ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών
Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών
«Παραγωγή και Διαχείριση Ενέργειας»
Ηρώων Πολυτεχνείου 9, 157 73, Ζωγράφου – 210-7723655 – epminfo@power.ece.ntua.gr

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«Ενσωματωμένη Ενέργεια & Ενσωματωμένο CO_2 Δομικών Υλικών»

«Embodied Energy & Embodied CO_2 of Building Materials»

Του Μεταπτυχιακού Φοιτητή

Ανυφαντάκη Γεώργιου

Επιβλέπουσα

Ειρήνη Κορωνάκη, Καθηγήτρια, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ

Αθήνα, Οκτώβριος, 2024

Δήλωση

Βεβαιώνω ότι η παρούσα εργασία είναι δική μου, δεν έχει συγγραφεί από άλλο πρόσωπο με ή χωρίς αμοιβή, δεν έχει αντιγραφεί από δημοσιευμένη ή αδημοσίευτη εργασία άλλου και δεν έχει προηγουμένως υποβληθεί για βαθμολόγηση στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο ή αλλού. Βεβαιώνω ότι είμαι εν γνώσει των κανόνων περί λογοκλοπής του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών και ότι στο πλαίσιο αυτού έχουν τηρηθεί όλοι οι κανόνες κατά την ακαδημαϊκή δεοντολογία, σχετικά με αναφορές, βιβλιογραφίες, κ.λ.π., τόσο από έντυπες όσο και από ηλεκτρονικές πηγές. Σε περίπτωση λογοκλοπής αποδέχομαι όλες ανεξαιρέτως τις ποινές που προβλέπουν οι εκάστοτε κανονισμοί του Ε.Μ.Π. και του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών.

Ημερομηνία: 06/10/2024

Ανυφαντάκης Γεώργιος

Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία με τίτλο «Ενσωματωμένη Ενέργεια & Ενσωματωμένο CO_2 δομικών υλικών», εκπονήθηκε από τον μεταπτυχιακό φοιτητή Ανυφαντάκη Γεώργιο στο πλαίσιο των υποχρεώσεων του για το ΔΠΜΣ Παραγωγή και Διαχείριση Ενέργειας κατά το ακαδημαϊκό έτος 2023-2024.

Πρώτα από όλα, θα ήθελα να ευχαριστήσω την επιβλέπουσα της μεταπτυχιακής μου εργασίας, την καθηγήτρια κα. Κορωνάκη Ειρήνη για την πολύτιμη βοήθεια και την καθοδήγηση της για την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής.

Θέλω επίσης να πω ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένειά μου, για την συμπαράσταση που μου παρείχε με κάθε τρόπο σε όλη την διάρκεια της φοιτητικής μου διαδρομής, και στους φίλους και συμφοιτητές που με στήριξαν σε κάθε προσπάθεια όλα αυτά τα χρόνια.

Περίληψη

Ο κατασκευαστικός κλάδος αποτελεί έναν από τους μεγαλύτερους καταναλωτές ενέργειας και πρώτων υλών συμβάλλοντας σημαντικά στις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου (GHGs). Οι εκπομπές CO_2 από την κατασκευή σκυροδέματος αντιπροσωπεύουν το 5% των GHGs παγκοσμίως, ενώ παράλληλα άλλα οικοδομικά υλικά όπως ο χάλυβας, το τούβλο και τα πολυμερή απαιτούν αρκετή ενέργεια για την κατασκευή τους καθώς τα ορυκτά και μεταλλεύματα που χρησιμοποιούνται σε αυτά, εξορύσσονται και ανακτώνται με ενεργοβόρες και δαπανηρές διαδικασίες από τη γη. Ο ενσωματωμένος άνθρακας αντιπροσωπεύει τους εκατομμύρια τόνους εκπομπών άνθρακα που απελευθερώνονται κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής των δομικών υλικών, συμπεριλαμβανομένης της εξόρυξης, της κατασκευής, της μεταφοράς και της διάθεσης. Το σκυρόδεμα, ο χάλυβας και τα μονωτικά υλικά αποτελούν παραδείγματα υλικών που συμβάλλουν στις ενσωματωμένες εκπομπές άνθρακα, αντιπροσωπεύοντας περίπου το 10% των παγκόσμιων GHGs. Δεδομένου αυτού του υψηλού ποσοστού κρίνεται επιτακτική η ανάγκη μείωσης του ενσωματωμένου άνθρακα για την απεξάρτηση των υλικών (και κατ'επέκταση των κτιρίων) από άνθρακα, καθώς η πλειονότητα των εκπομπών συμβαίνει πριν από τη φάση κατασκευής ενός κτιρίου. Για την αντιμετώπιση αυτού του ζητήματος, διεξάγονται έρευνες για την ανάπτυξη νέων τεχνολογιών και υλικών που ελαχιστοποιούν αυτό που είναι γνωστό ως «ενσωματωμένη ενέργεια» – το άθροισμα της ενέργειας που απαιτείται για την παραγωγή ενός υλικού, συμπεριλαμβανομένης της προμήθειας και της κατασκευής του – προκειμένου να γίνει η κατασκευή περισσότερο βιώσιμη και να μειωθεί το αποτύπωμα του άνθρακα παγκοσμίως.

Abstract

The construction industry is one of the largest consumers of energy and raw materials contributing significantly to greenhouse gas (GHG) emissions, while CO_2 emissions from concrete manufacturing account for 5% of global GHGs. Moreover, other building materials such as steel, brick and plastic require considerable amount of energy to manufacture, as the minerals and ores are mined and recovered with demanding and costly processes from land. Embodied carbon represents the millions of tons of carbon emissions released during the life cycle of building materials, including extraction, manufacturing, transportation and disposal. Concrete, steel and insulating materials are some examples of materials that contribute to embodied carbon emissions, accounting for approximately 10% of global GHGs. Given this high rate, the need to reduce embodied carbon is imperative to decarbonize materials, as most emissions occur before the construction phase of a building. The last couple of years, research has being conducted to develop new technologies and materials that minimize what is known as "embodied energy" – the sum of the energy required to produce a material, including its procurement and manufacture – in order to make manufacturing more sustainable and reduce the global carbon footprint.

Περιεχόμενα

Δήλωση ii

Ευχαριστίες iii

Περίληψη iv

Abstract v

Κατάλογος πινάκων ix

Κατάλογος σχημάτων x

Κατάλογος εικόνων xi

Αρκτικόλεξα xi

Εισαγωγή 1

1.Δομικά Υλικά 6

1.1 Ορισμός 6

1.2 Ταξινόμηση 6

1.3 Σκυρόδεμα 7

1.3.1 Δομή Σκυροδέματος 8

1.3.2 Ιδιότητες και Χαρακτηριστικά Σκυροδέματος 10

1.3.3 Οπλισμένο Σκυρόδεμα 13

1.3.4 Ιδιότητες και Χαρακτηριστικά Οπλισμένου Σκυροδέματος 13

1.4 Μέταλλα 15

1.4.1 Ιδιότητες και Χαρακτηριστικά Μετάλλων 16

1.4.2 Σίδηρος 18

1.4.3 Χάλυβας 18

1.4.4 Αλουμίνιο 21

1.4.5 Χαλκός 23

1.5 Ξύλο 23

1.5.1 Ιδιότητες και Χαρακτηριστικά Ξυλείας 24

1.5.2 Μορφές Δομικής Ξυλείας 26

1.6 Κεραμικά 28

1.6.1 Τύποι Δομικών Κεραμικών 28

1.6.2 Οπτόπλινθοι 29

1.6.3 Τύποι Τούβλων 30

1.7 Φυσικοί Λίθοι 31

1.7.1 Ιδιότητες Φυσικών Λίθων 31

1.7.2 Μειονεκτήματα Φυσικών Λίθων 33

1.8 Γυαλί 34

1.8.1 Ιδιότητες Γυαλιού 35

1.8.2 Μειονεκτήματα Χρήσης Γυαλιού 36

1.9 Πολυμερή 37

1.9.1 Ιδιότητες Πολυμερών 37

1.9.2 Εφαρμογές και Τύποι Πολυμερών 38

1.10 Οικολογικά υλικά 42

1.11 Τοξικά υλικά 43

2.Ενσωματωμένη Ενέργεια & Ενσωματωμένος Άνθρακας 45

2.1 Βιώσιμες Κατασκευές 45

2.2 Ενσωματωμένη Ενέργεια 47

2.3 Ενσωματωμένος Άνθρακας 50

2.4 Κύκλος Ζωής Δομικών Υλικών 51

2.5 Ενσωματωμένη Ενέργεια & CO_2 Δομικών Υλικών 55

2.5.2 Ενσωματωμένη Ενέργεια & CO_2 Χάλυβα 58

2.5.3 Ενσωματωμένη Ενέργεια & CO_2 Αλουμινίου 60

2.5.4 Ενσωματωμένη Ενέργεια & CO_2 Χαλκού 61

2.5.5 Ενσωματωμένη Ενέργεια & CO_2 Ξύλου 63

2.5.6 Ενσωματωμένη Ενέργεια & CO_2 Τούβλων 64

2.5.7 Ενσωματωμένη Ενέργεια & CO_2 Φυσικών Λίθων 65

2.5.8 Ενσωματωμένη Ενέργεια & CO_2 Γυαλιού 66

2.5.9 Ενσωματωμένη Ενέργεια & CO_2 Πολυμερών 68

2.5.10 Ενσωματωμένη Ενέργεια & CO_2 Οικολογικών Υλικών 69

3.Εργαλεία Προσδιορισμού Ενσωματωμένης Ενέργειας & CO_2 71

3.1 Αξιολόγηση Κύκλου Ζωής Δομικών Υλικών (LCA) 71

3.2 Λογισμικά Ανάλυσης Κύκλου Ζωής Υλικών 74

3.3 Περιβαλλοντικές Δηλώσεις Προϊόντων (EPD) 76

3.4 Μοντελοποίηση πληροφοριών κτιρίου (BIM) 77

3.5 Συστήματα Πιστοποίησης Πράσινων Κτιρίων 80

3.6 Οικολογική σήμανση 82

3.7 Λογιστικά Εργαλεία Άνθρακα 83
3.8 Μελέτη Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων 84
4. Υπολογισμός Ενσωματωμένης Ενέργειας & Ενσωματωμένου CO_2 86
4.1 Βάση Δεδομένων ICE 88
4.2 Αξιολόγηση Ενσωματωμένης Ενέργειας (ICE v2) 91
4.2.1 Αξιολόγηση Ενσωματωμένης Ενέργειας Σκυροδέματος 92
4.2.2 Αξιολόγηση Ενσωματωμένης Ενέργειας Χάλυβα 95
4.2.3 Αξιολόγηση Ενσωματωμένης Ενέργειας Αλουμινίου 98
4.2.4 Αξιολόγηση Ενσωματωμένης Ενέργειας Φυσικών Λίθων 101
4.2.5 Αξιολόγηση Ενσωματωμένης Ενέργειας Γυαλιού 102
4.2.6 Αξιολόγηση Ενσωματωμένης Ενέργειας Πολυμερών 104
4.2.7 Αξιολόγηση Ενσωματωμένης Ενέργειας Κεραμικών 106
4.2.8 Αξιολόγηση Ενσωματωμένης Ενέργειας Ξυλείας 107
4.3 Αξιολόγηση Ενσωματωμένου Άνθρακα (ICE v3) 109
4.3.1 Αξιολόγηση Ενσωματωμένου Άνθρακα Αδρανών 110
4.3.2 Αξιολόγηση Ενσωματωμένου Άνθρακα Τσιμέντου 112
4.3.3 Αξιολόγηση Ενσωματωμένου Άνθρακα Σκυροδέματος 114
4.3.4 Αξιολόγηση Ενσωματωμένου Άνθρακα Χάλυβα 117
4.3.5 Αξιολόγηση Ενσωματωμένου Άνθρακα Αλουμινίου 120
4.3.6 Αξιολόγηση Ενσωματωμένου Άνθρακα Γυαλιού 122
4.3.7 Αξιολόγηση Ενσωματωμένου Άνθρακα Κεραμικών 124
4.3.8 Αξιολόγηση Ενσωματωμένου Άνθρακα Ξυλείας 125
4.3.9 Αξιολόγηση Ενσωματωμένου Άνθρακα Πολυμερών 128
4.4 Επίδραση Πυκνότητας στον Ενσωματωμένο Άνθρακα 129
5. Συμπεράσματα 130
Ελληνική Βιβλιογραφία 135
Διεθνής Βιβλιογραφία 135
Ιστογραφία 136

Κατάλογος πινάκων

Πίνακας 1 : «Επίδραση διαφόρων μετάλλων στις ιδιότητες κραμάτων αλουμινίου» (Maguire, 1981)

Πίνακας 2 : «Μηχανικές ιδιότητες πολυμερών» (Τριανταφύλλου, 2013)

Πίνακας 3 : «Ενσωματωμένη ενέργεια τσιμέντου και άνθρακα με αντικατάσταση τσιμέντου με ιπτάμενη τέφρα» (circularecology.com/embodied-carbon-footprint-database.html)

Πίνακας 4 : ««Ενσωματωμένη ενέργεια και άνθρακας τσιμέντου με αντικατάσταση τσιμέντου με σκωρία υψικαμίνου» (circularecology.com/embodied-carbon-footprint-database.html)

Πίνακας 5 : «Υπολογισμός ενσωματωμένης ενέργειας και άνθρακα οπλισμένου σκυροδέματος» (circularecology.com/embodied-carbon-footprint-database.html)

Πίνακας 6 : «Υπολογισμός ενσωματωμένης ενέργειας και άνθρακα προκατασκευασμένου σκυροδέματος» (circularecology.com/embodied-carbon-footprint-database.html)

Πίνακας 7 : «Ενσωματωμένη ενέργεια και άνθρακα διαφορετικών τύπων χάλυβα» (circularecology.com/embodied-carbon-footprint-database.html)

Πίνακας 8 : «Ενσωματωμένη ενέργεια και άνθρακας αδρανών και αλουμινίου» (circularecology.com/embodied-carbon-footprint-database.html)

Πίνακας 9 : «Ενσωματωμένη ενέργεια και άνθρακας διάφορων τύπων πολυμερών» (circularecology.com/embodied-carbon-footprint-database.html)

Πίνακας 10 : «Ενσωματωμένη ενέργεια και άνθρακας διάφορων τύπων κεραμικών» (circularecology.com/embodied-carbon-footprint-database.html)

Πίνακας 11 : «Ενσωματωμένη ενέργεια και άνθρακας διάφορων τύπων δομικής ξυλείας» (circularecology.com/embodied-carbon-footprint-database.html)

Πίνακας 12 : «Ενσωματωμένη άνθρακας αδρανών» (circularecology.com/embodied-carbon-footprint-database.html)

Πίνακας 13 : «Ενσωματωμένος άνθρακας διάφορων τύπων τσιμέντου» (circularecology.com/embodied-carbon-footprint-database.html)

Πίνακας 14 : «Προσδιορισμός ενσωματωμένου άνθρακα τσιμέντου» (circularecology.com/embodied-carbon-footprint-database.html)

Πίνακας 15 : «Ενσωματωμένος άνθρακας συστατικών σκυροδέματος» (circularecology.com/embodied-carbon-footprint-database.html)

Πίνακας 16 : « Ενσωματωμένος άνθρακας εργασιών παραγωγής σκυροδέματος» (circularecology.com/embodied-carbon-footprint-database.html)

Πίνακας 17 : «Ενσωματωμένος άνθρακας πρωτογενούς και ανακυκλωμένου χάλυβα» (circularecology.com/embodied-carbon-footprint-database.html)

Πίνακας 18 : «Ενσωματωμένος άνθρακας και δέσμευση άνθρακα διάφορων τύπων ξυλείας» (circularecology.com/embodied-carbon-footprint-database.html)

Πίνακας 19 : «Ενσωματωμένος άνθρακας υλικών μετά την επίδραση πυκνότητας» (circularecology.com/embodied-carbon-footprint-database.html)

Κατάλογος σχημάτων

Σχήμα 1 : «Μερίδιο ενέργειας ανά τομέα» (Energy Information Administration, 2016)

Σχήμα 2 : «Χρυσή τομή βιωσιμότητας» (worldsteel.org/steel-by-topic/life-cycle-thinking)

Σχήμα 3 : «Ενσωματωμένη Ενέργεια Κτιρίου» (Murray Hall, 2014)

Σχήμα 4 : «Ποσοστά ενσωματωμένης και λειτουργικής ενέργειας κτιρίων κατοικιών, προς τη συνολική ενέργεια που καταναλώνουν, ανάλογα με την ενεργειακή τους απόδοση» (Chastas et al., 2016)

Σχήμα 5 : «Κύκλος ενσωματωμένου άνθρακα» (circularecology.com/embodied-carbon-footprint-database)

Σχήμα 6 : «Ενσωματωμένη ενέργεια τμημάτων κατασκευής κτιρίου» (Σαργέντης, 2014)

Σχήμα 7 : «Διάγραμμα ροής βάσης δεδομένων ICE» (Hammond & Jones, 2011)

Σχήμα 8 : «Ενσωματωμένη ενέργεια δομικών υλικών»

Σχήμα 9 : «Ποσοστό ενσωματωμένης ενέργειας τσιμέντου ανάλογα με την πηγή»

Σχήμα 10 : «Ενσωματωμένη ενέργεια σκυροδέματος»

Σχήμα 11 : «Ενσωματωμένη ενέργεια διαφορετικών τύπων χάλυβα»

Σχήμα 12 : «Ενσωματωμένη ενέργεια μετάλλων»

Σχήμα 13 : «Ενσωματωμένη ενέργεια διαφορετικών τύπων αλουμινίου»

Σχήμα 14 : «Ενσωματωμένη ενέργεια πρωτογενούς και ανακυκλωμένου αλουμινίου»

Σχήμα 15 : «Ποσοστό ενσωματωμένης ενέργειας αλουμινίου ανάλογα με την πηγή»

Σχήμα 16 : «Ενσωματωμένη ενέργεια φυσικών λίθων»

Σχήμα 17 : «Ποσοστό ενσωματωμένης ενέργειας φυσικών λίθων ανάλογα με την πηγή»

Σχήμα 18 : «Ενσωματωμένη ενέργεια διαφορετικών τύπου γυαλιού»

Σχήμα 19 : «Ποσοστό ενσωματωμένης ενέργειας γυαλιού ανάλογα με την πηγή»

Σχήμα 20 : «Ενσωματωμένη ενέργεια μονωτικών υλικών»

Σχήμα 21 : «Ενσωματωμένος άνθρακας διάφορων τύπων σκυροδέματος»

Σχήμα 22 : «Ενσωματωμένος άνθρακας σκυροδέματος RC 25/30 με διαφορετικές συστάσεις υλικών»

Σχήμα 23 : «Ενσωματωμένος άνθρακας διάφορων τύπων χάλυβα»

Σχήμα 24 : «Ενσωματωμένος άνθρακας διάφορων τύπων αλουμινίου»

Σχήμα 25 : «Ενσωματωμένος άνθρακας διάφορων τύπων αλουμινίου σε παγκόσμια και ευρωπαϊκή κλίμακα»

Σχήμα 26 : «Ενσωματωμένος άνθρακας διάφορων τύπων γυαλιού»

Σχήμα 27 : «Ενσωματωμένος άνθρακας διάφορων τύπων κεραμικών προϊόντων»

Σχήμα 28 : «Ενσωματωμένος άνθρακας διάφορων τύπων πολυμερών»

Κατάλογος εικόνων

Εικόνα 1 : «Είδη κατασκευών και χρήσεις σκυροδέματος με ποσοστά (cement.org)

Εικόνα 2 : «Στόχοι της αειφόρου ανάπτυξης» (sbcgreece.org)

Εικόνα 3 : «Κύκλος ζωής δομικών υλικών» (Σαργέντης, 2014)

Εικόνα 4 : «Στάδια ζωής του κύκλου ζωής των κτιρίων» (S.Bastianoni et al., 2006)

Εικόνα 5 : «Ανάπτυξη ενός EDP» (www.getgreenbadger.com)

