κατανάλωσης ενέργειας και των εκπομπών, πράγμα αναμενόμενο λόγω της αύξησης της ποσότητας οπλισμένου σκυροδέματος στην κατασκευή.

Παρατηρούμε επίσης ότι οι συνδυασμοί μεταβλητών μόνωσης που επιλέγει ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης ανάλογα με το είδος του (ως προς την απαιτούμενη ενέργεια ή τις εκπομπές του διοξειδίου), διαφέρουν. Αυτό με μία πρώτη ματιά δεν φαίνεται λογικό αν κάποιος απλά παρατηρήσει τα μονωτικά μας υλικά και τους συντελεστές επιβάρυνσης που τα συνοδεύουν (Πίνακας 5.1). Εύκολα διακρίνεται ότι τα θερμομονωτικά υλικά τα οποία είναι πολύ ενεργοβόρα κατά την παραγωγή τους έχουν και τις ψηλότερες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα. Για το λόγο αυτό στη βελτιστοποίηση με βάση τον ενεργειακό αντίκτυπο μειώνονται και οι εκπομπές του διοξειδίου του άνθρακα και αντίστοιχα στην βελτιστοποίηση των εκπομπών μειώνεται και η απαιτούμενη ενέργεια. Ωστόσο το γεγονός ότι δεν υπάρχει αυστηρή αναλογία στους δύο συντελεστές από υλικό σε υλικό καθώς και οι μεγάλες διαφορές στις πυκνότητες τους, δημιουργούν διαφορετικούς βέλτιστους συνδυασμούς υλικών κάθε φορά ανάλογα με το ποιος πληρεί καλύτερα το ζητούμενο αλλά και τους περιορισμούς.

**Προτάσεις για συνέχεια** Στην παρούσα διπλωματική οι τρεις βελτιστοποιήσεις έτρεξαν ανεξάρτητα η μία από την άλλη και κατέληξαν σε τρία διαφορετικά αποτελέσματα για το κάθε μοντέλο. Το επόμενο βήμα λοιπόν είναι να γίνει συγχώνευση αυτών των βελτιστοποιήσεων σε μία (multi-objective) προκειμένου να έχουμε τον βέλτιστο σχεδιασμό λαμβάνοντας υπόψιν τόσο το κόστος των υλικών όσο και τον περιβαλλοντικό τους αντίκτυπο και σε απαιτούμενη ενέργεια αλλά και σε εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα.

Όπως έχει αναφερθεί ήδη παραπάνω, βλέπουμε ότι όσον αφορά τον περιβαλλοντικό αντίκτυπο, το σκυρόδεμα έχει τεράστια επιρροή. Γνωρίζοντας όμως ότι είναι ένα σχεδόν αναντικατάστατο υλικό, πρέπει να βρεθεί διαφορετική λύση σε αυτό το πρόβλημα. Για αυτό το λόγο τον τελευταίο καιρό οι προσπάθειες παραγωγής οικολογικού σκυροδέματος, «green concrete», του οποίου οι επιπτώσεις στο περιβάλλον είναι μικρότερες, αυξάνονται συνεχώς και έχει ήδη ξεκινήσει η εισαγωγή του στην αγορά της κατασκευής. Καλό θα ήταν λοιπόν τέτοιου είδους σκυροδέματα να προστεθούν στην ήδη υπάρχουσα βιβλιοθήκη υλικών και να καταγραφούν οι αλλαγές που θα επιφέρει η εφαρμογή τους στα μοντέλα.

Τέλος στην παρούσα διπλωματική αγνοήθηκε εντελώς η φάση λειτουργίας. Καλό λοιπόν θα ήταν αυτή να συμπεριληφθεί, μόλις υπάρξουν τα αντίστοιχα απαιτούμενα δεδομένα. Μεγάλο ενδιαφέρον θα έχει, πέρα από την βελτιστοποίηση του μηχανολογικού εξοπλισμού, να γίνει μια αποτίμηση της ενεργειακής κλάσης του κτιρίου με βάση τον βέλτιστο σχεδιασμό όσον αφορά τα υλικά. Για να γίνει πιο κατανοητό τι εννοούμε με αυτό, για παράδειγμα θα μπορούσε ένας «χειρότερος» συνδυασμός υλικών να οδηγήσει σε καλύτερης ενεργειακής κλάσης κτίριο και αυτό να έχει ως αποτέλεσμα την αποδοτικότερη συμπεριφορά του κτιρίου κατά τη φάση λειτουργίας και συνεπώς καλύτερο περιβαλλοντικό αντίκτυπο σε βάθος χρόνου, δηλαδή καθ' όλη την διάρκεια του κύκλου ζωής του.

# Κεφάλαιο 7

## Βιβλιογραφία

Androulakis-e.gr. [online] Available at: <http://www.androulakis-e.gr>.

Arcmeletitiki.gr. Arc Μελετητική // Κεντρική Σελίδα. [online] Available at: <http://www.arcmeletitiki.gr>.

Asdrubali, F., Baldassarri, C. and Fthenakis, V. (2013). Life cycle analysis in the construction sector: Guiding the optimization of conventional Italian buildings. *Energy and Buildings*, 64, pp.73-89.

Atmaca, A. and Atmaca, N. (2015). Life cycle energy (LCEA) and carbon dioxide emissions (LCCO<sub>2</sub>A) assessment of two residential buildings in Gaziantep, Turkey. *Energy and Buildings*, 102, pp.417-431.

Baumann, H. and Tillman, A. (2004). *The hitch hiker's guide to LCA*.