Εικόνα 6 «Πρώτες ύλες για την παραγωγή τσιμέντου» (Κ. Τσακαλάκης, 2010)

Αρκτικόλεξα

ΑΚΖ: Ανάλυση Κύκλου Ζωής

ΑΠΕ: Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

ΜΠΕ: Μελέτη Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων

BF-BOF: Blast Furnace-Basic Oxygen Furnace

BIM: Building Information Modeling

BRE: Building Research Establishment

BREEAM: Building Research Establishment Environmental Assessment Method

CAMC: Carbon Matrix Composites

DfE: Design for Environment

EAF: Electric Arc Furnace route

EOL: End of Life

EPD: Environmental Product Declaration

EPEAT: Electronic Product Environmental Assessment Tool

EU: European Union

FRP: Fiber Reinforced Plastics

GGBs: Ground Granulated Blast-furnace Slag

GHGs: Green House Gases

ICE: Inventory of Carbon and Energy

IEA: International Energy Agency

IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change

ISO: International Organization for Standardization

LCA: Life Cycle Assessment

LEED: Leadership in Energy and Environmental Design

PMC: Polymer Matrix Composites

USGBC: United States Green Building Council

UF: Urea-Methanal (Ουρία-Φορμαλδεΰδη/Μεθανάλη)

Εισαγωγή

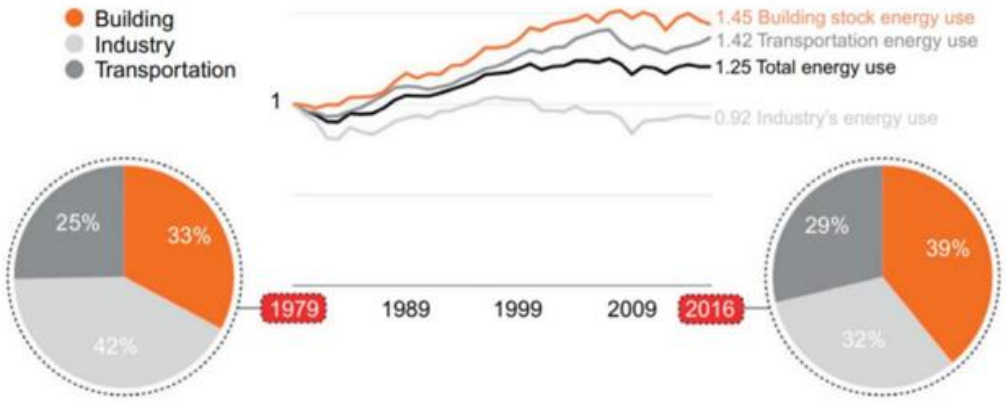
Η σύγχρονη οικονομία μεταβάλλεται με ταχύτατους ρυθμούς και οι ανάγκες για νέα προϊόντα και τεχνολογίες είναι μεγάλη, ταυτόχρονα η κοινωνία έρχεται αντιμέτωπη με την συνεχόμενη ανάπτυξη της τεχνολογίας, την δημιουργία νέων αναγκών και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις των επιλογών που λαμβάνονται. Σε αυτό το πλαίσιο, οι δραστηριότητες που καταναλώνουν υψηλές ποσότητες ενέργειας και εκπέμπουν ρύπους έρχονται στο μικροσκόπιο εξετάζοντας την βελτιστοποίηση τους ή ακόμα και τον περιορισμό της παραγωγικής τους διαδικασίας με σκοπό την μείωση του οικολογικού τους αποτυπώματος. Το οικολογικό αποτύπωμα αποτελεί ένα μέτρο ζήτησης και κατανάλωσης για την κάλυψη των αναγκών ενός κοινωνικού συνόλου, λαμβάνοντας υπόψιν τους καταναλισκόμενους πόρους, τον τρόπο ζωής, τα απορρίμματα και τις παραγόμενες εκπομπές για την κάλυψη των αναγκών της κοινωνίας.

Οι περισσότερες χώρες καθώς και πολυάριθμοι παγκόσμιοι οργανισμοί, λαμβάνοντας υπόψιν περιβαλλοντικούς και κοινωνικούς παράγοντες, έχουν θέσει ως πρωταρχικό στόχο τη χάραξη κοινής πολιτικής στρατηγικής για μια βιώσιμη και πράσινη ανάπτυξη μέσω της μείωσης των εκπομπών άνθρακα και άλλων επιβλαβών αερίων για να περιοριστεί το παγκόσμιο οικολογικό αποτύπωμα των κατασκευών. Αυτό επιτυγχάνεται με μια σειρά ενεργειών όπως είναι η ένταξη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο ενεργειακό μοντέλο κάθε χώρας, η χρήση οικολογικών υλικών, η βελτιστοποίηση του εξοπλισμού και της παραγωγικής διαδικασίας, η επιλογή πράσινων καυσίμων και η ανακύκλωση υλικών και προϊόντων. Ωστόσο, είναι σκόπιμο να αναφερθεί ότι η επιλογή των κατάλληλων μέτρων αντιμετώπισης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τον εξεταζόμενο τομέα παραγωγής ρύπων.

Σήμερα, ο κατασκευαστικός κλάδος αποτελεί ένα από τους κυριότερους καταναλωτές ενέργειας συμβάλλοντας σημαντικά στην αύξηση των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου (GHGs, Green House Gases). Το σύνολο των εργασιών στον κατασκευαστικό τομέα περιλαμβάνει την εξόρυξη και παραγωγή δομικών υλικών, την επεξεργασία για βελτίωση των ιδιοτήτων τους, τη μεταφορά και την ενσωμάτωση τους στην κατασκευή, τη συντήρηση για όλο τον κύκλο ζωής του έργου, μέχρι και την ανακύκλωση ή απόρριψη τους στο περιβάλλον. Πλέον γίνεται περισσότερο κατανοητό ότι ο κύκλος εργασιών είναι μεγάλος και η κατανάλωση

ενέργειας για τις συγκεκριμένες δραστηριότητες είναι πολλαπλάσια, όμως αυτό που πραγματικά έχει μείζονα σημασία είναι οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις και οι παραγόμενοι ρύποι.

Συγκεκριμένα, έρευνες έχουν δείξει ότι η κατανάλωση ενέργειας στον κτιριακό τομέα θα συνεχίσει να αυξάνεται περίπου 1.5% κάθε χρόνο, από το 2012 μέχρι το 2040 (Conti et al, 2016), ενώ παράλληλα λαμβάνοντας υπόψιν την κλιματική αλλαγή και τους ρυθμούς ανάπτυξης το Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) αλλά και η International Energy Agency (IEA) εκτιμούν ότι η ενεργειακή κατανάλωση των κτιρίων είναι πιθανό να υπερδιπλασιαστεί μέχρι το 2050. Ειδικότερα, στην Ευρωπαϊκή Ένωση ο κτιριακός τομέας αντιστοιχεί στο 39% της συνολικής ενεργειακής κατανάλωσης από το 33% που ήταν την δεκαετία του 80', ενώ στην Ελλάδα το ποσοστό κατανάλωσης του κτιριακού τομέα ανέρχεται στο 37% (Τσανούλας, 2022).



Σχήμα 29 : «Μερίδιο ενέργειας ανά τομέα» (Energy Information Administration, 2016)

Για τους παραπάνω λόγους, η επιλογή των κατάλληλων δομικών υλικών είναι ιδιαίτερα σημαντική τόσο για τον περιορισμό των περιβαλλοντικών κινδύνων όσο και για την βιωσιμότητα των κατασκευών και ιδιαίτερα των κτιρίων. Η ορθή επιλογή προαπαιτεί επιστημονικές και τεχνικές γνώσεις, πρωτίστως για την επάρκεια των πρώτων υλών αλλά και για την συνολικά καταναλισκόμενη ενέργεια κατά τον συνολικό κύκλο ζωής των υλικών. Επίσης, είναι ωφέλιμο να προσδιορίζονται η τοξικότητα των υλικών και η αντοχή τους στο χρόνο, οι απαιτούμενες ανάγκες συντήρησης και η δυνατότητα ανακύκλωσης και επαναχρησιμοποίησης τους. Τα δομικά υλικά που χρησιμοποιούνται στα κτίρια ποικίλουν ανάλογα με το κόστος, τη διαθεσιμότητα των πρώτων υλών καθώς και τους στόχους του έργου, όμως πλέον λαμβάνονται υπόψιν τόσο οι προσδιδόμενες ιδιότητες των δομικών υλικών όσο και η εναρμονισμένη με το περιβάλλον δόμηση. Η τελευταία απαιτεί περιβαλλοντικά αποδεκτό σχεδιασμό υλικών

προϊόντων, όπου θα ενσωματώνονται ανακυκλώσιμα υλικά και θα διαχωρίζονται σύνθετα προϊόντα σε επιμέρους απλούστερα υλικά, τα οποία θα μπορούν να χρησιμοποιηθούν εκ νέου.

Παράλληλα, κατά το στάδιο παραγωγής δομικών υλικών κρίνεται σκόπιμο να περιοριστούν τα απορρίμματα, να μειωθεί η δαπανούμενη ενέργεια και να κατασταλούν οι τοξικές ουσίες που χρησιμοποιούνται για βελτίωση των ιδιοτήτων των δομικών υλικών, έτσι ώστε να μειωθούν οι εκπομπές και το περιβαλλοντικό αποτύπωμα. Συνάμα, η διανομή των δομικών υλικών πρέπει να γίνεται με γνώμονα την μείωση των ρύπων, μέσω της χρήσης οικολογικών μέσων μεταφοράς χαμηλών εκπομπών και μικρής κατανάλωσης ενέργειας, ενώ οι μέθοδοι και οι εργασίες κατασκευής και εφαρμογής δεν πρέπει να επιβαρύνουν το περιβάλλον. Συνολικά, η παραγωγή, η διαχείριση και η μεταφορά δομικών υλικών συνδέονται άμεσα με την κατανάλωση ενέργειας και την εκπομπή αερίων CO_2 και GHGs. Επομένως, κρίνεται σκόπιμο να μελετηθούν περαιτέρω οι ιδιότητες και τα οφέλη των οικοδομικών υλικών, να προταθούν και να εφαρμοστούν οι πλέον κατάλληλες μέθοδοι παραγωγής και επεξεργασίας των πρώτων υλών και να γίνει αξιολόγηση των παραμέτρων πριν την τελική επιλογή.

Μια ακόμη παράμετρος που πρέπει να εξετάζεται είναι η επίδραση των δομικών υλικών στην ποιότητα του εσωτερικού αέρα των κτιρίων, τα οποία επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό την υγεία των κατοίκων και των χρηστών. Μερικά από τα προβλήματα που αντιμετωπίζουν λόγω της κακής ποιότητας αέρα είναι η προσβολή του αναπνευστικού συστήματος, πονοκέφαλοι, δερματικές παθήσεις και ναυτίες. Η ύπαρξη ατμοσφαιρικών ρύπων εντός κτιρίου λόγω τοξικών υλικών (π.χ. αμίαντος) έχει ως αποτέλεσμα τα παραπάνω καθώς η ποιότητα του αέρα είναι χαμηλή και η περιεκτικότητα σε οξυγόνο είναι κάτω από τα επιθυμητά επίπεδα. Η εσωτερική αυτή ρύπανση αποτελεί ένα ιδιαίτερα σημαντικό κεφάλαιο στην ενσωματωμένη ενέργεια και CO_2 των δομικών υλικών που χρησιμοποιούνται στην κατασκευαστική βιομηχανία, καθώς η σύσταση, ο τύπος και τα χαρακτηριστικά των υλικών μπορούν να εκλύουν αέρια ή σωματίδια, αυξάνοντας τον ρυθμό ανάπτυξης ρύπων και ταυτόχρονα μειώνοντας την ποιότητα του αέρα εντός του κτιρίου. Τέτοια παραδείγματα υλικών αποτελούν ορισμένα είδη πέτρας και μετάλλων, κάποιες μορφές κονιαμάτων και ποικίλα συνδετικά υλικά όπου δεν ελέγχεται η σύσταση τους.

Ένα από τα κύρια χαρακτηριστικά των δομικών υλικών είναι ότι καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό την θερμική συμπεριφορά των κτιρίων και επηρεάζουν το εξωτερικό περιβάλλον. Ως εκ τούτου πρέπει να ικανοποιούν τεχνολογικά, οικονομικά και αισθητικά κριτήρια χωρίς όμως να

παραλείπονται ο περιορισμός των επιβλαβών ρύπων και η εξασφάλιση της μικρότερης δυνατής επιβάρυνσης της υγείας και ασφάλειας των εργατών και των χρηστών. Ο προβληματισμός της διεθνούς επιστημονικής κοινότητας έγκειται στη δυσκολία συνδυασμού των παραπάνω παραγόντων, διότι η ικανοποίηση του ενός αποτελεί τροχοπέδη για τον άλλο. Έρευνες έχουν δείξει ότι πολλά δομικά υλικά με αξιόλογες ιδιότητες που προκύπτουν μετά από χημικές διαδικασίες, παρουσιάζουν δυσμενείς περιβαλλοντικές συνέπειες, υποβαθμίζουν την ποιότητα του εσωτερικού αέρα του κτιρίου και ευθύνονται για τον σύνδρομο των άρρωστων κτιρίων επιβαρύνοντας την υγεία των κατοίκων.

Η προσπάθεια μείωσης του χρόνου και του κόστους της κατασκευής σε συνδυασμό με την ανάγκη για εξοικονόμηση ενέργειας και την άγνοια των επιπτώσεων των δομικών υλικών, οδήγησαν σε κατασκευές όπου οι εσωτερικοί ρύποι είναι μεγαλύτεροι από τους αντίστοιχους ρύπους εκτός κτιρίων. Παράλληλα, η καθιέρωση και η εφαρμογή συνθετικών υλικών αφενός μεν διευκόλυνε την κατασκευή, αφετέρου δε αύξησε τη συγκέντρωση οργανικών ενώσεων στην ατμόσφαιρα. Τα αίτια της εσωτερικής ρύπανσης κατηγοριοποιούνται σε χημικά, βιολογικά και φυσικά αίτια. Τα χημικά αίτια αφορούν κυρίως συνθετικά υλικά και ρητίνες που χρησιμοποιούνται ως συγκολλητικές ουσίες, με πιο γνωστή την ουρία-φορμαλδεΰδη (UF). Η συγκεκριμένη ουσία αποτελεί μια καρκινογόνα πτητική οργανική ένωση η οποία εμπεριέχεται σε ρητίνες που χρησιμοποιούνται σε μονωτικά υλικά και άλλα συνθετικά προϊόντα, όπως είναι οι ινοσανίδες, το κόντρα πλακέ και οι μοριοσανίδες (νοβοπάν). Σχετικά με τα φυσικά αίτια που επηρεάζουν την εσωτερική ρύπανση, σε αυτά συγκαταλέγονται ο βαθμός ιονισμού του αέρα εντός κτιρίων, η θερμοκρασία και η υγρασία ενώ τέλος στα βιολογικά αίτια ανάπτυξης ρύπων συμπεριλαμβάνονται διάφοροι μικροοργανισμοί και βακτήρια.

Μια πληθώρα κατασκευαστικών υλικών και συνθετικών ενώσεων παρουσιάζει τοξικότητα κατά την παραγωγή και την εφαρμογή τους στην τελική κατασκευή. Ο όρος αυτός αναφέρεται στην ιδιότητα που έχουν τα υλικά να εμπεριέχουν ενώσεις ή ουσίες που επηρεάζουν δυσμενώς το επίπεδο του εσωτερικού αέρα στα κτίρια και κατ'επέκταση την υγεία των χρηστών. Χαρακτηριστικά παραδείγματα τέτοιων υλικών είναι οι βαφές και τα χρώματα, που εμπεριέχουν πτητικές οργανικές ενώσεις, οι ξύλινες κατασκευές που εμπεριέχουν στη σύσταση τους φορμαλδεΰδη, τα πετροχημικά που συνοδεύουν πολλά πλαστικά, μονωτικά, ρητίνες και

συγκολλητικές ενώσεις καθώς και υλικά με καρκινογόνο δράση που δεν χρησιμοποιούνται πλέον όπως ο αμίαντος.

Παράλληλα με την τοξικότητα των υλικών, μια ακόμη παράμετρος που εξετάζεται εκτενώς στο παρών κείμενο είναι η ενσωματωμένη ενέργεια που παρουσιάζουν τα οικοδομικά υλικά, δηλαδή το άθροισμα της ενέργειας που απαιτείται για την παραγωγή ενός υλικού συμπεριλαμβανομένης της προμήθειας, κατασκευής και εφαρμογής του. Όσο μεγαλύτερη παρουσιάζεται η ενσωματωμένη ενέργεια τόσο περισσότεροι ενεργειακοί πόροι έχουν καταναλωθεί, ενώ το οικολογικό αποτύπωμα είναι εντονότερο, καθώς εκπέμπονται μεγάλες ποσότητες CO_2 και λοιπών ρύπων. Επομένως, για την αντιμετώπιση αυτού του ζητήματος, διεξάγονται έρευνες για την ανάπτυξη νέων τεχνολογιών και οικολογικών υλικών που ελαχιστοποιούν τις εκπομπές άνθρακα και την τάξη της ενσωματωμένης ενέργειας των υλικών.

Για τους παραπάνω λόγους, ο σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι ο προσδιορισμός της ενσωματωμένης ενέργειας και του ενσωματωμένου άνθρακα των δομικών υλικών που χρησιμοποιούνται εκτενώς στις κατασκευές, αφού πρώτα γίνει η καταγραφή και η ανάλυση των χαρακτηριστικών τους. Έτσι, η εργασία για να πραγματοποιήσει τον στόχο της διαρθρώνεται σε πέντε κεφάλαια. Στο πρώτο κεφάλαιο αποτυπώνεται η εννοιολογική σημασία και η ταξινόμηση των δομικών υλικών, αναλύοντας τα χαρακτηριστικά του κάθε υλικού έτσι ώστε η επιλογή τους στις κατασκευές να γίνεται με συνετό, βιώσιμο και τεκμηριωμένο τρόπο. Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στις βιώσιμες κατασκευές, αναλύοντας τους όρους της «ενσωματωμένης ενέργειας» και του «ενσωματωμένου άνθρακα» και προσδιορίζοντας το μέγεθος τους για τα πιο κοινά δομικά υλικά. Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζονται, συγκρίνονται και αξιολογούνται τα σημαντικότερα εργαλεία περιβαλλοντικής διαχείρισης, ενώ δίνεται έμφαση στην Ανάλυση Κύκλου Ζωής (ΑΚΖ) των δομικών υλικών. Ακολούθως, στο τέταρτο κεφάλαιο προσδιορίζονται και ποσοτικοποιούνται τα παραπάνω μεγέθη από διαθέσιμες βάσεις δεδομένων ενώ στο πέμπτο και τελευταίο κεφάλαιο συνοψίζονται τα σημαντικότερα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας και εξάγονται δόκιμα συμπεράσματα για την επιλογή των κατάλληλων δομικών υλικών στις κατασκευές και τον περιορισμό των εκπομπών άνθρακα και της συνολικά καταναλισκόμενης ενέργειας των κατασκευών.

1.Δομικά Υλικά

1.1 Ορισμός

Τα δομικά υλικά αποτελούν υλικά τα οποία είτε υπάρχουν αυτούσια στην φύση ή προϊόντα που έχουν προέλθει από εξόρυξη, κατεργασία και επεξεργασία φυσικών πόρων από τεχνικά μέσα και χρησιμοποιούνται σε δομικές κατασκευές, δηλαδή κατασκευαστικά έργα που ικανοποιούν ανθρώπινες ανάγκες. Τα υλικά αυτά εμφανίζουν μεγάλη ποικιλομορφία και μπορούν να ταξινομηθούν ανάλογα με την χημική τους σύσταση, τις ιδιότητες, το εύρος εφαρμογής, την αυτοδιάθεση και την παλαιότητα τους (Τριανταφύλλου, 2013).

1.2 Ταξινόμηση

Ο διαχωρισμός των οικοδομικών υλικών όπως προαναφέρθηκε, εξαρτάται από πολλούς παράγοντες και έχει πολλές κατηγοριοποιήσεις, ωστόσο καθορίζεται από την επιστημονική σκοπιά της εκάστοτε προσέγγισης και μελέτης των υλικών. Έτσι, τα δομικά υλικά μπορούν να διαχωριστούν σε φυσικά ή τεχνητά, ανάλογα με το αν συναντώνται αυτοτελώς στην φύση ή απαιτούν τεχνικά μέσα για την παραγωγή τους. Μπορούν επίσης να ταξινομηθούν σε παραδοσιακά (τούβλα, ξύλο, πέτρα) και νεότερα (τσιμέντο, χάλυβας, μονωτικά υλικά) ανάλογα με την περίοδο που χρησιμοποιήθηκαν για πρώτη φορά. Επιπλέον, συχνή είναι η διάκριση τους με κριτήριο τις ιδιότητες των υλικών, έτσι προκύπτουν οι επιμέρους κατηγορίες των κεραμικών (σκυροδέματα, πλίνθοι, γυαλιά), των μετάλλων (χάλυβας, αλουμίνιο, κράματα μετάλλων), των πολυμερών (ρητίνες, πολυουρεθάνη) και σύνθετων υλικών που αποτελούν συνδυασμό των υπολοίπων κατηγοριών (Τριανταφύλλου, 2013).

Ωστόσο, σε πολλές μελέτες έχει επικρατήσει η κατηγοριοποίηση των υλικών να γίνεται με κριτήριο τα χημικά χαρακτηριστικά και τις λειτουργίες που χαρακτηρίζουν τα υλικά εστιάζοντας στις πρώτες ύλες που τα σχηματίζουν. Με βάση το συγκεκριμένο κριτήριο διαχωρισμού, τα οικοδομικά υλικά κατατάσσονται σε τρεις μεγάλες κατηγορίες υλικών οι οποίες είναι τα οργανικά υλικά, τα ανόργανα υλικά και τα σύνθετα-τεχνητά υλικά (H.Zhang, 2011). Στα οργανικά υλικά συγκαταλέγονται το ξύλο, τα πλαστικά, τα ασφαλτικά και άλλα πετρελαιοχημικά υλικά, ενώ στα ανόργανα οικοδομικά υλικά συναντάμε μέταλλα (χάλυβας, χαλκός, αλουμίνιο, κράματα μετάλλων), μεταλλοειδή (φυσικοί λίθοι, τσιμέντο, γυαλί) καθώς και τον συνδυασμό των δυο, όπως είναι το οπλισμένο σκυρόδεμα. Τέλος, τα σύνθετα-τεχνητά υλικά

που αποτελούν προϊόντα συνδυασμού δυο υλικών με διαφορετικές χημικές και φυσικές ιδιότητες, χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο για να προσδώσουν ή να βελτιώσουν συγκεκριμένα χαρακτηριστικά και ιδιότητες κάποιου υλικού. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν ο υαλοβάμβακας, τα FRP (Fiber Reinforced Plastics), τα CAMC (Carbon Matrix Composites), τα PMC (Polymer Matrix Composites) και ορισμένα ακόμα υλικά.

Τα κύρια δομικά υλικά που χρησιμοποιούνται σε κατασκευαστικά έργα μπορεί να ποικίλουν ανάλογα με παράγοντες όπως η τοποθεσία, το κλίμα, ο τύπος του κτιρίου και ο προϋπολογισμός. Ωστόσο, οι περισσότερες κατασκευές παγκοσμίως περιλαμβάνουν οικοδομικά υλικά όπως το σκυρόδεμα, ο χάλυβας, το ξύλο, οι οπτόπλινθοι, οι φυσικοί λίθοι, το γυαλί και ορισμένα πολυμερή (Mishra G., 2012).

1.3 Σκυρόδεμα

Το σκυρόδεμα αποτελεί το πιο διαδεδομένο δομικό υλικό και χρησιμοποιείται ευρέως σε παγκόσμια κλίμακα, με την ετήσια παγκόσμια κατανάλωση του να κυμαίνεται περίπου στους 30 δισεκατομμύριους τόνους. Η ευρεία χρήση του σκυροδέματος οφείλεται στον ευνοϊκό συσχετισμό του κόστους και των προσδιδόμενων χαρακτηριστικών που προσφέρει στην κατασκευή. Το κόστος του κυμαίνεται ακόμη και σήμερα σε χαμηλά επίπεδα σε σύγκριση με άλλα οικοδομικά υλικά λόγω της μεγάλης και άμεσης διαθεσιμότητας των επιμέρους υλικών που το αποτελούν (π.χ. αδρανή).

Όσον αφορά τις ιδιότητες του, το σκυρόδεμα παρουσιάζει μεγάλη ανθεκτικότητα στον χρόνο και σε περιβαλλοντικές επιδράσεις ενώ χαρακτηρίζεται από την υψηλή θλιπτική του αντοχή. Αξιοσημείωτο είναι δε, ότι το άοπλο σκυρόδεμα παρουσιάζει σχετικά μικρή αντοχή προς τον εφελκυσμό, ωστόσο με την προσθήκη οπλισμών στην δομή του αυξάνεται σημαντικά και η εφελκυστική του αντοχή. Ακόμη πρέπει να σημειωθεί ότι παρουσιάζει πολύ καλή συμπεριφορά με το νερό και χρησιμοποιείται σε κατασκευές που διαμορφώνονται με μεγάλη ποικιλία σχημάτων και μεγεθών (Τριανταφύλλου, 2013).

Ωστόσο, όταν η παραγωγή του δεν γίνεται με βάση διεθνή πρότυπα και οδηγίες κρίνεται ενεργοβόρα εξαιτίας της υπερβολικής επεξεργασίας των πρώτων υλών, την έκλυση υψηλών θερμοκρασιών και την εκπομπή αερίων που απαιτείται για την παραγωγή τσιμέντου. Η ενσωματωμένη ενέργεια του τσιμέντου θεωρείται υψηλή συγκριτικά με άλλα δομικά υλικά, και

αυτό έχει ως συνέπεια να αυξάνεται και το ενεργειακό περιεχόμενο του σκυροδέματος. Ωστόσο, αυτό εξαρτάται κυρίως από τα πρόσθετα που χρησιμοποιούνται κατά την επεξεργασία του, τις αποστάσεις διανομής καθώς και από την περιεκτικότητα του σε τσιμέντο και αδρανή.

Εικόνα 7 : «Είδη κατασκευών και χρήσεις σκυροδέματος με ποσοστά» (cement.org)

1.3.1 Δομή Σκυροδέματος

Το σκυρόδεμα αποτελεί ένα ανομοιογενές και περίπλοκο υλικό και στοιχεία όπως ο τύπος, το σχήμα, το μέγεθος και η διάκριση των φάσεων κατά την παραγωγή του είναι δύσκολο να προσδιοριστούν. Τα κύρια υλικά του σκυροδέματος είναι το τσιμέντο, τα αδρανή, το νερό και διάφορα πρόσμικτα όπως είναι οι ρευστοποιητές, οι επιβραδυντές, οι επιταχυντές και οι χρωστικές, οι οποίες βελτιώνουν κάποιες από τις ιδιότητες του.

Τα αδρανή αποτελούν το μεγαλύτερο μέρος του σκυροδέματος κατ' όγκο και προσδίδουν αντοχή και σταθερότητα στο μείγμα, ενώ παρουσιάζουν ποικίλα σχήματα και μεγέθη και διακρίνονται σε λεπτόκοκκα (άμμος) και χονδρόκοκκα (σκύρα, χαλίκια) ανάλογα με το μέγεθος των κόκκων τους. Τα τελευταία παρέχουν τις απαιτούμενες μηχανικές ιδιότητες του σκυροδέματος, όπως είναι η αντοχή σε θλίψη και η ανθεκτικότητα ενώ παράλληλα προσδίδουν τον απαραίτητο όγκο. Τουναντίον, τα λεπτόκοκκα συμβάλλουν στην εργασιμότητα και την

συνοχή του μείγματος, γεμίζοντας τα κενά μεταξύ των αδρανών και του τσιμεντοπολτού, που αποτελεί το προϊόν της αντίδρασης νερού και τσιμέντου.

Μαζί με τα αδρανή, το τσιμέντο αποτελεί ένα πολύ σημαντικό υλικό για την τελική σύσταση του σκυροδέματος καθώς συγκρατεί τα αδρανή μαζί δρώντας ως συνδετικό υλικό. Το τσιμέντο αποτελεί ένα ανόργανο υλικό (σκόνη) που όταν αναμειγνύεται με νερό σχηματίζει ένα παχύρευστο μείγμα, τον τσιμεντοπολτό, ο οποίος σταδιακά στερεοποιείται μέσω αντιδράσεων και διεργασιών ενυδάτωσης. Η παρασκευή του ξεκινάει με την άλεση ορυκτών (αργιλικών, ασβεστολιθικών) και ακολούθως με τη θέρμανση του μείγματος σε υψηλές θερμοκρασίες για την παραγωγή κλίνκερ (materialproperties.org, 2023).

Στη παγκόσμια βιομηχανία χρησιμοποιείται ως επί το πλείστον το τσιμέντο Portland, το οποίο ταξινομείται σε διάφορους τύπους και κατηγορίες, ανάλογα με τη σύνθεση, την αντοχή, τον βαθμό άλεσης και τα πρόσθετα υλικά. Συνεπώς, με βάση τη σύνθεσή τους τα τσιμέντα διακρίνονται σε τύπου I (Τσιμέντο Portland), τύπου II (Τσιμέντο Portland με ποζολάνες), τύπου III (Ποζολανικά τσιμέντα Portland, μεγαλύτερο ποσοστό ποζολάνων) και τύπου IV (Τσιμέντο Portland ανθεκτικό στα θειικά άλατα). Στην αγορά, τα τσιμέντα κατηγοριοποιούνται κατά βάση με την αντοχή τους σε θλίψη διακρίνοντας τις κατηγορίες C12/16, C16/20, C20/25, C25/30, C30/37, C35/45, C40/50, C45/55 και C50/60, με τον πρώτο αριθμητικό δείκτη να ορίζει την χαρακτηριστική αντοχή εκφραζόμενη σε MPa που διαπιστώνεται όταν ο έλεγχος γίνεται με κυλινδρικά δοκίμια διαμέτρου 15 και ύψους 30 cm και ο δεύτερος την χαρακτηριστική αντοχή όταν ο έλεγχος γίνεται με κυβικά δοκίμια ακμής 15 cm (portal.tee.gr).

Σε αυτό το σημείο αξίζει να τονιστεί ότι η αναλογία νερού προς τσιμέντου είναι μείζονος σημασίας καθώς επηρεάζεται και καθορίζεται η αντοχή, η ανθεκτικότητα και η εργασιμότητα του σκυροδέματος. Η διαδικασία της ενυδάτωσης αποτελεί κομβικό σημείο έτσι ώστε να μην υπάρξει ρηγμάτωση ή συρρίκνωση στο αρχικά νωπό σκυρόδεμα, συνεπώς η κατάλληλη ισορροπία στον λόγο νερού-τσιμέντου είναι κρίσιμη.

Μια ακόμη φάση του σκυροδέματος η οποία διακρίνεται με την βοήθεια μικροσκοπίου είναι η μεταβατική ζώνη που αντιπροσωπεύει την περιοχή της διεπιφάνειας μεταξύ μεγάλων αδρανών και τσιμεντοπολτού. Η ζώνη αυτή αποτελείται από διάφορα στερεά σωματίδια, πόρους

και μικρορωγμές και είναι ασθενέστερη από τα υπόλοιπα συστατικά του σκυροδέματος, όμως επηρεάζει και αυτή σε μεγάλο βαθμό τις μηχανικές ιδιότητες του σκυροδέματος.

Τέλος, όσον αφορά τα πρόσμικτα που χρησιμοποιούνται κατά την παραγωγή του σκυροδέματος, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, αυτά προστίθενται στο μείγμα για να τροποποιήσουν ή να βελτιώσουν ορισμένα από τα χαρακτηριστικά του σκυροδέματος. Για παράδειγμα, οι πλαστικοποιητές βελτιώνουν την πλαστιμότητα δηλαδή την εργασιμότητα του σκυροδέματος μειώνοντας παράλληλα την ποσότητα νερού που απαιτείται. Η καθυστέρηση του χρόνου πήξης του μπετόν δίνει την δυνατότητα μεγαλύτερης ευελιξίας όσον αφορά την τελική εφαρμογή του στην κατασκευή κάτι που είναι ιδιαίτερα χρήσιμο για μεγάλες και σύνθετες κατασκευές. Για τον λόγο αυτό χρησιμοποιούνται επιβραδυντές ενώ αντίστοιχα για την επιτάχυνση της διαδικασίας ενυδάτωσης γίνεται χρήση επιταχυντών, οι οποίοι βοηθούν στην ταχύτερη πήξη και πρώιμη ανάπτυξη αντοχής στο μπετόν, κάτι που είναι επωφελές σε κρύες καιρικές συνθήκες ή όταν απαιτείται γρήγορη κατασκευή (fast track construction).

Γενικά, το σκυρόδεμα αποτελεί ένα υλικό που η δομή του δεν είναι σταθερή αλλά μεταβάλλεται και επηρεάζεται από παράγοντες όπως ο χρόνος, η θερμοκρασία και η υγρασία. Ωστόσο με την κατάλληλη αναλογία νερού τσιμέντου και με την προσθήκη των κατάλληλων πρόσμικτων στο μείγμα, το μπετόν είναι ικανό να προσαρμοστεί στις περιβαλλοντικές συνθήκες και να πληροί τις απαιτήσεις για διάφορες κατασκευαστικές εφαρμογές μεγάλου ή μικρού εύρους (Concrete Network, 2020).

1.3.2 Ιδιότητες και Χαρακτηριστικά Σκυροδέματος

Το σκυρόδεμα, όπως ήδη προαναφέρθηκε, αποτελεί ένα σημαντικό υλικό για την κατασκευαστική βιομηχανία με κύρια χαρακτηριστικά την αντοχή και την ανθεκτικότητα υπό διάφορες συνθήκες. Ακολούθως παρουσιάζονται συνοπτικά ορισμένες από τις πιο σημαντικές ιδιότητες του σκυροδέματος :

- **Αντοχή σε θλίψη:** Το σκυρόδεμα εμφανίζει υψηλή θλιπτική αντοχή και μπορεί να παραλάβει μεγάλα φορτία και πιέσεις χωρίς να παραμορφώνεται, καθιστώντας το ως κατάλληλο υλικό για ένα ευρύ φάσμα δομικών εφαρμογών.
- **Αντοχή σε εφελκυσμό:** Το σκυρόδεμα παρουσιάζει μικρότερη αντοχή σε εφελκυσμό σε σχέση με αντοχή σε θλίψη (περίπου υποδεκαπλάσια), ωστόσο εξακολουθεί να μπορεί να

παραλάβει εφελκυστικές δυνάμεις. Η αύξηση της εφελκυστικής αντοχής στο σκυρόδεμα για να υπάρξει η απαιτούμενη δομική σταθερότητα της κατασκευής, επιτυγχάνεται με την προσθήκη χαλύβδινων οπλισμών.

- **Αντοχή σε κάμψη:** Το σκυρόδεμα παρουσιάζει ικανοποιητική καμπτική αντοχή, παραλαμβάνοντας τα ασκούμενα φορτία και διασφαλίζοντας δομική ακεραιότητα.
- **Αντοχή σε διάτμηση:** Λόγω της ολίσθησης που προκαλείται από δυνάμεις και φορτία που ασκούνται στην επιφάνεια του υλικού, το σκυρόδεμα αναπτύσσει την απαιτούμενη αντοχή σε διάτμηση έτσι ώστε να διασφαλιστεί η σταθερότητα της κατασκευής.
- **Ανθεκτικότητα:** Το σκυρόδεμα εμφανίζει υψηλή ανθεκτικότητα στο χρόνο όταν έρχεται αντιμέτωπο με ακραίες συνθήκες, καταπονήσεις και χημικά αίτια, διατηρώντας τις μηχανικές του ιδιότητες σταθερές.
- **Εργασιμότητα:** Το σκυρόδεμα αποτελεί ένα υλικό με υψηλή εργασιμότητα καθώς μπορεί να διαμορφωθεί σε διάφορα σχήματα και μεγέθη ικανοποιώντας τις απαιτήσεις του σχεδιασμού και εξασφαλίζοντας καλή αντοχή, ποιότητα και αισθητική του τελικού προϊόντος. Το σκυρόδεμα μπορεί να φινιριστεί και επεξεργαστεί με διάφορους τρόπους για να επιτευχθούν διαφορετικές υφές, χρώματα και επιφανειακές επεξεργασίες, επιτρέποντας μια αισθητική ευελιξία στα κατασκευαστικά έργα.
- **Πορώδες και διαπερατότητα:** Οι συγκεκριμένες ιδιότητες επηρεάζουν την πυκνότητα, την αντοχή και την υγρασία του σκυροδέματος. Το πορώδες αποτελεί τον λόγο του όγκου των πόρων προς τον συνολικό όγκο, ενώ η διαπερατότητα καθορίζει τον ρυθμό κίνησης της υγρασίας μέσω του υλικού.
- **Αντοχή σε πυρκαγιά:** Το σκυρόδεμα έχει εξαιρετικές ιδιότητες αντοχής στη φωτιά, καθώς δεν καίγεται και δεν εκπέμπει τοξικούς καπνούς όταν εκτίθεται σε πυρκαγιά. Αυτό το χαρακτηριστικό το καθιστά το πλέον κατάλληλο υλικό για πυρίμαχες κατασκευές σε κτίρια και υποδομές.
- **Θερμική μάζα:** Το σκυρόδεμα έχει υψηλή θερμική μάζα, που σημαίνει ότι μπορεί να απορροφήσει και να αποθηκεύσει αποτελεσματικά θερμική ενέργεια. Αυτή η ιδιότητα βοηθά στη ρύθμιση των εσωτερικών θερμοκρασιών και στη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας για θέρμανση και ψύξη στα κτίρια.
- **Ηχομόνωση:** Το σκυρόδεμα παρέχει καλή ηχομόνωση, μειώνοντας τη μετάδοση του θορύβου μεταξύ εσωτερικών και εξωτερικών χώρων στα κτίρια.

Τα παραπάνω χαρακτηριστικά καθιστούν το σκυρόδεμα ως ένα από τα συνηθέστερα δομικά υλικά που χρησιμοποιούνται στις κατασκευές καθώς εξασφαλίζει σταθερότητα και μακροζωία σε ένα μεγάλο φάσμα κτιρίων και υποδομών (Adewumi J.B. et al, 2023). Ωστόσο, το σκυρόδεμα εμφανίζει μερικά ακόμη πρόσθετα χαρακτηριστικά που καταδεικνύουν περαιτέρω την ευελιξία, την ανθεκτικότητα και την καταλληλότητα του στις κατασκευές. Κάποια εκ των οποίων αναλύονται ακολούθως :

- **Αειφορία:** Το σκυρόδεμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε βιώσιμες και «πράσινες» κατασκευές όταν κατά την παραγωγή του χρησιμοποιηθούν ανακυκλώσιμα υλικά, που δεν επιδρούν αρνητικά στις ιδιότητες του, και εφαρμοστούν τεχνολογίες δέσμευσης και περιορισμού του παραγόμενου άνθρακα, ελαχιστοποιώντας κατά αυτόν τον τρόπο τις περιβαλλοντικές του επιπτώσεις. Η δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης και ανακύκλωσης σε συνδυασμό με την υψηλή ανθεκτικότητα του σκυροδέματος στο χρόνο, το καθιστούν ένα δυνητικά βιώσιμο υλικό για κατασκευαστικά έργα (Pradena M. & Cesar A., 2021).
- **Περιβαλλοντική συμβατότητα:** Το μεγαλύτερο ποσοστό της σύστασης του σκυροδέματος αποτελείται από αδρανή, δηλαδή φυσικά υλικά, τα οποία κατά την επεξεργασία τους δεν απελευθερώνουν επιβλαβείς ρύπους στο περιβάλλον.
- **Βαθμός συντήρησης:** Το σκυρόδεμα παρουσιάζει χαμηλό βαθμό συντήρησης συγκριτικά με άλλα δομικά υλικά και οι εργασίες επιδιόρθωσης του δεν παρουσιάζουν μεγάλες δυσκολίες, παρατείνοντας την διάρκεια ζωής των κτιρίων και κατασκευών (Melton P., 2020).
- **Τροποποίηση:** Ένα ακόμη αξιόλογο χαρακτηριστικό του σκυροδέματος είναι η δυνατότητα που παρουσιάζει για τροποποίηση και προσαρμογή μετά από χρόνια. Σε έργα ανακαίνισης που απαιτούν αλλαγές στο σχεδιασμό το σκυρόδεμα μπορεί να τροποποιηθεί κατάλληλα, να κοπεί και να τρυπηθεί χωρίς να χάνεται η συνολική αντοχή και η συνοχή της κατασκευής.
- **Προσαρμοστικότητα:** Το σκυρόδεμα σε μια κατασκευή μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε διάφορες μορφές, όπως το προκατασκευασμένο, το χυτό και το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, δίνοντας μια μορφή ευελιξίας για τις εκάστοτε απαιτήσεις και συνθήκες του έργου.
- **Διαθεσιμότητα:** Τα κύρια συστατικά του σκυροδέματος, όπως είναι τα αδρανή, το νερό και το τσιμέντο, βρίσκονται σε ικανοποιητικό απόθεμα παγκοσμίως και μπορούν να προμηθεύονται τοπικά για να μειωθούν το κόστος μεταφοράς και οι εκπομπές ρύπων.