Chau, C., Leung, T. and Ng, W. (2015). A review on Life Cycle Assessment, Life Cycle Energy Assessment and Life Cycle Carbon Emissions Assessment on buildings. *Applied Energy*, 143, pp.395-413.

Coello Coello, C., Lamont, G. and Van Veldhuizen, D. (2007). *Evolutionary Algorithms for Solving Multi-Objective Problems*. Boston, MA: Springer Science+Business Media, LLC.

Construction Material Report, Toolkit for carbon neutral development part 1. (n.d.). 1st ed. [ebook] Nicole lazarus, Bioregional development group. Available at: [http://www.energy-cities.eu/IMG/pdf/bedzed\\_construction\\_materials\\_report.pdf](http://www.energy-cities.eu/IMG/pdf/bedzed_construction_materials_report.pdf).

Dimoudi, A. and Tompa, C. (2008). Energy and environmental indicators related to construction of office buildings. *Resources, Conservation and Recycling*, 53(1-2), pp.86-95.

Google.com. (2016). Google. [online] Available at: <http://www.google.com>.

Guggemos, A. and Horvath, A. (2005). Comparison of Environmental Effects of Steel- and Concrete-Framed Buildings. *J. Infrastruct. Syst.*, 11(2), pp.93-101.

Haganatur.ch. Haga | Naturbaustoffe seit 1953. [online] Available at: <http://www.haganatur.ch>.

Inventory of Carbon & Energy (ICE) Version 2.0. (2011). 2nd ed. Sustainable Energy Research Team (SERT) Department of Mechanical Engineering University of Bath, UK.

Junnila, S. and Horvath, A. (2003). Life-Cycle Environmental Effects of an Office Building. *J. Infrastruct. Syst.*, 9(4), pp.157-166.

Kofoworola, O. and Gheewala, S. (2009). Life cycle energy assessment of a typical office building in Thailand. *Energy and Buildings*, 41(10), pp.1076-1083.

Lagaros, N. (2013). A general purpose real-world structural design optimization computing platform. *Struct Multidisc Optim*, 49(6), pp.1047-1066.

Matos, G. and Wagner, L. (1998). CONSUMPTION OF MATERIALS IN THE UNITED STATES, 1900–1995 1. *Annual Review of Energy and the Environment*, 23(1), pp.107-122.

Resource efficiency in the building sector, Final report. (2014). 1st ed. [ebook] ECORYS, Copenhagen Resource Institute. Available at: <http://ec.europa.eu/environment/eussd/pdf/Resource%20efficiency%20in%20the%20building%20sector.pdf>

Wikipedia.org. (2016). Wikipedia. [online] Available at: <http://www.wikipedia.org>.

Zabalza Bribián, I., Valero Capilla, A. and Aranda Usón, A. (2011). Life cycle assessment of building materials: Comparative analysis of energy and environmental impacts and evaluation of the eco-efficiency improvement potential. *Building and Environment*, 46(5), pp.1133-1140.



ΑΝΑΓΝΩΣΤΑΚΗ, Κ. (2015). ΒΕΛΤΙΣΤΟΣ ΔΟΜΙΚΟΣ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΤΙΡΙΩΝ. Προπτυχιακή διπλωματική εργασία. ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ, ΤΟΜΕΑΣ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΗΣ, ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΣΤΑΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΕΡΕΥΝΩΝ.

Ανέλιξη. Μη κερδοσκοπικός οργανισμός, οικολογική δόμηση, βιοκλιματικός σχεδιασμός. [online] Available at: <http://www.anelixi.org>.

Για την εξοικονόμηση ενέργειας στα κτίρια. Ενέργεια και Περιβάλλον στον κτιριακό τομέα. (2008). 1st ed. [ebook] Athens: ΣΑΤΕ. Available at: <http://www.sate.gr/nea/energy.pdf>.

Ergatex.gr. ΕΡΓΑΤΕΞ Α.Ε. - Βιομηχανία παραγωγής και εμπορίας μονωτικών υλικών και υλικών συσκευασίας με βάση τη Διογκωμένη Πολυστερίνη - EPS. [online] Available at: <http://www.ergatex.gr>.

ΚΟΥΡΑΒΑΝΑΣ, Δ. (2016). ΥΒΡΙΔΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕΤΑΕΥΡΕΤΙΚΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΠΥΓΟΛΑΜΠΙΔΑΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΑΝΑΖΗΤΗΣΗΣ ΑΡΜΟΝΙΑΣ ΓΙΑ ΕΠΙΛΥΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΩΝ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ. Μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία. ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ.

ΛΟΥΙΖΑ, Α. (2014). ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΟΙΚΟΔΟΜΙΚΩΝ ΕΡΓΑΣΙΩΝ. Προπτυχιακή διπλωματική εργασία. ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ, Τομέας Προγραμματισμού και Διαχείρισης Τεχνικών Έργων.

ΤΕΧΝΙΚΗ ΟΔΗΓΙΑ ΚΕΝΑΚ. (2012). ΑΘΗΝΑ: Υπουργείο περιβάλλοντος ενέργειας και κλιματικής αλλαγής Υ.Π.Ε.Κ.Α.

Tsakiroglou.gr. Χ. Τσακίρογλου Α.Ε. – Οικοδομικά, Θερμομονωτικά, Στεγανωτικά, Γυψοσανίδες, Οργανικοί Σοβάδες, Κόλλες Πλακιδίων, Χρώματα, Διακοσμητικά Βότσαλα, Επενδυτικά Διακοσμητικά. [online] Available at: <http://www.tsakiroglou.gr>.