- **Οικονομική αποδοτικότητα:** Σε περιοχές όπου υπάρχει υψηλή διαθεσιμότητα πρώτων υλών για την παραγωγή σκυροδέματος σε συνδυασμό με το χαμηλό βαθμό συντήρησης και την μεγάλη διάρκεια ζωής του, καθιστούν το σκυρόδεμα ένα ιδιαίτερα οικονομικά αποδοτικό δομικό υλικό (Ciaran R. & Emilio G., 2021).

1.3.3 Οπλισμένο Σκυρόδεμα

Το οπλισμένο σκυρόδεμα είναι ένα σύνθετο υλικό που συνδυάζει την αντοχή του σκυροδέματος σε θλίψη και την αντοχή του χαλύβδινου οπλισμού σε εφελκυσμό, προσφέροντας μοναδικές ιδιότητες στις κατασκευές. Ο συνδυασμός αυτός αποτρέπει το σκυρόδεμα να ρηγματώσει ή να αστοχήσει υπό τάσεις εφελκυσμού καθώς ο οπλισμός από χάλυβα απορροφά τις εφελκυστικές ή διατμητικές τάσεις, και σε συνδυασμό με το συμβατό σκυρόδεμα ενισχύουν την ανθεκτικότητα και τη συνολική αντοχή του κατασκευαστικού έργου.

Στα δομικά έργα η κατασκευή με οπλισμένο σκυρόδεμα προϋποθέτει την προετοιμασία ξυλότυπου, την τοποθέτηση οπλισμών, την έγχυση σκυροδέματος και την στερεοποίηση και σκλήρυνση του για να εξασφαλιστεί η δομική ακεραιότητα και η απαιτούμενη μηχανική αντοχή. Οι μέθοδοι κατασκευής περιλαμβάνουν την προκατασκευή, την επί τόπου σκυροδέτηση και την εκτοξευόμενη σκυροδέτηση (gunite) επιλέγοντας εκείνη που είναι κατάλληλη για το αντίστοιχο έργο (The Constructor, 2019).

1.3.4 Ιδιότητες και Χαρακτηριστικά Οπλισμένου Σκυροδέματος

Η αυξημένη αντοχή που προσδίδει στην κατασκευή το οπλισμένο σκυρόδεμα, εξασφαλίζοντας σταθερότητα και ανθεκτικότητα υπό διάφορες φορτίσεις, το καθιστά ιδανικό δομικό υλικό για απλά έργα όπως κτίρια, στέγαστρα μέχρι και πιο σύνθετα έργα όπως φράγματα, γέφυρες και σήραγγες. Ομοίως με το άοπλο, το οπλισμένο σκυρόδεμα παρουσιάζει πολλαπλά πλεονεκτήματα, όπως είναι η υψηλή μηχανική αντοχή, η οικονομική βιωσιμότητα, η ευελιξία στη διαμόρφωση και η αντοχή σε πυρκαγιά.

Ωστόσο, οι κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα έχουν αυξημένο βάρος και χρειάζονται σημαντικό χρόνο για να αποκτήσουν τη συνολική τους αντοχή μετά την κατασκευή ενώ χρειάζονται επίσης κατάλληλους ξυλότυπους. Οι ιδιότητες του οπλισμένου σκυροδέματος αναπτύσσονται παρακάτω :

- **Αντοχή:** Το οπλισμένο σκυρόδεμα παρουσιάζει μεγάλη αντοχή σε θλίψη, αναλαμβάνοντας μεγάλες δυνάμεις συμπίεσης και υψηλά φορτία, ενώ με την προσθήκη οπλισμού χάλυβα αυξάνεται σημαντικά η εφελκυστική τάση και η συνολική μηχανική αντοχή της κατασκευής.
- **Ανθεκτικότητα:** Κύριο χαρακτηριστικό των κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος είναι η μεγάλη διάρκεια ζωής και η ανθεκτικότητα στο χρόνο και τις περιβαλλοντικές συνθήκες. Το σκυρόδεμα παρουσιάζει αλκαλικότητα που προστατεύει τον οπλισμό του χάλυβα από τη διάβρωση, εξασφαλίζοντας δομική ακεραιότητα και μακροζωία στην κατασκευή.
- **Ευελιξία:** Το οπλισμένο σκυρόδεμα δύναται να χρησιμοποιηθεί σε ποικίλα δομικά στοιχεία σε ένα κτίριο, συμπεριλαμβανομένων των υποστυλωμάτων, των δοκαριών, των πλακών των τοίχων και των θεμελίων. Υπάρχει η δυνατότητα να προπαρασκευαστεί και να μεταφερθεί στο χώρο του έργου ή να χυτευθεί επί τόπου ανάλογα με τις απαιτήσεις του έργου.
- **Αντοχή σε πυρκαγιά:** Η ύπαρξη αδρανών στη σύσταση του σκυροδέματος σε συνδυασμό με τη χαμηλή θερμική του αγωγιμότητα, προσδίδουν εξαιρετική αντοχή σε πυρκαγιά. Το σκυρόδεμα δεν καίγεται και δεν εκπέμπει ρύπους όταν έρχεται αντιμέτωπο με φωτιά. Επομένως αποτελεί ιδανικό υλικό για πυράντοχες κατασκευές σε υποδομές και κτίρια.
- **Βαθμός συντήρησης:** Το οπλισμένο σκυρόδεμα πρέπει να επιθεωρείται τακτικά, να συντηρείται και να επισκευάζεται αν παρουσιαστεί ρηγμάτωση ή διάβρωση στον οπλισμό. Ωστόσο, ο χάλυβας που βρίσκεται εντός του σκυροδέματος δεν απαιτεί βαφή ή επίστρωση για προστασία από περιβαλλοντικές συνθήκες, ελαττώνοντας το κόστος συντήρησης.
- **Βιωσιμότητα:** Η παραγωγή συμβατικού σκυροδέματος ενδέχεται να έχει ορισμένες περιβαλλοντικές επιπτώσεις ωστόσο με την επιλογή κατάλληλων μεθόδων επεξεργασίας, την χρήση ανακυκλώσιμων υλικών και βελτιωμένων μειγμάτων για μεγαλύτερη ανθεκτικότητα, δύναται να ελαχιστοποιηθεί το αποτύπωμα άνθρακα. Επίσης, αξίζει να σημειωθεί ότι η παρασκευή οπλισμένου σκυροδέματος απαιτεί λιγότερη ενέργεια συγκριτικά με την παραγωγή χάλυβα, συμβάλλοντας στην ενεργειακή αναβάθμιση στις κατασκευές.
- **Οικονομική αποδοτικότητα:** Το συμβατικό σκυρόδεμα είναι οικονομικότερο από το οπλισμένο λόγω του αυξημένου κόστους του χάλυβα των οπλισμών. Όμως, η προσφερόμενη αντοχή σε εφελκυσμό, το μικρό κόστος συντήρησης, η ανθεκτικότητα και η αντοχή στο χρόνο το καθιστούν ιδανική επιλογή σε μακροπρόθεσμη κλίμακα.

Συμπερασματικά, το οπλισμένο σκυρόδεμα είναι ένα ευρέως χρησιμοποιούμενο δομικό υλικό το οποίο προτιμάται λόγω της υψηλής του αντοχής, της ανθεκτικότητας και της ευελιξίας του, προσφέροντας μια οικονομικά αποδοτική λύση για ένα μεγάλο φάσμα κατασκευαστικών εφαρμογών (The Constructor, 2019).

1.4 Μέταλλα

Οι σύγχρονες κατασκευές απαιτούν δομικά υλικά που παρουσιάζουν αυξημένη αντοχή και ανθεκτικότητα έναντι εξωτερικών συνθηκών, έτσι ώστε να μην φθείρονται στο χρόνο και να χρειάζονται λιγότερη συντήρηση μελλοντικά. Ως εκ τούτου, στην κατασκευαστική βιομηχανία χρησιμοποιούνται μέταλλα που εμφανίζουν υψηλή αντοχή και μπορούν να εξυπηρετήσουν τους παραπάνω σκοπούς.

Τα μέταλλα λαμβάνονται από εδαφικά υλικά, τα μεταλλεύματα, μέσω κάποιας φυσικής ή χημικής κατεργασίας όπως είναι η πυρομεταλλουργία, η υδρομεταλλουργία και η ηλεκτρομεταλλουργία. Κατά την πυρομεταλλουργική διαδικασία, το μετάλλευμα τοποθετείται και θερμαίνεται σε κάμινο σχηματίζοντας τήγμα από το οποίο διαχωρίζεται χημικά το μέταλλο, ενώ στην υδρομεταλλουργία και ηλεκτρομεταλλουργία ο διαχωρισμός του μετάλλου από τα μεταλλεύματα γίνεται μέσω διαλυμάτων και ηλεκτρόλυσης αντιστοίχως (Derucher et al. 1994). Εξάλλου, σημαντικό είναι να επισημανθεί ότι πολλά μέταλλα αναμειγνύονται μεταξύ τους, μέσω μιας χημικής κατεργασίας δημιουργώντας κράματα μετάλλων που στοχεύουν στη βελτίωση ιδιοτήτων και τη μεταβολή της τελικής μορφής.

Το χαρακτηριστικότερο παράδειγμα μετάλλου που χρησιμοποιείται σε κτιριακές κατασκευές είναι ο χάλυβας, ενώ ακολουθούν το αλουμίνιο, ο σίδηρος, το τιτάνιο και ο χαλκός με λιγότερες εφαρμογές. Το καθένα εξ αυτών χρησιμοποιείται ανάλογα με τις μεμονωμένες ιδιότητές που προσδίδει έτσι ώστε να αποκομιστούν όσο το δυνατόν περισσότερα οφέλη κατά την φάση κατασκευής ενός έργου.

Τα μέταλλα βρίσκουν εφαρμογή σε μια σειρά κατασκευών όπως είναι οι γέφυρες μεγάλων ανοιγμάτων, τα υπόστεγα, οι στέγες και τα δομικά στοιχεία κτιρίων, ενώ παράλληλα συνεισφέρουν σημαντικά στις κατασκευές με την μορφή χαλύβδινων ράβδων οπλισμού και τενόντων προέντασης για την παρασκευή οπλισμένου και προεντεταμένου σκυροδέματος αντίστοιχα. Τα υπόλοιπα μέταλλα, όπως το αλουμίνιο, ο σίδηρος και ο χαλκός χρησιμοποιούνται

σε ένα πιο περιορισμένο φάσμα εφαρμογών ωστόσο προσδίδουν μοναδικές ιδιότητες στις κατασκευές και επιλέγονται σε ικανοποιητικό βαθμό (Industrial Metal Service, 2024).

1.4.1 Ιδιότητες και Χαρακτηριστικά Μετάλλων

Τα περισσότερα μέταλλα και κράματα μετάλλων παρουσιάζουν παρόμοιες φυσικές και μηχανικές ιδιότητες μεταξύ τους, οι οποίες είναι ιδιαίτερα χρήσιμες και ενίοτε απαραίτητες σε μικρά ή μεγάλα κατασκευαστικά έργα. Ακολούθως παρουσιάζονται συνοπτικά ορισμένες από τις πιο σημαντικές ιδιότητες των μετάλλων που χρησιμοποιούνται σε κτίρια και κατασκευές.

- **Αντοχή και ανθεκτικότητα:** Ο χάλυβας, το αλουμίνιο και πολλά ακόμη μέταλλα έχουν μεγάλο λόγο αντοχής προς βάρος, το οποίο δείχνει ότι μπορούν να αντέξουν μεγάλα φορτία ενώ έχουν σχετικά ελαφριά κατασκευή. Παράλληλα, παρουσιάζουν ανθεκτικότητα σε διάφορες περιβαλλοντικές συνθήκες όπως η πυρκαγιά, η διάβρωση και τα παράσιτα. Ιδιαίτερα προς την αντοχή σε φωτιά, ο χάλυβας μπορεί να διατηρήσει τη δομική του ακεραιότητα σε υψηλές θερμοκρασίες (μέχρι 500°C).
- **Ολκιμότητα:** η ιδιότητα των υλικών να εμφανίζουν σχετικά μεγάλες παραμορφώσεις πριν τη θραύση τους. Τα μέταλλα εμφανίζουν υψηλή ολκιμότητα και αυτό είναι επιθυμητό στις κατασκευές διότι στην περίπτωση που αστοχήσει το υλικό υπάρχει μια μεγάλη παραμόρφωση η οποία είναι διακριτή και δεν υπάρχει άμεση κατάρρευση.
- **Συγκολλησιμότητα:** η ιδιότητα των μετάλλων να συγκολλούνται μεταξύ τους σχηματίζοντας ένα ενιαίο σύνολο, χωρίς να μεταβάλλονται ουσιαστικά οι ιδιότητές τους.
- **Ελαστικότητα και Πλαστιμότητα:** η ικανότητα των μετάλλων να συμπεριφέρονται ελαστικά για μικρές παραμορφώσεις, ενώ μόλις ξεπεραστεί το όριο διαρροής τα μέταλλα συμπεριφέρονται πλαστικά, δηλαδή παραμορφώνονται μόνιμα χωρίς να γυρίζουν στην αρχική τους κατάσταση.
- **Ελασιμότητα ή Ελατότητα:** χαρακτηρίζει την ικανότητα των μετάλλων και κραμάτων να επιδέχονται διάφορους τρόπους μορφοποίησης υπό πίεση, να αλλάζουν δηλαδή σχήμα και μορφή υπό την επιβολή εξωτερικών δυνάμεων, χωρίς να μεταβάλλονται οι ιδιότητές τους.
- **Ευτηκτότητα και Ευελιξία:** ο όρος ευτηκτότητα αναφέρεται στην ιδιότητα που έχουν τα μέταλλα να τήκονται σε υψηλές θερμοκρασίες για να γίνει η χύτευσή τους σε καλούπια και έπειτα να επανέρχονται στη στερεή κατάσταση μετά από πτώση της θερμοκρασίας, χωρίς να

επηρεάζονται οι ιδιότητές τους. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μπορούν να κατασκευαστούν σε διάφορα μεγέθη και σχήματα επιτρέποντας μια ευελιξία στον σχεδιασμό.

- **Θερμική και Ηλεκτρική Αγωγιμότητα:** αποτελούν σημαντικές ιδιότητες των μετάλλων που καθορίζουν την ικανότητά τους να μεταφέρουν θερμότητα και ηλεκτρισμό αντίστοιχα. Τα μέταλλα έχουν γενικά υψηλή θερμική αγωγιμότητα σε σύγκριση με άλλα υλικά συνεπώς είναι περισσότερο αποτελεσματικά στη μεταφορά θερμότητας. Όσον αφορά την ηλεκτρική αγωγιμότητα, είναι εξαιρετικοί αγωγοί του ηλεκτρισμού χάρη στο μεγάλο αριθμό ελεύθερων ηλεκτρονίων που διαθέτουν. Γενικά, κατά ένα μεγάλο βαθμό τα μέταλλα με υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα τείνουν να έχουν υψηλή θερμική αγωγιμότητα που οφείλεται στην κινητικότητα των ελεύθερων ηλεκτρονίων μέσα στη δομή του μετάλλου.
- **Βαθμός Συντήρησης:** τα μέταλλα παρουσιάζουν υψηλή ανθεκτικότητα σε εξωτερικούς παράγοντες, όμως εξακολουθούν να χρειάζονται τακτική συντήρηση για να διασφαλιστεί η δομική ακεραιότητα τους. Κύριος στόχος της συντήρησης αποτελεί η πρόληψη της διάβρωσης, το οποίο επιτυγχάνεται με τακτικές επιβλέψεις και μικρές επεμβάσεις αν διαπιστωθεί κάποιο πρόβλημα (π.χ. βαφή).
- **Βιωσιμότητα:** Τα περισσότερα μέταλλα που χρησιμοποιούνται στις κατασκευές είναι ανακυκλώσιμα και μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν χωρίς να έχουν χάσει κάποια από τις βασικές τους ιδιότητες. Η ανακύκλωση έχει μικρότερο ενεργειακό κόστος από την εξόρυξη και επεξεργασία νέων πρώτων υλών και μεταλλευμάτων, επομένως για να μειωθούν οι εκπομπές άνθρακα και το περιβαλλοντικό αποτύπωμα, πρέπει να γίνουν ενέργειες προς αυτήν την κατεύθυνση.
- **Οικονομική απόδοση:** Η επιλογή μετάλλων στις κατασκευές συνεπάγεται με αυξημένο αρχικό κόστος, λόγω της τιμής του χάλυβα και άλλων μετάλλων. Ωστόσο, μακροπρόθεσμα η χρήση μετάλλων είναι οικονομικά αποδοτική καθώς η μηχανική τους αντοχή δεν χάνεται με τον χρόνο, ωστόσο ενδέχεται να απαιτηθεί μια μορφή συντήρησης (π.χ. βαφή) που ενδεχομένως να αυξήσει το κόστος. Επίσης αξίζει να σημειωθεί ότι αν τα μέταλλα προέρχονται από ανακύκλωση και χρησιμοποιηθούν εκ νέου σε μια καινούργια κατασκευή, τότε περιορίζεται το ποσό της ενσωματωμένης ενέργειας των υλικών και αποτελεί μια βιώσιμη και οικονομικά αποδοτική επιλογή (Team Xometry, 2024).

1.4.2 Σίδηρος

Ο σίδηρος αποτελεί ένα μέταλλο που υπάρχει σε μεγάλες ποσότητες στον φλοιό της γης και χρησιμοποιείται στην κατασκευαστική βιομηχανία λόγω ορισμένων χαρακτηριστικών και ιδιοτήτων του. Ο σίδηρος αυτούσιος είναι πολύ μαλακός και εμφανίζει ευελιξία στο καθορισμό του σχήματός του, όμως για να προσφέρει αντοχή στην κατασκευή πρέπει να αναμειχθεί με άλλα μέταλλα και να δημιουργήσει ένα στιβαρό μεταλλικό κράμα.

Ο καθαρός σίδηρος σπανίως εντοπίζεται ως ελεύθερο στοιχείο στη φύση, αλλά τις περισσότερες φορές είναι αναμειγμένος με άλλα στοιχεία όπως ο άνθρακας και το θείο. Οι ενώσεις αυτές του σιδήρου βρίσκονται σε μορφή εδαφικών υλικών, τα σιδηρομεταλλεύματα, με χαρακτηριστικά παραδείγματα τον μαγνησίτη και τον αιματίτη (Τριανταφύλλου, 2013).

Κατά το παρελθόν ο χυτοσίδηρος χρησιμοποιήθηκε ευρέως στη γεφυροποιία και σε κτιριακές μονάδες, όμως σήμερα η χρήση του περιορίζεται σε λιγότερες και πιο ειδικές εφαρμογές λόγω της ψαθυρότητας του υλικού. Στις κτιριακές κατασκευές ο σίδηρος δεν χρησιμοποιείται σε καθαρή μορφή διότι είναι πολύ μαλακός και η εξαγωγή του από τα εδαφικά υλικά είναι ενεργοβόρα και δαπανηρή. Αντιθέτως, σήμερα χρησιμοποιούνται, ως επί το πλείστον κράματα σιδήρου με άλλα μέταλλα (χαλκός, χρώμιο, μαγγάνιο) ή αμέταλλα στοιχεία (θείο, πυρίτιο, άνθρακας) έτσι ώστε το κράμα σιδήρου να αποκτήσει τις επιθυμητές ιδιότητες.

Το πιο σημαντικό κράμα σιδήρου που χρησιμοποιείται δεόντως στις κατασκευές είναι το κράμα σιδήρου με άνθρακα, ο λεγόμενος «χάλυβας», που βρίσκει πολυάριθμες εφαρμογές και έχει σημαντική μηχανική αντοχή και υψηλή ανθεκτικότητα (Industrial Metal Service, 2024).

1.4.3 Χάλυβας

Ο χάλυβας αποτελεί το πιο διαδεδομένο μέταλλο που χρησιμοποιείται στην κατασκευαστική βιομηχανία, καθώς προσφέρει πολλά από τα επιθυμητά χαρακτηριστικά που πρέπει να έχουν οι σύγχρονες κατασκευές. Επίσης, πρόκειται για ένα βιώσιμο υλικό που μπορεί να καταστεί ανακυκλώσιμο και να επαναχρησιμοποιηθεί αρκετές φορές διατηρώντας τις αρχικές του ιδιότητες. Αυτό θα έχει ως συνέπεια να μην εξορύσσονται επιπλέον μεταλλεύματα, προσφέροντας μια ευεργετική εναλλακτική λύση για ένα βιώσιμο μέλλον.

Παράλληλα, ο χάλυβας βρίσκεται σε ικανοποιητική διαθεσιμότητα ενώ προσφέρει εξαιρετική αντοχή, αποτελώντας βασικό υλικό στην κατασκευή λόγω της ικανότητάς του να αντέχει υπό διάφορες συνθήκες. Η παρουσία του άνθρακα στον χάλυβα αυξάνει την αντοχή και τη σκληρότητα, αλλά ταυτόχρονα περιορίζει την πλαστιμότητα και τη συγκολλησιμότητα. Οι κύριες εφαρμογές εντοπίζονται στην κατασκευή γεφυρών, δοκών σε δομικά πλαίσια κτιρίων και υποστυλωμάτων, ενώ χρησιμοποιείται ακόμη σε διάφορα έργα υποδομών όπως σιδηρόδρομοι και υποστηρικτικές κατασκευές σε μεγάλα έργα. Τέλος, αξιοποιείται ως ράβδος οπλισμού στο οπλισμένο σκυρόδεμα και σε διάφορα μέρη του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού κτιρίων.

Ο χάλυβας διατίθεται σε πολλούς τύπους, ο καθένας με τη δική του μοναδική σύνθεση και ιδιότητες προσαρμοσμένες σε συγκεκριμένες εφαρμογές. Η επιλογή του εξαρτάται από το κόστος, την ποσότητα και από τις ειδικές απαιτήσεις που υπάρχουν στη μελέτη, όπως είναι η απαιτούμενη μηχανική αντοχή. Σύμφωνα με τα ευρωπαϊκά πρότυπα, οι κύριοι τύποι χάλυβα κατηγοριοποιούνται με βάση τις μηχανικές τους ιδιότητες, τη χημική τους σύσταση, την τελική τους χρήση και τη μέθοδο παραγωγής. Κατά αυτόν τον τρόπο οι χάλυβες χωρίζονται σε εκείνους που προήλθαν από θερμή έλαση χωρίς περαιτέρω κατεργασία, θερμή έλαση ακολουθούμενη από θερμική κατεργασία και ψυχρή κατεργασία με στρέψη ή έλαση του προϊόντος της θερμής έλασης (Τριανταφύλλου, 2013). Όσον αφορά τις μηχανικές τους ιδιότητες, οι χάλυβες διακρίνονται σύμφωνα με τη ολκιμότητα, τη συγκολλησιμότητα, την αντοχή σε διάβρωση και την μορφή της επιφάνειας τους (Industrial Metal Service, 2024).

Κάθε τύπος έχει συγκεκριμένες ιδιότητες και εφαρμογές και η χρήση του διέπεται από πρότυπα και κανονισμούς για να διασφαλιστεί ότι πληρούνται τα κριτήρια ασφαλείας και αξιοπιστίας για δεδομένες απαιτήσεις και εφαρμογές. Οι κύριοι τύποι χάλυβα με βάση τα ευρωπαϊκά πρότυπα είναι :

- **Μη κραματοποιημένος δομικός χάλυβας:** Αυτή η κατηγορία περιλαμβάνει δομικούς χάλυβες με χαμηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα και χωρίς πρόσθετα στοιχεία κράματος. Αυτοί οι χάλυβες χρησιμοποιούνται κυρίως σε πλαίσια κτιρίων, γέφυρες και εξαρτήματα μηχανημάτων περιλαμβάνοντας διάφορες ποιότητες δομικού χάλυβα, όπως S235, S275, S355 και S420, με καθορισμένες ελάχιστες αντοχές διαρροής και ιδιότητες κρούσης.
- **Κραματοποιημένος δομικός χάλυβας:** Οι κραματοποιημένοι δομικοί χάλυβες περιέχουν πρόσθετα στοιχεία κράματος όπως χρώμιο, νικέλιο ή μολυβδαίνιο για τη βελτίωση των

μηχανικών ιδιοτήτων τους. Αυτοί οι χάλυβες χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές που απαιτούν υψηλότερη αντοχή, σκληρότητα ή αντοχή στη φθορά.

- **Ανοξείδωτος χάλυβας:** Ο ανοξείδωτος χάλυβας περιέχει χρώμιο, το οποίο σχηματίζει ένα στρώμα παθητικού οξειδίου στην επιφάνειά του, παρέχοντας εξαιρετική αντοχή στη διάβρωση. Περιέχει επίσης νικέλιο ή και μολυβδαίνιο για περαιτέρω ενίσχυση της αντοχής στη διάβρωση και άλλων ιδιοτήτων. Χρησιμοποιούνται ευρέως σε εφαρμογές που απαιτούν αντοχή στη διάβρωση, τη θερμότητα και την χημική έκθεση.
- **Δομικές κοίλες διατομές:** Οι κοίλες δομικές τομές, γνωστές και ως κοίλες διατομές ή HSS, χρησιμοποιούνται στην κατασκευή υποστυλωμάτων, δοκών και άλλων δομικών στοιχείων. Πρόκειται για συγκολλημένες κοίλες διατομές κατασκευασμένες από δομικούς χάλυβες για χρήση στην κατασκευή.
- **Πλάκες, φύλλα και λωρίδες χάλυβα:** Οι πλάκες και τα φύλλα χάλυβα χρησιμοποιούνται σε διάφορες κατασκευαστικές εφαρμογές, συμπεριλαμβανομένων των επενδύσεων κτιρίων, της στέγης και των δομικών στοιχείων (Intsel, 2024).
- **Χάλυβες δοχείων υπό πίεση:** Οι χάλυβες δοχείων πίεσης χρησιμοποιούνται στην κατασκευή λεβήτων, δεξαμενών αποθήκευσης και άλλων δοχείων που υπόκεινται σε περιβάλλοντα υψηλής πίεσης. Αυτοί οι χάλυβες έχουν σχεδιαστεί για να αντέχουν σε υψηλές θερμοκρασίες και πιέσεις διατηρώντας παράλληλα τη δομική τους ακεραιότητα και την αντοχή τους στη ρηγμάτωση (Miller M.K., Pareige, Burke M.G., 1999).
- **Χάλυβας οπλισμού:** Οι χάλυβες ή ράβδοι οπλισμού χρησιμοποιούνται για την ενίσχυση των κατασκευών από σκυρόδεμα. Ταξινομούνται με βάση το όριο διαρροής και τα χαρακτηριστικά πλαστιμότητάς τους, με χαρακτηρισμούς όπως B500B και B500C που υποδεικνύουν συγκεκριμένες ιδιότητες που απαιτούνται για εφαρμογές οπλισμού. Το όριο διαρροής αναφέρεται στο σημείο που ένα υλικό αρχίζει να αλλάζει σχήμα μη αναστρέψιμα, δηλαδή χωρίς να μπορεί να επανέλθει στην αρχική του κατάσταση, υπό επιβαλλόμενη τάση. Κατηγορίες χαλύβων οπλισμού παρατίθενται ακολούθως :
    - **Χάλυβας S220:** Αναφέρεται στην βιβλιογραφία ως κοινός ή μαλακός χάλυβας με χαρακτηριστική τιμή του ορίου διαρροής στα 220 MPa. Η παραγωγή του γίνεται με θερμή έλαση, έχει λεία επιφάνεια και οφείλει τις μηχανικές του ιδιότητες στη χημική του σύσταση. Στην αγορά διατίθεται σε μορφή ρολών (κουλούρες) σε διαμέτρους 6-14 mm (Φ6-Φ14).

- **Νευροχάλυβας S400 ή S400s:** Κατηγορία χάλυβα οπλισμού με νευρώσεις στην επιφάνεια του και χαρακτηριστική τιμή ορίου διαρροής τα 400 MPa. Η παραγωγή του γίνεται με θερμή έλαση ενώ στην χημική του σύσταση εντοπίζονται αυξημένα ποσοστά βαναδίου και μαγγανίου, στα οποία οφείλει τις μηχανικές του ιδιότητες. Στο εμπόριο διατίθεται σε ευθύγραμμες ράβδους διαμέτρου Φ6-Φ32 και μήκους 12 ή 14 m. Ο χάλυβας S400s είναι συγκολλήσιμος διατηρώντας τις αρχικές του ιδιότητες, αντιθέτως με τον S400 που όταν συγκολλείται. χάνει ένα μέρος της αντοχής και άλλων μηχανικών ιδιοτήτων.
- **Νευροχάλυβας S500 ή S500s:** Αυτή η κατηγορία χάλυβα παρουσιάζει πολλά κοινά χαρακτηριστικά με την παραπάνω κατηγορία ως προς τις διαμέτρους, τα διαθέσιμα μήκη ράβδων και τις νευρώσεις. Ωστόσο διαφέρει ως προς την χαρακτηριστική τιμή του ορίου διαρροής (500 MPa) και μερικές ακόμη μηχανικές ιδιότητες. Στο εμπόριο παράγονται και οι δυο κατηγορίες, με μεγαλύτερη παραγωγή να συναντάται στον χάλυβα S500s. ο οποίος είναι συγκολλήσιμος και παρουσιάζει μεγαλύτερη μηχανική αντοχή.

1.4.4 Αλουμίνιο

Η μαζική παραγωγή αλουμινίου ξεκίνησε περίπου στις αρχές του περασμένου αιώνα και σήμερα έχει πλέον διεισδύσει σε πολλούς κλάδους της τεχνολογίας και της βιομηχανίας. Το αλουμίνιο και τα κράματα αυτού χρησιμοποιούνται για την κατασκευή γεφυρών, δικτυωμάτων, δοκών και υποστυλωμάτων, ενώ επιλέγονται κατά κύριο λόγο για κουφώματα ανοιγμάτων και στέγαστρα. Στη φύση το αλουμίνιο συναντάται σε ορυκτά και κυρίως σε πετρώματα βωξίτη, ο οποίος παρουσιάζει υψηλή διαθεσιμότητα στην Ελλάδα.

Σε κατασκευές που απαιτούν γρήγορη ολοκλήρωση, επιλέγεται αλουμίνιο αφενός γιατί είναι πολύ ελαφρύ και αφετέρου επειδή είναι ιδιαίτερα ανθεκτικό, καθώς παρουσιάζει εξαιρετική αντοχή στη διάβρωση σε σύγκριση με εναλλακτικά υλικά. Συνεπώς, σύγχρονα μεταλλικά κτίρια όπως πολυκατοικίες, γραφεία, νοσοκομεία και αποθήκες κατασκευάζονται με χρήση κραμάτων αλουμίνιου τα οποία απαιτούν χαμηλή συντήρηση παρέχοντας μεγαλύτερη διάρκεια ζωής. Το αλουμίνιο διαθέτει υψηλή αναλογία αντοχής προς βάρος, καθιστώντας το ιδανικό για κατασκευές όπου το βάρος είναι κρίσιμος παράγοντας ενώ το γεγονός ότι πρόκειται για μη διαβρωτικό υλικό, εξασφαλίζει μακροζωία και ανθεκτικότητα υπό διάφορες συνθήκες.

Παράλληλα κατασκευάζεται και συναρμολογείται εύκολα, επιτρέποντας ευελιξία στις διαδικασίες σχεδιασμού και κατασκευής και έχει εξαιρετικές θερμικές ιδιότητες. Ακόμη, αξίζει να σημειωθεί ότι το αλουμίνιο, όπως κι ο χάλυβας, είναι πλήρως ανακυκλώσιμο, συμβάλλοντας σε βιώσιμες κατασκευαστικές πρακτικές, μειώνοντας τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

Συγκριτικά με τον χάλυβα, το αλουμίνιο έχει μικρότερο βάρος και πιο ικανοποιητική ανθεκτικότητα σε διάβρωση που οφείλεται στο σχηματισμό λεπτότατης επιφανειακής προστατευτικής στρώσης οξειδίου (Τριανταφύλλου, 2013). Ωστόσο, κοστίζει περισσότερο, έχει μικρότερο μέτρο ελαστικότητας, παρουσιάζει δυσκολία στη συγκόλληση και έχει μικρότερη μηχανική αντοχή, που όμως σε μερικά κράματα του αλουμινίου είναι παραπλήσια με του χάλυβα. Το καθαρό αλουμίνιο εξαιτίας της μικρής του μηχανικής αντοχής χρησιμοποιείται σπανίως και για αυτό γίνεται κράμα με άλλα μέταλλα όπως ο χαλκός, το πυρίτιο, το μαγγάνιο, το νικέλιο, το μαγνήσιο και ο ψευδάργυρος που προσδίδουν μεγαλύτερες αντοχές και λοιπά χαρακτηριστικά. Οι ιδιότητες που προσδίδονται στα κράματα αλουμινίου από τις προσμίξεις περιγράφονται στον ακόλουθο πίνακα.

Ιδιότητα	Πρόσμιξη
Αύξηση λόγου αντοχής προς βάρος	Zn και Mg· Zn, Mg και Cu
Βελτίωση μηχανικών ιδιοτήτων γενικά	Mn
Βελτίωση ανθεκτικότητας σε διάβρωση	Mn, Si, Mg
Μείωση σημείου τήξης	Si
Βελτίωση πλαστιμότητας	Si
Αύξηση αντοχής σε θλίψη και κόπωση	Sn, Ni, Ti
	Cu

Πίνακας 19 : «Επίδραση διαφόρων μετάλλων στις ιδιότητες κραμάτων αλουμινίου» (Maguire 1981)

Το αλουμίνιο βρίσκει ποικίλες εφαρμογές και χρησιμοποιείται σε κατασκευές που έρχονται αντιμέτωπες με υγρές συνθήκες (βροχή, θαλασσινό νερό) λόγω της αντοχής του σε διάβρωση, τέτοιες κατασκευές είναι οι στέγες κτιρίων και τα υπεράκτια έργα. Συνάμα, όπως έχει ήδη αναφερθεί, χρησιμοποιείται συνήθως σε κουφώματα παραθύρων και θυρών, σκάλες και ράμπες ασφαλείας λόγω της αντοχής, της ανθεκτικότητας και του μικρού του βάρους. Παράλληλα, η επένδυση με αλουμίνιο παρέχει θερμομόνωση και αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες συμβάλλοντας στην ενεργειακή απόδοση του κτιρίου. Συμπερασματικά, οι μοναδικές του ιδιότητες σε συνδυασμό με τις πολλαπλές εφαρμογές και την δυνατότητα

ανακύκλωσης καθιστούν το αλουμίνιο ένα σημαντικό υλικό που συνδυάζει σε μεγάλο βαθμό την αντοχή, τη βιωσιμότητα και ευελιξία στον σχεδιασμό (Team Xometry, 2023).

1.4.5 Χαλκός

Ο χαλκός είναι ένα μέταλλο υψηλής αντοχής στη διάβρωση, σημαντικής ελατότητας και αγωγιμότητάς που χρησιμοποιείται για αιώνες στην κατασκευή. Ο χαλκός αποτελεί το πρώτο μέταλλο που χρησιμοποίησε ο άνθρωπος και εξάγεται από θειούχα και ανθρακούχα μεταλλεύματα. Οι βασικές του ιδιότητες εντοπίζονται στην υψηλή ηλεκτρική του αγωγιμότητα, στην ανθεκτικότητα σε διάβρωση και την μεγάλη ευκαμψία που παρουσιάζει. Σε αυτές οφείλονται οι πολλαπλές εφαρμογές που εμφανίζει στις κατασκευές, όπως είναι η κατασκευή καλωδίων ηλεκτρικού ρεύματος, σωλήνων ύδρευσης και φύλλων επικάλυψης στεγών.

Το υλικό αυτό έχει τη δυνατότητα να αντέχει στο χρόνο υπό διάφορες εξωτερικές συνθήκες, αν και λόγω των στρωμάτων θειικού άλατος που αναπτύσσονται, ο χαλκός μπορεί συχνά να εμφανίζει μια απόχρωση πράσινου, όπως το άγαλμα της ελευθερίας στη Νέα Υόρκη. Επιπρόσθετα, ο χαλκός ακόμη και ως κράμα, μπορεί να αντέξει σε μεγάλες πιέσεις και μετά από χρόνια να βρεθεί σε πολύ καλή κατάσταση. Τα πιο γνωστά κράματα χαλκού είναι ο μπρούτζος και ο ορείχαλκος, τα οποία χρησιμοποιούνται σε έργα και συστήματα σωληνώσεων ύδρευσης και αποχέτευσης από το παρελθόν.

Τέλος, αξίζει να σημειωθεί πως αν και η διαδικασία παραγωγής χαλκού καταναλώνει σημαντικά ποσά ενέργειας και εκπέμπονται ρύποι, (ειδικά όταν ο χαλκός εντοπίζεται σε θειούχα πετρώματα), υπάρχει η δυνατότητα μέσω της ανακύκλωσης να ανακτηθούν σημαντικές ποσότητες του υλικού και να περιοριστεί το περιβαλλοντικό του αποτύπωμα (Zeeshan, 2024).

1.5 Ξύλο

Το ξύλο αποτελεί ένα ευέλικτο και βιώσιμο δομικό υλικό που χρησιμοποιείται στις κατασκευές από την αρχαιότητα και επιλέγεται ακόμη και σήμερα σε χώρες και περιοχές με πολλά δάση. Οι φυσικές του ιδιότητες, τα περιβαλλοντικά οφέλη και η καλή του αισθητική το αναδεικνύουν ως ιδανικό υλικό για κτιριακά έργα.

Το ξύλο είναι ένα οργανικό προϊόν που προέρχεται από τα δένδρα, με το μεγαλύτερο μέρος της δομικής ξυλείας να προέρχεται από τα κωνοφόρα (π.χ. έλατα, πεύκα). Ανάλογα με τη

χρήση της, η ξυλεία χαρακτηρίζεται ως λευκή («οικοδομική») όταν προορίζεται για δοκούς και δάπεδα και ως ερυθρή («Σουηδική») όταν χρησιμοποιείται για κουφώματα (Λεγάκις, 1991). Μετά από την κοπή των δένδρων λαμβάνουν μέρος κάποιες αρχικές μικρές προεργασίες και ακολούθως το ξύλο υπόκειται σε μία σειρά από διάφορες κατεργασίες μέχρι να πάρει την τελική του μορφή ως δομικό υλικό.

Στην Ελλάδα η ξυλεία χρησιμοποιείται τόσο στην κατασκευή στοιχείων με φέρουσα ικανότητα όπως είναι τα υποστυλώματα, οι δοκοί, οι στέγες, τα πλαίσια μεγάλων ανοιγμάτων όσο και σε δευτερεύουσα στοιχεία όπως οι πόρτες και τα παράθυρα. Τα βασικά πλεονεκτήματα του ξύλου είναι η εξαιρετική θερμομονωτική του ικανότητα, η καλή αισθητική, η υψηλή αντοχή σε σχέση με το βάρος και το γεγονός ότι μπορεί να κατεργαστεί εύκολα. Από την άλλη, το ξύλο χρήζει προστασίας έναντι περιβαλλοντικών (υγρασία, πυρκαγιά) και βιολογικών παραγόντων (μύκητες, έντομα).

1.5.1 Ιδιότητες και Χαρακτηριστικά Ξυλείας

Το ξύλο προσφέρει πολλά οφέλη ως δομικό υλικό, όπως η βιωσιμότητα, η ευελιξία, η αντοχή και η αισθητική. Η χρήση του στις κατασκευές εναρμονίζεται με τις τεχνολογικές εξελίξεις και καινοτομίες, καθιστώντας το ελκυστική επιλογή για την ανάπτυξη εντυπωσιακών σχεδίων και κατασκευών. Για τον λόγο αυτό, παρακάτω αναπτύσσονται μερικά χαρακτηριστικά της ξυλείας και ορισμένες σημαντικές μηχανικές ιδιότητες.

- **Μηχανικές Ιδιότητες:** Η μηχανική συμπεριφορά του ξύλου εξαρτάται σημαντικά από την πυκνότητα, την υγρασία και τη διεύθυνση φόρτισης σε σχέση με την διεύθυνση των ινών του. Το ξύλο είναι ένα ανισότροπο υλικό, που σημαίνει ότι οι ιδιότητές του ποικίλλουν ανάλογα με την κατεύθυνση του εφαρμοζόμενου φορτίου σε σχέση με την κατεύθυνση των ινών του. Η μηχανική του αντοχή στη διαμήκη διεύθυνση (παράλληλη με τις ίνες) είναι υψηλότερη από τις αντοχές σε ακτινική και εφαπτομενική κατεύθυνση. Τα εξωτερικά φορτία προκαλούν αξονικές και καμπτικές παραμορφώσεις στο ξύλο με αποτέλεσμα όταν ασκείται φόρτιση στην διαμήκη (αξονική) διεύθυνση τα τοιχώματα να παραμορφώνονται αξονικά ενώ όταν φορτίζονται στην εφαπτομενική ή ακτινική διεύθυνση να κάμπτονται (Τριανταφύλλου, 2013). Όσον αφορά την διάτμηση, το ξύλο έχει αντοχή που εξαρτάται και εδώ από τη σχέση που έχει η διεύθυνση της φόρτισης με τον προσανατολισμό των ινών, ωστόσο η διατμητική

του αντοχή είναι χαμηλότερη συγκριτικά με τις αντοχές του σε εφελκυσμό και θλίψη. Τέλος, στις ξύλινες κατασκευές είναι έντονο το φαινόμενο του ερπυσμού, δηλαδή της μακροχρόνιας φόρτισης υπό σταθερή τάση που ενδέχεται να προκαλέσει αστοχία όταν η τάση ξεπερνά ορισμένα όρια.

- **Αντοχή και Ανθεκτικότητα:** Το ξύλο παρουσιάζει υψηλή αντοχή σε σχέση με το βάρος του, ιδιαίτερα όταν υφίσταται κατάλληλη επεξεργασία και συντήρηση. Τα επεξεργασμένα προϊόντα ξύλου, όπως η συγκολλημένη πλαστικοποιημένη ξυλεία (glulam-glued laminated timber) προσφέρουν ενισχυμένη αντοχή και σταθερότητα, επιτρέποντας την κατασκευή έργων μεγάλης κλίμακας.
- **Ευελιξία:** Το ξύλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε διάφορες μορφές παρουσιάζοντας μια σχετική ευελιξία ανάλογα με τις δομικές και αισθητικές απαιτήσεις, με αποτέλεσμα να υπάρχουν προϊόντα ξυλείας όπως το κόντρα πλακέ και η συγκολλημένη πλαστικοποιημένη ξυλεία επιτρέποντας ευέλικτα και δημιουργικά σχέδια. Μερικά ξύλα είναι πιο εύκαμπτα από άλλα, ανάλογα με τον προσανατολισμό των ινών και τα δομικά τους χαρακτηριστικά.
- **Μόνωση:** Το ξύλο παρέχει μονωτικές ιδιότητες στην κατασκευή, εξασφαλίζοντας θερμική άνεση και ενεργειακή απόδοση στα κτίρια. Η κατασκευή ξύλινου σκελετού μπορεί να συμβάλλει στη μείωση του κόστους θέρμανσης και ψύξης, ελαχιστοποιώντας τις θερμογέφυρες και διατηρώντας ένα άνετο εσωτερικό περιβάλλον.
- **Αισθητική:** Το ξύλο προσφέρει μια φυσική ομορφιά ενισχύοντας την αισθητική των εσωτερικών χώρων και του εξωτερικού του κτιρίου. Η υφή του ξύλου δίνει την δυνατότητα να μπορεί να είναι εκτεθειμένο, να επεξεργαστεί ή να επικαλυφθεί καταλλήλως για να επιτευχθεί μια υψηλή αισθητική σχεδίασης και διακόσμησης.
- **Ρύθμιση υγρασίας:** Το ξύλο έχει υγροσκοπικές ιδιότητες, που σημαίνει ότι μπορεί να απορροφήσει και να απελευθερώσει την υγρασία στο περιβάλλον. Αυτή η φυσική ρύθμιση υγρασίας βοηθά στη διατήρηση των επιπέδων υγρασίας σε εσωτερικούς χώρους, αποτρέποντας την ανάπτυξη μούχλας και εξασφαλίζοντας ένα υγιές εσωτερικό περιβάλλον.
- **Ευκολία κατασκευής:** Το μικρό βάρος του ξύλου συγκριτικά με άλλα δομικά υλικά, κάνει ευκολότερη τη μεταφορά, την τροποποίηση και την εγκατάσταση στο εργοτάξιο. Χαρακτηριστικό είναι ότι με την μέθοδο κατασκευής ξύλινων πλαισίων έχει μειωθεί ο χρόνος κατασκευής και το κόστος εργασίας.

- **Συντήρηση:** Το ξύλο πρέπει να προστατεύεται από βιολογικούς και φυσικούς παράγοντες όπως είναι τα έντομα και η υγρασία, για να μην εμφανίσει φθορές. Επομένως, η τακτική συντήρηση με βαφές ή κάποια χημικά πρόσθετα για να θωρακίσουν το υλικό έναντι αυτών των παραγόντων είναι επιτακτική. Αυτό θα έχει ως συνέπεια να διατηρηθεί η δομική του ακεραιότητα και να παραταθεί η διάρκεια ζωής του.
- **Βιωσιμότητα και Περιβαλλοντικά Οφέλη:** Το ξύλο είναι ένας ανανεώσιμος πόρος που όταν συλλέγεται με υπευθυνότητα, σωστή διαχείριση και έλεγχο συμβάλλει στη βιωσιμότητα και σε ένα πολύ μικρό οικολογικό αποτύπωμα. Η ξυλεία παρουσιάζει χαμηλότερο αποτύπωμα άνθρακα συγκριτικά με άλλα υλικά δόμησης, ενώ η χρήση ξύλου στις κατασκευές μπορεί να συνεισφέρει στον μετριασμό της κλιματικής αλλαγής και να βοηθήσει στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Ακόμα, είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι τα προϊόντα ξυλείας απαιτούν λιγότερη ενέργεια για να παρασκευαστούν σε σύγκριση με άλλα βασικά δομικά υλικά όπως ο χάλυβας και το σκυρόδεμα.
- **Ανακυκλωσιμότητα:** Το ξύλο αποτελεί ένα βιώσιμο και εν δυνάμει ανακυκλώσιμο υλικό αφού μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί για την ίδια χρήση που επιτελούσε αρχικά ή να επεξεργαστεί κατάλληλα και να αλλάξει χρήση. Για παράδειγμα, μέσω της ανακύκλωσης τα απορρίμματα και τα υποπροϊόντα ξύλου μπορούν να μετατραπούν σε νέα σύνθετα υλικά ή καύσιμα (βιομάζα) περιορίζοντας τα απόβλητα και συμβάλλοντας σε μια κυκλική οικονομία.

Τα παραπάνω χαρακτηριστικά προβάλλουν τα οφέλη που έχει το ξύλο ως οικοδομικό υλικό, εστιάζοντας στην περιβαλλοντική βιωσιμότητα, τη δομική του απόδοση και την αισθητική που προσφέρει στην κατασκευή. Τα τελευταία χρόνια, η ανάγκη για περιορισμό του αποτυπώματος άνθρακα και η στροφή προς την βιωσιμότητα και την πράσινη ενέργεια, αναμένεται να αυξήσουν τον ρόλο του ξύλου ως δομικό υλικό στα κατασκευαστικά έργα προφέροντας καινοτόμες λύσεις (Tsoumis G.T., 2024).

1.5.2 Μορφές Δομικής Ξυλείας

Η δομική ξυλεία πρέπει να πληροί ορισμένα πρότυπα για να εξασφαλίσει την ασφάλεια και την καταλληλότητά της για χρήση σε κατασκευαστικά έργα. Αυτά τα πρότυπα συνήθως καθορίζουν κριτήρια αντοχής, μεγέθους, περιεκτικότητας σε υγρασία και άλλα χαρακτηριστικά. Ανάλογα με την προβλεπόμενη εφαρμογή και τις δομικές απαιτήσεις, η δομική ξυλεία μπορεί να

λάβει διάφορες μορφές και ταξινομείται με βάση την ποιότητα και την καταλληλότητά για διαφορετικές εφαρμογές. Οι πιο συχνές μορφές δομικής ξυλείας παρατίθενται ακολούθως :

- **Πριστή ξυλεία:** Η πριστή ξυλεία χρησιμοποιείται με τη μορφή δοκών για δομική στήριξη σε κτίρια, γέφυρες και άλλες κατασκευές. Αξιοποιείται στο κατασκευαστικό κλάδο ως το κύριο υλικό για δομικά πλαίσια, δάπεδα, καταστρώματα και επενδύσεις (Cabral J.P et al., 2022).
- **Σύνθετη συγκολλημένη ξυλεία (glulam):** Η συγκολλημένη ξυλεία αποτελεί ένα δομικό στοιχείο που έχει προκύψει από την συγκόλληση πολλαπλών στρωμάτων πριστής ξυλείας. Η συγκόλληση μπορεί να γίνει είτε επάλληλα (το ένα επάνω στο άλλο) ή σπανιότερα, σε παράθεση (το ένα δίπλα στο άλλο) με κόλλες υπό πίεση, για να δώσουν ευθύγραμμα ή καμπύλα μέλη διαφόρων διατομών (Stalnaker & Harris, 1989). Ουσιαστικά, πρόκειται για προϊόντα ξύλου που έχουν σχεδιαστεί με σκοπό να παρέχουν βελτιωμένη αντοχή, σταθερότητα και συνοχή διαστάσεων σε σχέση με τη συμπαγή ξυλεία.
- **Αντικολλητό ξύλο:** Το αντικολλητό ξύλο ή αλλιώς κόντρα πλακέ σχηματίζεται όταν συγκολλούνται υπό πίεση και υψηλές θερμοκρασίες λεπτά φύλλα ξύλου σε διαδοχικές στρώσεις εκατέρωθεν του κεντρικού φύλλου με τη διεύθυνση των ινών να είναι πάντα κάθετη μεταξύ τους. Το κόντρα πλακέ έχει μεγάλη μηχανική αντοχή και μικρή υγροσκοπικότητα ενώ συνδυάζεται με την πριστή ξυλεία για την κατασκευή ελαφριών στοιχείων με μεγάλη αντοχή και ακαμψία (Τριανταφύλλου, 2013).
- **Μοριοσανίδες:** Οι μοριοσανίδες, οι οποίες είναι γνωστές και ως νοβοπάν, αποτελούν επιφανειακά στοιχεία με μικρό πάχος, που έχουν προκύψει από την συγκόλληση τριμμάτων και περισσευμάτων ξυλείας, με ισχυρή κόλλα και χαρακτηρίζονται από περιορισμένη αντοχή και μικρό κόστος. Χρησιμοποιούνται ιδιαίτερα σε ξυλότυπους και σε τοιχοπετάσματα ενώ αν αναμειχθεί με τσιμέντο αντί για κόλλα, το σύνθετο αυτό υλικό παρουσιάζει μεγάλη ανθεκτικότητα και επιλέγεται για μονώσεις σε τοίχους και οροφές (Τριανταφύλλου, 2013).
- **Ινοσανίδες**: Οι ινοσανίδες χαρακτηρίζονται από τις εξαιρετικές του ηχομονωτικές και θερμομονωτικές τους ιδιότητες ωστόσο παρουσιάζουν μικρή πυκνότητα και κάποιες μηχανικές τους ιδιότητες είναι μικρότερες συγκριτικά με άλλες μορφές δομικής ξυλείας. Ωστόσο, με την ένταξη ορισμένων πρόσθετων μπορούν να βελτιωθούν οι μηχανικές του ιδιότητες και σε κάποιες εφαρμογές να προτιμηθούν έναντι του αντικολλητού ξύλου. (material-properties.org, 2023)

1.6 Κεραμικά

Τα προϊόντα που προκύπτουν από την όπτηση πηλού και προσδίδουν στις κατασκευές αντοχή, θερμομονωτικές και άλλες ιδιότητες ονομάζονται κεραμικά οικοδομικά στοιχεία. Ο πηλός αποτελεί ένα αργιλικό κονίαμα που αναμειγνύεται με λεπτή άμμο και νερό, το οποίο αφού καθοριστεί το σχήμα του με την βοήθεια καλουπιών, ξηραίνεται σε αέρα, ψήνεται σε κάμινο και εν τέλει ψύχεται για να προκύψουν τα κεραμικά προϊόντα (Λεγάκις, 1992).

Το είδος και τα χαρακτηριστικά του προϊόντος καθορίζεται από τη θερμοκρασία όπτησης, τη διάμετρο των κόκκων και τις αναλογίες του κονιάματος. Συνεπώς, με βάση τις παραπάνω ιδιότητες προκύπτουν τελικά δομικά κεραμικά προϊόντα όπως τα κεραμίδια, οι οπτόπλινθοι (τούβλα), τα πλακάκια και οι πλάκες επίστρωσης.

1.6.1 Τύποι Δομικών Κεραμικών

- **Κεραμίδια:** Τα κεραμίδια τοποθετούνται σε στέγες κτιρίων όπου κατά κύριο λόγο επικρατούν ζεστές θερμοκρασιακές συνθήκες. Αυτό συμβαίνει επειδή τα κεραμίδια έχουν θερμομονωτικές ιδιότητες και την ικανότητα να αντανακλούν το φως του ήλιου, ενώ παράλληλα είναι πυρίμαχα υλικά και ιδιαίτερα ανθεκτικά στις καιρικές συνθήκες και στην υγρασία. Το προφίλ και το σχήμα των κεραμιδιών καθορίζει την ικανότητά τους να απομακρύνουν νερό, να αντιστέκονται στην ανύψωση του ανέμου και να βελτιώνουν την αισθητική και να δημιουργούν αρχιτεκτονικές λεπτομέρειες.
- **Πλακάκια:** Τα κεραμικά πλακίδια τοποθετούνται συνήθως σε δάπεδα, τοίχους και πάγκους κάθε μορφής κτιρίου. Παρουσιάζουν καλή ανθεκτικότητα σε υγρασία, καθαρίζονται εύκολα και είναι κατάλληλα για χώρους όπως μπάνια και κουζίνες που είναι εκτεθειμένες στο νερό. Επίσης, διαθέτουν μεγάλη ποικιλία στο μέγεθος, την ποιότητα, το σχέδιο και το χρώμα επιτρέποντας διαφορετικές επιλογές διακόσμησης.
- **Κεραμικά μονωτικά υλικά:** Αποτελούν κεραμικά υλικά υψηλής τεχνολογίας με χαρακτηριστικότερα παραδείγματα τις κεραμικές ίνες και τα αφρώδη κεραμικά, τα οποία προσδίδουν ηχομόνωση και θερμομόνωση στα κτίρια. Επίσης, έχουν μικρό βάρος και είναι ανθεκτικά σε υψηλές θερμοκρασίες, περιορίζουν τις απώλειες θερμότητας και βελτιώνουν την ενεργειακή απόδοση του κτιρίου.

- **Οπτόπλινθοι:** Τα τούβλα, γνωστά στην βιβλιογραφία και ως οπτόπλινθοι, αποτελούν ένα από τα παλαιότερα οικοδομικά υλικά που χρησιμοποιούνται στις κατασκευές. Το σχήμα τους είναι τυπικά ορθογωνικό ενώ υπάρχουν ποικίλες επιλογές για το μέγεθος, την υφή και το χρώμα, για να μπορούν να εξυπηρετηθούν διακοσμητικοί σκοποί. Το υλικό κατασκευής τους μπορεί να είναι πηλός, σχιστόλιθος ή σκυρόδεμα ενώ χρησιμοποιούνται για την κατασκευή προσόψεων, φερόντων τοιχίων και άλλων δομικών στοιχείων (The Constructor, 2017).

1.6.2 Οπτόπλινθοι

Οι οπτόπλινθοι αποτελούν το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο κεραμικό δομικό υλικό παρουσιάζοντας διάφορους τύπους και εξαιρετικές ιδιότητες, βρίσκοντας πολλές εφαρμογές σε κατασκευές. Για τον λόγο αυτό, θα γίνει εκτενέστερη αναφορά ως προς τις ιδιότητες, τον τύπο, την μορφή και το σχήμα των τούβλων.

Όπως ήδη αναφέρθηκε, τα τούβλα αποτελούνται κυρίως από πηλό, αλλά μπορούν επίσης να κατασκευαστούν από άλλα υλικά όπως ο σχιστόλιθος και το σκυρόδεμα. Οι οπτόπλινθοι δίνουν στα κτίρια, σημαντικές ιδιότητες όπως η θλιπτική αντοχή στα φέροντα τοιχία, η ανθεκτικότητα στις καιρικές συνθήκες και η θερμομόνωση, ενώ προσφέρουν ιδιαίτερη αισθητική σε εξωτερικούς χώρους. Συνάμα, τα τούβλα προστατεύουν από συνθήκες παγετού ή υγρασίας ενώ παράγονται με οπές στον πυρήνα τους για να επιτρέπουν επιπλέον στήριξη από χαλύβδινες ράβδους, καθιστώντας τα ιδανική επιλογή για θεμέλια και υποδομές όπως σήραγγες. Μερικά από αυτά τα χαρακτηριστικά τους αναλύονται περαιτέρω ακολούθως.

- **Αντοχή και Ανθεκτικότητα:** Τα τούβλα παρουσιάζουν εξαιρετική θλιπτική αντοχή και για αυτό χρησιμοποιούνται ως φέροντα τοιχία στις κατασκευές. Ωστόσο, πρέπει να σημειωθεί ότι η αντοχή σε θλίψη εξαρτάται από τη σύνθεση του τούβλου και από τη θερμοκρασία όπτησης. Παράλληλα, οι οπτόπλινθοι είναι πολύ ανθεκτικοί στις καιρικές συνθήκες, τη φωτιά και τα παράσιτα. Μάλιστα, όσον αφορά την ανθεκτικότητα σε πυρκαγιά, είναι γνωστό ότι τα τούβλα από πυλό όταν εκτίθενται στη φωτιά, δεν καίγονται και ούτε απελευθερώνουν τοξικά αέρια στο περιβάλλον.
- **Μόνωση:** Τα τούβλα παρέχουν εξαιρετική ηχομόνωση και καλές θερμομονωτικές ιδιότητες συμβάλλοντας στη μείωση του θορύβου και της κατανάλωσης ενέργειας για ρύθμιση της θερμοκρασίας αντίστοιχα.

- **Ευελιξία:** Τα τούβλα μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε πολλά μέρη του κτιρίου από φέροντες τοίχους μέχρι προσόψεις, χωρίσματα και διακοσμητικά στοιχεία.
- **Συντήρηση:** Οι κατασκευές από τούβλα δεν χρειάζονται μεγάλη συντήρηση συγκριτικά με άλλα δομικά υλικά καθώς οι οπτόπλινθοι είναι ιδιαίτερα ανθεκτικοί στη φθορά του χρόνου και τις καιρικές συνθήκες.
- **Περιβαλλοντικά Οφέλη:** Τα τούβλα κατασκευάζονται από φυσικά υλικά που βρίσκονται σε μεγάλο απόθεμα κι έχουν μικρή ενσωματωμένη ενέργεια. Οι θερμομονωτικές τους ιδιότητες μπορούν να συμβάλουν στην ενεργειακή απόδοση στα κτίρια και τη μείωση των εκπομπών.

Παρά τα πολλά πλεονεκτήματά τους, τα τούβλα παρουσιάζουν και ορισμένα ζητήματα με κυριότερο θέμα το βάρος τους, το οποίο ενδέχεται να απαιτεί πρόσθετη δομική στήριξη. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δίνεται ακόμα στη τοποθέτηση και συντήρηση έτσι ώστε να μην υπάρξει φθορά ή προκύψουν ζημιές από νερό. Συνολικά όμως, οι οπτόπλινθοι προσφέρουν έναν πολύ καλό συνδυασμό ελκυστικότητας, ανθεκτικότητας, θερμομόνωσης, αντοχής στις καιρικές συνθήκες και περιβαλλοντικής βιωσιμότητας που τους καθιστούν κατάλληλους για διάφορες κατασκευαστικές εφαρμογές. Η ευελιξία και η προσαρμοστικότητά τους σε διαφορετικές σχεδιαστικές απαιτήσεις συμβάλλουν στη συνεχή επιλογή τους σε σύγχρονα κτιριακά έργα.

1.6.3 Τύποι Τούβλων

Διαφορετικές τεχνικές κατασκευής μπορούν να οδηγήσουν σε διαφορετικούς τύπους και ιδιότητες τούβλων καθώς και αισθητικά αποτελέσματα. Τα τούβλα έχουν ως επί το πλείστον ορθογώνιο σχήμα, με καλά καθορισμένες αιχμηρές άκρες και ομοιόμορφη επιφάνεια, ανεξαρτήτως από τον τύπο τους. Τα τούβλα υψηλής ποιότητας κατασκευάζονται από καλά επιλεγμένο πηλό και ψήνονται σε ελεγχόμενες θερμοκρασίες για να επιτευχθεί η επιθυμητή αντοχή και ανθεκτικότητα. Υπάρχουν τρεις μεγάλες κατηγορίες τούβλων: τα μηχανικά τούβλα, τα τούβλα για πρόσοψη και τα κοινά τούβλα δόμησης (www.buildingmaterials.co.uk).

- **Μηχανικά τούβλα:** Τα συγκεκριμένα παρουσιάζουν υψηλή αντοχή σε θλίψη, έχουν χαμηλή απορρόφηση νερού και επιλέγονται κυρίως για τις ιδιότητες που προσδίδουν στην κατασκευή.

- **Τούβλα για πρόσοψη:** Αποτελούν τον πιο κοινό τύπο οικοδομικών τούβλων και χρησιμοποιούνται κυρίως σε εξωτερικούς τοίχους. Συνεπώς οι αισθητική τους είναι σχεδόν εξίσου σημαντική με την αντοχή σε νερό και φωτιά.
- **Κοινά τούβλα:** Τα κοινά τούβλα έχουν κατασκευαστεί από πηλό και χρησιμοποιούνται σε πολλούς εσωτερικούς και εξωτερικούς χώρους. Σε αντίθεση με τα τούβλα για πρόσοψη, τα κοινά τούβλα έχουν τραχιά υφή και κοκκινωπό χρώμα, ενώ τα τούβλα με πρόσοψη μπορεί να έχουν διάφορες αποχρώσεις και σχεδόν λεία επιφάνεια. Τα μεγέθη και οι διαστάσεις των τούβλων ενδέχεται να διαφέρουν από χώρα σε χώρα, ωστόσο είναι ικανά να αντέξουν μεγάλα φορτία και να προσφέρουν σημαντική αντοχή (Daziel, 2021)

1.7 Φυσικοί Λίθοι

Οι δομικοί λίθοι αποτελούν ένα από τα παλαιότερα οικοδομικά υλικά που χρησιμοποιείται από την αρχαιότητα μέχρι και σήμερα. Η πέτρα υπάρχει σε αφθονία στη φύση, παρουσιάζει μεγάλη αντοχή και καθίσταται δημοφιλή επιλογή για κτιριακά έργα. Παράλληλα, παρουσιάζει μικρές περιβαλλοντικές επιπτώσεις καθώς δεν χρειάζεται εκτεταμένη επεξεργασία και δεν εκπέμπει ρύπους. Υπάρχουν αρκετοί τύποι λίθων, οι οποίοι διακρίνονται με βάση την ανθεκτικότητα, τη σκληρότητα και κάποιες ειδικές ιδιότητες. Συγκεκριμένα στις κατασκευές χρησιμοποιούνται λίθοι όπως το μάρμαρο, ο ασβεστόλιθος, ο βασάλτης, ο σχιστόλιθος, ο ψαμμίτης και ο γρανίτης. Κάθε τύπος από τους παραπάνω λίθους προσφέρεται για διαφορετικές κατασκευαστικές εφαρμογές με βάση τα μοναδικά χαρακτηριστικά του.

1.7.1 Ιδιότητες Φυσικών Λίθων

Η επιλογή της πέτρας ως δομικό υλικό παρέχει πολλαπλά οφέλη στις κατασκευές καθώς χρησιμοποιείται για επένδυση, πλακόστρωση, πάγκους εργασίας και άλλα διακοσμητικά στοιχεία στα κτίρια, καλύπτοντας τις διαφορετικές ανάγκες του κατασκευαστικού τομέα. Οι φυσικοί λίθοι προσφέρουν ανθεκτικότητα και μια καλή αισθητική τόσο στους εξωτερικούς όσο και στους εσωτερικούς χώρους των κτιρίων. Στη συνέχεια επισημαίνονται μερικά ακόμη πλεονεκτήματα της πέτρας στις κατασκευές.

- **Ανθεκτικότητα:** Η φυσική πέτρα έχει μεγάλη αντοχή στο χρόνο και είναι ιδιαίτερα ανθεκτική στις καιρικές συνθήκες, τη διάβρωση και τους περιβαλλοντικούς παράγοντες. Επίσης, αποτελεί ένα πυρίμαχο υλικό καθώς πολλοί τύποι φυσικής πέτρας, όπως ο

γρανίτης και ο σχιστόλιθος, είναι εγγενώς ανθεκτικοί στη φωτιά και για αυτό χρησιμοποιούνται σε κατασκευές υψηλής ποιότητας παρέχοντας πρόσθετη ασφάλεια και προστασία. Όσον αφορά τη συντήρηση, οι λίθινες κατασκευές δεν απαιτούν μεγάλη συντήρηση συγκριτικά με άλλα οικοδομικά υλικά και μπορούν να παραμείνουν όρθιες για μεγάλα χρονικά διαστήματα.

- **Περιβαλλοντικά οφέλη:** Οι φυσικοί λίθοι θεωρούνται οικολογικά υλικά καθώς δεν υφίστανται μεγάλη επεξεργασία, δεν εκπέμπουν ρύπους και έχουν ελάχιστες περιβαλλοντικές επιπτώσεις και ενεργειακές ανάγκες. Ουσιαστικά, αποτελούν ένα βιώσιμο υλικό το οποίο προέρχεται από λατομεία και μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί σε άλλα έργα μέσω της ανακύκλωσης. περιορίζοντας κατά αυτόν τον τρόπο το οικολογικό αποτύπωμα των κατασκευών.
- **Μόνωση:** Οι λίθοι προσφέρουν ηχομονωτικά και θερμομονωτικά χαρακτηριστικά στα κτίρια συνεισφέροντας στον περιορισμό του θορύβου και στη μείωση της καταναλισκόμενης ενέργειας για ψύξη και θέρμανση. Η πέτρα έχει ιδιότητες υψηλής θερμικής μάζας, που σημαίνει ότι μπορεί να απορροφήσει και να αποθηκεύσει θερμότητα από το περιβάλλον. Κατά τη διάρκεια της ημέρας, όταν οι θερμοκρασίες είναι υψηλότερες, η πέτρα απορροφά θερμότητα και κατά τις ψυχρότερες περιόδους, όπως τη νύχτα, απελευθερώνει θερμότητα αργά. Συνεπώς, μπορεί να βοηθήσει στη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης, της θερμικής άνεσης και της ποιότητας του εσωτερικού αέρα στα κτίρια. Βέβαια, κάθε λίθος έχει ξεχωριστά χαρακτηριστικά και ιδιότητες με αποτέλεσμα οι θερμικές και οι ακουστικές ιδιότητες να διαφέρουν.
- **Αισθητική:** Οι φυσικοί λίθοι εκτιμώνται για τη φυσική τους ομορφιά, τις μοναδικές υφές και τα πλούσια χρώματα, ενισχύοντας τη συνολική αξία και την ελκυστικότητα των κτιρίων και δημιουργώντας μια υψηλή αισθητική. Συνάμα, οι λίθοι μπορούν να κοπούν, να φινιριστούν και να διαμορφωθούν με διαφορετικούς τρόπους επιτρέποντας ποικίλες επιλογές σχεδίασης που ταιριάζουν με διαφορετικά στυλ και περιβάλλοντα και ικανοποιούν αρχιτεκτονικά σχέδια. Τα έργα που χρησιμοποιούν φυσική πέτρα παρουσιάζουν απαράμιλλο χαρακτήρα, προσθέτοντας μια μοναδική και διαχρονική αισθητική έλξη σε κτίρια και κατασκευές.

Τα παραπάνω χαρακτηριστικά αποδεικνύουν ότι οι φυσικοί λίθοι προτιμώνται ως δομικό υλικό λόγω της ανθεκτικότητάς τους, της υψηλής αισθητικής και της φιλικότητας προς το

περιβάλλον. Ωστόσο, παρά τα πολλά πλεονεκτήματά τους, παρουσιάζουν ορισμένα ζητήματα και περιορισμούς ως προς τη χρήση τους. Οι φυσικοί λίθοι έχουν μεγάλο βάρος και απαιτούν πρόσθετα κόστη για την τροποποίηση, τη μεταφορά και την εγκατάσταση τους στην περιοχή του έργου, αυξάνοντας το κόστος και την ενσωματωμένη ενέργεια τους. Επιπλέον, τόσο η διαθεσιμότητα όσο και το κόστος τους μπορεί να ποικίλλει ανάλογα με την τοποθεσία, τον τύπο και την ποιότητα των λίθων, συνεπώς κατά την επιλογή των δομικών υλικών μιας νέας κατασκευής πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν και αυτοί οι παράγοντες.

1.7.2 Μειονεκτήματα Φυσικών Λίθων

- **Βάρος και πάχος:** Οι φυσικοί λίθοι έχουν μεγάλο βάρος και συνήθως πάχος με αποτέλεσμα να μειώνουν το εκμεταλλεύσιμο εμβαδόν των εσωτερικών χώρων. Η ευελιξία στον σχεδιασμό δεν είναι πάντα εφικτή, επιδρώντας στην εφικτότητα του αρχικού σχεδιασμού. Το βάρος των λίθων δημιουργεί παραπάνω απαιτήσεις και ζητήματα στη μεταφορά, την τροποποίηση και την εγκατάσταση τους στην κατασκευή. Αυτό έχει ως συνέπεια να απαιτείται ειδικός εξοπλισμός και να αυξάνεται η πολυπλοκότητα και το κόστος του έργου. Παράλληλα, ο δύσκολος χειρισμός τους αυξάνει τον κίνδυνο ατυχημάτων και απαιτεί πρόσθετα μέτρα προστασίας κι ασφάλειας.
- **Εξειδικευμένο εργατικό προσωπικό:** Οι λίθινες κατασκευές απαιτούν εξειδικευμένους εργάτες και τεχνίτες έτσι ώστε να εξασφαλιστεί η ποιότητα και το επιθυμητό αισθητικό αποτέλεσμα. Η πέτρα μπορεί να έχει περιορισμούς όσον αφορά την ευελιξία του σχεδιασμού σε σύγκριση με άλλα υλικά όπως το σκυρόδεμα ή ο χάλυβας. Η επίτευξη πολύπλοκων σχημάτων και καμπύλων απαιτεί δεξιοτεχνία και εξειδικευμένες τεχνικές. Σφάλματα κατά τη δόμηση δεν διορθώνονται εύκολα και οι επισκευές ή οι τροποποιήσεις είναι απαιτητικές και χρειάζονται χρόνο και κόστος.
- **Κόστος:** Η επιλογή της πέτρας ως δομικό υλικό έχει συνήθως μεγαλύτερο κόστος συγκριτικά με άλλα οικοδομικά υλικά, αν και αυτό εξαρτάται από το είδος και την ποιότητα του λίθου. Το υψηλό κόστος δεν οφείλεται αποκλειστικά στο ίδιο το υλικό αλλά και στην ανάγκη για εξειδικευμένο εργατικό προσωπικό και εξοπλισμό, στη διαθεσιμότητα του πετρώματος και στα έξοδα μεταφοράς των λίθων από το λατομείο, τα οποία προσαυξάνονται λόγω του βάρους τους.

- **Χρόνος:** Τα έργα λιθοδομής είναι συνήθως χρονοβόρα εξαιτίας της μεταφοράς από τα λατομεία στο εργοτάξιο και της απαιτητικής διαδικασίας τροποποίησης για να λάβουν το τελικό τους σχήμα, καθυστερώντας το χρονοδιάγραμμα των έργων.
- **Διαθεσιμότητα:** Ορισμένοι τύποι φυσικών λίθων παρουσιάζουν περιορισμένη διαθεσιμότητα ενώ ενδέχεται η μεταφορά τους να γίνεται από απομακρυσμένες περιοχές, αυξάνοντας έτσι το κόστος και τις εκπομπές ρύπων κατά τη μεταφορά.
- **Ποιότητα:** Η φυσική πέτρα δεν έχει τυποποιημένη μορφή, καθώς ποικίλλει σε ποιότητα ανάλογα με τις μεθόδους επεξεργασίας. τις τεχνικές εξόρυξης και τον γεωλογικό σχηματισμό. Συνεπώς, εμφανίζονται παραλλαγές σε υφή, χρώμα και πορώδες, επηρεάζοντας την εμφάνιση και την ποιότητα της πέτρας στο έργο.
- **Ευθραυστότητα:** Η ευθραυστότητα των δομικών λίθων μπορεί να διαφέρει ανάλογα με τον τύπο της πέτρας, έτσι λίθοι όπως το μάρμαρο είναι πιο επιρρεπείς σε θρυμματισμό και ρωγμές συγκριτικά με σκληρότερους λίθους (γρανίτης, χαλαζίτης).
- **Περιβαλλοντικές επιπτώσεις:** Οι τεχνικές εξόρυξης και οι μέθοδοι επεξεργασίας των φυσικών λίθων μπορεί να οδηγήσουν σε μεγάλες καταναλώσεις ενέργειας και εκπομπές άνθρακα καθώς και να αλλοιώσουν το φυσικό τοπίο από το οποίο εξάγονται. Ωστόσο, χρησιμοποιώντας βιώσιμες πρακτικές όπως η ανακύκλωση, η υπεύθυνη προμήθεια και η μείωση των απορριμμάτων οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις μπορούν να περιοριστούν.

Οι παραπάνω περιορισμοί καταδεικνύουν τις προκλήσεις που σχετίζονται με την χρήση φυσικών λίθων ως δομικό υλικό. Η φυσική πέτρα παρά την αισθητική της γοητεία και την ανθεκτικότητά της, παρουσιάζει μεγάλο βάρος, κόστος και αυξημένες απαιτήσεις σε εργασίες. Ωστόσο, με την προσεκτική εξέταση των μειονεκτημάτων και την αντιμετώπισή τους, μέσω του κατάλληλου σχεδιασμού και συντήρησης, η χρήση πέτρας μπορεί να οδηγήσει σε εντυπωσιακά και ανθεκτικά αρχιτεκτονικά έργα (Valle G., 2022).

1.8 Γυαλί

Τα τελευταία χρόνια το γυαλί έχει εξελιχθεί σε ένα σημαντικό και ευέλικτο δομικό υλικό που προσφέρει ιδιαίτερη αισθητική στην σύγχρονη αρχιτεκτονική και βρίσκει πολλές εφαρμογές σε νέα κτίρια. Η χρήση γυαλιού ενισχύει τον φυσικό φωτισμό, αναβαθμίζει την αισθητική και συμβάλλει στην ενεργειακή απόδοση του κτιρίου. Παράλληλα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε

παράθυρα και επενδύσεις καθώς και ως μονωτικό υλικό, προσφέροντας κομψότητα και ευελιξία στο σχεδιασμό κτιριακών έργων. Η ελκυστική του όψη και η προσαρμοστικότητα του υλικού το καθιστούν μια δημοφιλή επιλογή σε καινοτόμα αρχιτεκτονικά έργα, συμβάλλοντας σε ένα βιώσιμο σχεδιασμό κτιρίων. Τουναντίον, η επιλογή του γυαλιού ως δομικό υλικό συνοδεύεται από ορισμένες προκλήσεις, με πιο χαρακτηριστικές την ευθραυστότητα, την εξασφάλιση ιδιωτικότητας και το κόστος. Για τον λόγο αυτό, πριν την επιλογή του γυαλιού ως υλικού δόμησης, πρέπει να μελετώνται προσεκτικά όλες οι παράμετροι και να λαμβάνεται μια ορθή απόφαση με βάση τις συνθήκες και τις απαιτήσεις του έργου.

1.8.1 Ιδιότητες Γυαλιού

- **Φωτισμός:** Η διαφάνεια του γυαλιού επιτρέπει στο φως να περάσει μέσα στο κτίριο, μειώνοντας την ανάγκη για τεχνητό φωτισμό κατά τη διάρκεια της ημέρας και δημιουργώντας ένα φωτεινό χώρο. Αυτό όχι μόνο εξοικονομεί ενέργεια, αλλά βελτιώνει επίσης την ευημερία των κατοίκων παρέχοντας πρόσβαση στο φυσικό φως, το οποίο επηρεάζει θετικά τη διάθεση και την παραγωγικότητα.
- **Ενεργειακή απόδοση:** Η τεχνολογική ανάπτυξη του γυαλιού οδήγησε σε τεχνολογίες που συμβάλλουν στην ελαχιστοποίηση της μεταφοράς θερμότητας, στη μείωση των φορτίων θέρμανσης και ψύξης και στη βελτίωση της συνολικής ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων. Το γυαλί, όταν συνδυάζεται με ενεργειακά αποδοτικά στοιχεία, όπως παράθυρα με διπλά τζάμια, μονωτικούς υαλοπίνακες και επιστρώσεις χαμηλής εκπομπής, μπορεί να συμβάλει στη μείωση της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας ενός κτιρίου.
- **Ηχομόνωση:** Το γυαλί μπορεί να προσφέρει αποτελεσματική ηχομόνωση, συμβάλλοντας στη μείωση της μετάδοσης θορύβου, δημιουργώντας πιο άνετους χώρους διαβίωσης και εργασίας. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό σε αστικές περιοχές ή κτίρια που βρίσκονται κοντά σε πολυσύχναστους δρόμους ή αεροδρόμια.
- **Αισθητική και Ευελιξία:** Το γυαλί προσθέτει μια μοντέρνα και κομψή εμφάνιση στα κτίρια, βελτιώνει τη θέα στο περιβάλλον και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε διάφορα μεγέθη, σχήματα, χρώματα και υφές για να δημιουργήσει μοναδικά και ελκυστικά σχέδια. Παράλληλα, προσφέρει υψηλό βαθμό σχεδιαστικής ευελιξίας, δίνοντας δημιουργικές και καινοτόμες λύσεις σε ένα ευρύ φάσμα αρχιτεκτονικών σχεδίων.

- **Ανθεκτικότητα και Αντοχή:** Με την εξέλιξη της τεχνολογίας, οι νέοι τύποι υαλοπινάκων παρουσιάζουν αξιόλογη αντοχή και ανθεκτικότητα στη φθορά λόγω καιρικών συνθηκών και θερμοκρασιακών μεταβολών, διατηρώντας σταθερότητα των διαστάσεων και χαμηλή τιμή θερμικής διαστολής. Μάλιστα, ορισμένοι τύποι γυαλιού, όπως το σκληρυμένο ή το πολυστρωματικό γυαλί, διαθέτουν σημαντική αντοχή σε εφελκυσμό και μπορούν να αντέξουν σημαντικά φορτία και ανεμοπιέσεις (Valle G., 2021).

1.8.2 Μειονεκτήματα Χρήσης Γυαλιού

Το γυαλί προσφέρει πολλά οφέλη ως υλικό και χρησιμοποιείται ευρέως στα σύγχρονα έργα, όμως πέρα από τα πλεονεκτήματά του, πρέπει να εξετάζονται προσεκτικά και οι περιορισμοί που το συνοδεύουν, έτσι ώστε να προκύψει το βέλτιστο αποτέλεσμα σχεδιασμού και κατασκευής.

- **Ευθραυστότητα:** Ο απλός τύπος γυαλιού είναι εύθραυστος και καταπονείται υπό την άσκηση φορτίων και πιέσεων, για τον λόγο αυτό δεν ενδείκνυται για σεισμογενείς περιοχές καθώς ο κίνδυνος κατάρρευσης είναι υπαρκτός. Ωστόσο, υπάρχουν ορισμένοι τύποι γυαλιού, όπως το σκληρυμένο ή το πολυστρωματικό γυαλί, που διαθέτουν σημαντική αντοχή και μπορούν να αντέξουν σημαντικά φορτία και κρούσεις.
- **Απορρόφηση θερμότητας:** Το γυαλί έχει την ιδιότητα να επιτρέπει στην ηλιακή ακτινοβολία να το διαπερνά, παγιδεύοντας όμως ποσά θερμότητας και οδηγώντας σε αυξημένες θερμοκρασίες στο εσωτερικό των κτιρίων, οι οποίες δεν είναι πάντα επιθυμητές. Αν και οι σύγχρονες τεχνολογίες γυαλιού έχουν βελτιώσει τη θερμική απόδοση, η υψηλή θερμική αγωγιμότητα του υλικού οδηγεί σε υψηλότερα φορτία θέρμανσης.
- **Κόστος:** Το γυαλί υψηλής ποιότητας και βελτιωμένης ενεργειακής απόδοσης εμφανίζει υψηλό κόστος σε σύγκριση με άλλα οικοδομικά υλικά, αυξάνοντας αισθητά το συνολικό κόστος της κατασκευής. Επιπλέον, το κόστος εγκατάστασης και ασφάλειας ενδέχεται να είναι υψηλότερο λόγω της εξειδικευμένης τεχνογνωσίας που απαιτείται για την εγκατάσταση υαλοπινάκων και για τα μέτρα προστασίας που πρέπει να ληφθούν.
- **Ιδιωτικότητα και Ασφάλεια:** Η διαφάνεια του γυαλιού στην απλή του μορφή δεν προσφέρει ιδιωτικότητα στο χώρο και απαιτεί πρόσθετα μέτρα και επιπλέον κόστος ώστε να τροποποιηθεί κατάλληλα. Συνάμα, οι υαλοπίνακες που τοποθετούνται σε μεγάλα ανοίγματα, απαιτούν χρήση εξειδικευμένων τύπου και αντοχής γυαλιών, όπως το σκληρυμένο και το πολυστρωματικό γυαλί για να υπάρξει μεγαλύτερη ασφάλεια (Lad K., 2019).

1.9 Πολυμερή

Τα πολυμερή αποτελούν τα τελευταία χρονικά δομικά υλικά που εισήχθησαν στον κατασκευαστικό κλάδο, ωστόσο προσφέρουν επιθυμητές ιδιότητες και έχουν σημαντικό ρόλο στα σύγχρονα έργα. Τα πολυμερή μπορούν να συνδυαστούν με ίνες (οπλισμένα) ή να χρησιμοποιηθούν αυτούσια (άοπλα) στις κατασκευές και χαρακτηρίζονται από μικρό βάρος, περιορισμένη θερμική αγωγιμότητα και υγροαπορροφητικότητα καθώς και από την υψηλή ανθεκτικότητα σε διάβρωση και χημικές ουσίες. Παράλληλα, ο συνδυασμός των πολυμερών με ίνες, αυξάνει την αντοχή και βελτιώνει τις μηχανικές ιδιότητες σε επιλεγμένες διευθύνσεις, ενώ το κόστος παραμένει χαμηλότερο σε σχέση με την επιλογή άλλων δομικών υλικών.

Τα πολυμερή περιλαμβάνουν πλαστικά, καουτσούκ, θερμοπλαστικά, ελαστομερή, κόλλες, αφρούς, και σφραγιστικά, βρίσκοντας διάφορες εφαρμογές σε δάπεδα, παράθυρα, επενδύσεις, σωληνώσεις, μεμβράνες, στεγανοποιήσεις και μονώσεις. Τα τελευταία χρόνια η χρήση πολυμερών στις κατασκευές αυξάνεται με γοργούς ρυθμούς και νέες εφαρμογές εμφανίζονται συνεχώς. Τουναντίον, δεν έχει ακόμη αποσαφηνιστεί αν οι ιδιότητές των πολυμερών φθίνουν με τον χρόνο ή την επίδραση εξωτερικών παραγόντων, και αν υπάρχει η δυνατότητα να ανακυκλωθούν και να επαναχρησιμοποιηθούν μελλοντικά ή να απορριφθούν. Συνεπώς, υπάρχει προβληματισμός σχετικά με την αειφορία και βιωσιμότητά τους.

1.9.1 Ιδιότητες Πολυμερών

Η χρήση πολυμερών υλικών στις κατασκευές έχει πολλά οφέλη αλλά ταυτόχρονα πολλά ζητήματα και περιορισμούς που πρέπει να ληφθούν υπόψη. Μολονότι, τα πολυμερή προσφέρουν εξαιρετική αντοχή σε σχέση με το βάρος, μονωτικές ιδιότητες και ενδεχομένως χαμηλότερο κόστος σε σχέση με άλλα υλικά, δεν πρέπει να παραληφθεί ότι πρόκειται για εύφλεκτα υλικά που εκπέμπουν τοξικούς ρύπους όταν καίγονται. Ακολούθως, γίνεται αναφορά στις ιδιότητες των πολυμερών και στα μειονεκτήματα που παρουσιάζουν.

- **Αντοχή και Ανθεκτικότητα:** Τα δομικά υλικά που βασίζονται στα πολυμερή παρουσιάζουν εξαιρετική αντοχή, (ιδιαίτερα τα οπλισμένα πολυμερή) εξασφαλίζοντας δομική ακεραιότητα να αντέχουν μεγάλα φορτία και επιβαλλόμενες συνθήκες. Παράλληλα, οι περισσότεροι τύποι πολυμερών θεωρούνται ιδανικοί για εξωτερικές εφαρμογές καθώς είναι ανθεκτικοί στη διάβρωση και τα καιρικά φαινόμενα.

- **Μόνωση:** Τα πολυμερή έχουν άριστες θερμομονωτικές ιδιότητες, οι οποίες μπορούν να βοηθήσουν στη ρύθμιση της θέρμανσης και ψύξης του κτιρίου, συμβάλλοντας στη μείωση του ενεργειακού κόστους και στη ελάττωση των εκπομπών αερίων που σχετίζονται με την θέρμανση, τον κλιματισμό και τον εξαερισμό του κτιρίου.
- **Ευελιξία:** Τα πολυμερή είναι ελαφριά και ευέλικτα υλικά καθώς μπορούν να διαμορφωθούν σε διάφορα μεγέθη και σχήματα, απλοποιώντας και διευκολύνοντας την εγκατάσταση τους στην κατασκευή, και ταυτόχρονα μειώνοντας τον χρόνο και το εργατικό κόστος.
- **Συντήρηση:** Τα πολυμερή είναι ανθεκτικά και μη πορώδη υλικά τα οποία διαθέτουν λεία επιφάνεια που αντιστέκεται στη συσσώρευση ρύπων, καθιστώντας την συντήρηση εύκολη.
- **Κόστος:** Το κόστος των πολυμερών σε σύγκριση με άλλα δομικά υλικά μπορεί να ποικίλλει ανάλογα με διάφορους παράγοντες όπως ο τύπος του πολυμερούς, η διαθεσιμότητα, η ζήτηση της αγοράς και οι ειδικές συνθήκες και απαιτήσεις του έργου. Συνήθως, τα πολυμερή τείνουν να είναι πιο οικονομικά από παραδοσιακά δομικά υλικά όπως ο χάλυβας ή το σκυρόδεμα, αλλά αυτό δεν συμβαίνει πάντα.
- **Ευφλεκτότητα:** Τα πολυμερή έχουν χαμηλή θερμοχωρητικότητα και δεν αντέχουν σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες καθώς λιώνουν γρήγορα σε σύγκριση με άλλα υλικά. Η ευφλεκτότητα τους επιφέρει την παραγωγή καπνού, ο οποίος είναι τοξικός και προκαλεί ποικίλα προβλήματα στον άνθρωπο και το περιβάλλον.
- **Τοξικότητα:** Τα πολυμερή ενδέχεται να περιέχουν πρόσθετα ή χημικές ουσίες που είναι επιβλαβείς και τοξικές για την ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον. Ορισμένοι τύποι πολυμερών απελευθερώνουν πτητικές ενώσεις στην ατμόσφαιρα που επιφέρουν αναπνευστικά προβλήματα εάν εισπνέονται για μεγάλο χρονικό διάστημα.
- **Ανακύκλωση:** Υπάρχει περιορισμένη ανατροφοδότηση σχετικά με τη διάρκεια ζωής των πολυμερών, γεγονός που καθιστά δύσκολη την αξιολόγηση της μακροπρόθεσμης απόδοσής τους. Ωστόσο, έρευνες έχουν δείξει ότι ορισμένα πολυμερή δεν μπορούν να ανακυκλωθούν, γεγονός που καθιστά την απόρριψη τους ένα ακόμη σημαντικό ζήτημα.

1.9.2 Εφαρμογές και Τύποι Πολυμερών

Τα τελευταία χρόνια, τα πολυμερή χρησιμοποιούνται με ραγδαίο ρυθμό στην κατασκευαστική βιομηχανία λόγω της αντοχής, της μονωτικής ικανότητας και της οικονομικής αποδοτικότητας τους. Η χρήση των πολυμερών σε δομικά στοιχεία, όπως δοκοί και

υποστυλώματα, προϋποθέτει την ενίσχυση των πολυμερών με ανθρακονήματα έτσι ώστε να επιτευχθεί μεγαλύτερη μηχανική αντοχή. Παράλληλα, τα πολυμερή εφαρμόζονται σε επιστρώσεις και ως στεγανωτικά σε επιφάνειες ξύλου, σκυροδέματος και άλλων δομικών υλικών, για προστασία από διάβρωση, υγρασία και υπεριώδη ακτινοβολία.

Επιπρόσθετα, τα πολυμερή μπορούν να έχουν την μορφή αφρού (αφρός πολυουρεθάνης, διογκωμένη πολυστερίνη) για να χρησιμοποιηθούν για θερμομόνωση κτιρίων, συνεισφέροντας στον περιορισμό των ενεργειακών καταναλώσεων του κτιρίου. Σημαντικές είναι και οι εφαρμογές τους σε γεωσυνθετικά υλικά και μεμβράνες που χρησιμοποιούνται για σταθεροποίηση και έλεγχο διάβρωσης του εδάφους. Η κατηγοριοποίηση των πολυμερών ανάλογα με τις εφαρμογές τους είναι πολύπλοκη, συνεπώς η ταξινόμηση τους γίνεται με βάση τα χαρακτηριστικά τους. Ως εκ τούτου, προκύπτουν τρεις μεγάλες βασικές κατηγορίες: τα θερμοπλαστικά, τα θερμοσκληρυνόμενα πλαστικά και τα ελαστομερή (Hudson O., 2022)

Τα θερμοπλαστικά πολυμερή αφού τήκονται σε υψηλές θερμοκρασίες, μπορούν να διαμορφωθούν σε ποικίλα σχήματα και μορφές. Κατόπιν, στερεοποιούνται κατά την ψύξη και μπορούν να υποστούν αυτή τη διαδικασία επανειλημμένα χωρίς υποβάθμιση των ιδιοτήτων τους. Μερικά κοινά θερμοπλαστικά που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή περιλαμβάνουν τα:

- **Πολυβινυλοχλωρίδιο (PVC):** Ευέλικτο και οικονομικά αποδοτικό πολυμερές, εξαιρετικά ανθεκτικό στη διάβρωση και τις χημικές ουσίες, καθιστώντας το ιδανικό για εφαρμογές σε εξωτερικούς χώρους όπως σωλήνες, κουφώματα παραθύρων, δάπεδα και μεμβράνες στέγης.
- **Πολυαιθυλένιο (PE):** Ελαφρύ και ανθεκτικό πολυμερές που χρησιμοποιείται για μεμβράνες στέγης και στεγανοποίηση, καθώς και σε σωλήνες, πλαστική ξυλεία και υλικά συσκευασίας.
- **Πολυπροπυλένιο (PP):** Ισχυρό και ελαφρύ πολυμερές που χρησιμοποιείται για την στα δάπεδα, γεωυφάσματα και σε συσκευασίες, δοχεία και μονωτικά υλικά.
- **Πολυστυρένιο (PS):** Ελαφρύ και άκαμπτο πολυμερές που χρησιμοποιείται σε ποικίλες εφαρμογές, όπως συσκευασίες και μονώσεις.
- **Τερεφθαλικό Πολυαιθυλένιο (PET):** Χρησιμοποιείται σε ινώδη μορφή για υφάσματα (πολυεστέρας) ή σε συνδυασμό με ίνες γυαλιού για μηχανικές ρητίνες (PETG) σε κατασκευαστικές εφαρμογές όπως πλαστικά μπουκάλια, δοχεία και ίνες χαλιών.

- **Ρητίνες οξικού βινυλίου (EVA):** Αυτές χρησιμοποιούνται συνήθως σε επιφάνειες ηλιακών πάνελ, υποστρώματα οροφής ή φράγματα ατμών γύρω από παράθυρα.
- **Πολυαμίδιο (PA):** Ισχυρό και ανθεκτικό πολυμερές που χρησιμοποιείται σε διάφορες εφαρμογές, όπως σωληνώσεις και μονώσεις.

Τα θερμοσκληρυνόμενα πολυμερή είναι μια άλλη σημαντική κατηγορία πολυμερών που χρησιμοποιούνται στις κατασκευές και τα οικοδομικά υλικά. Σε αντίθεση με τα θερμοπλαστικά, τα οποία μαλακώνουν όταν θερμαίνονται και μπορούν να αναδιαμορφωθούν, τα θερμοσκληρυνόμενα πολυμερή υφίστανται μια χημική αντίδραση όταν θερμαίνονται, σκληραίνοντας μη αναστρέψιμα σε σταθερό σχήμα. Μόλις σχηματιστούν, δεν μπορούν να λιώσουν και να αναδιαμορφωθούν όπως τα θερμοπλαστικά. Τα θερμοσκληρυνόμενα πολυμερή προσφέρουν εξαιρετική σταθερότητα διαστάσεων, αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες και ανώτερες μηχανικές ιδιότητες. Συνήθη παραδείγματα θερμοσκληρυνόμενων πολυμερών που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή περιλαμβάνουν:

- **Εποξειδικές Ρητίνες:** Οι εποξειδικές ρητίνες χρησιμοποιούνται ευρέως στην κατασκευή για κόλλες, επιστρώσεις και σε δομικά υλικά, προσφέροντας υψηλή αντοχή και ανθεκτικότητα. Τα υλικά με βάση την εποξειδική ρητίνη χρησιμοποιούνται για τη συγκόλληση σκυροδέματος, μετάλλου, ξύλου και σύνθετων υλικών, καθώς και για υδατοστεγανότητα.
- **Πολυεστερικές Ρητίνες:** Οι πολυεστερικές ρητίνες χρησιμοποιούνται συνήθως για εφαρμογές όπως τα πλαστικά ενισχυμένα με υαλοβάμβακα (FRP) και άλλα σύνθετα υλικά, προσφέροντας καλές μηχανικές ιδιότητες κι αντοχή στη διάβρωση από καιρικές συνθήκες.
- **Φαινολικές Ρητίνες:** Αποτελούν θερμοσκληρυνόμενα πολυμερή που προέρχονται από φαινόλη και φορμαλδεΰδη ενώ χρησιμοποιούνται στις κατασκευές ως κόλλες, επιστρώσεις, ελάσματα και μονωτικά υλικά. Οι φαινολικές ρητίνες προσφέρουν εξαιρετική αντοχή στη πυρκαγιά καθώς και θερμική και χημική σταθερότητα.
- **Ρητίνες πολυουρεθάνης:** Αυτές οι ρητίνες χρησιμοποιούνται ως επιστρώσεις, κόλλες, σφραγιστικά και αφρούς, εξασφαλίζοντας ισχυρούς δεσμούς και παρέχοντας προστασία από διάβρωση, τριβή και έκθεση σε χημικά.
- **Πολυεστέρας (PES):** Ευέλικτο πολυμερές που χρησιμοποιείται σε μια ποικιλία εφαρμογών, συμπεριλαμβανομένων υφασμάτων, επικαλύψεων και σύνθετων υλικών.

Τα θερμοσκληρυνόμενα πολυμερή διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στην κατασκευή παρέχοντας ανθεκτικά υλικά υψηλής απόδοσης για ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, όπως δομική ενίσχυση, προστασία επιφάνειας, μόνωση και πρόσφυση. Η ικανότητά τους να δημιουργούν ισχυρούς, μόνιμους δεσμούς και να αντέχουν στις περιβαλλοντικές συνθήκες τα καθιστά απαραίτητα στις σύγχρονες κατασκευαστικές πρακτικές. Στον παρακάτω πίνακα διακρίνονται οι τρεις βασικές κατηγορίες πολυμερών και η εφελκυστική αντοχή και μέτρο ελαστικότητας των πολυμερών (Goodman S.H. & Dodiuk-Kenig, 2013).

Πολυμερές	Μέτρο ελαστικότητας (20 °C, 100 s) (GPa)	Εφελκυστική αντοχή (MPa)
Θερμοπλαστικά		
Πολυαιθυλένιο LD	0.15-0.24	7-17
Πολυαιθυλένιο HD	0.55-1.00	20-37
Πολυπροπυλένιο	1.20-1.70	50-70
Πολυστυρένιο	3.00-3.30	35-68
Πολυβινυλοχλωρίδιο	2.40-3.00	40-60
Πολυμεθακρυλικό μεθύλιο	3.00-3.50	80-90
Νάυλον	2.00-3.50	60-110
Θερμοσκληρυνόμενα		
Εποξειδικές ρητίνες	2.10-5.50	40-85
Πολυεστέρες	1.30-4.50	45-85
Φαινολοφορμαλδεΰδη	7.50-8.50	35-55
Ελαστομερή		
Πολυϊσοπρένιο	0.002-0.10	~10
Πολυβουταδιένιο	0.004-0.10	~10
Πολυχλωροπρένιο	~0.01	~10

Πίνακας 20 : «Μηχανικές Ιδιότητες Πολυμερών» (Τριανταφύλλου, 2013)

Μια ακόμη κατηγορία αποτελούν τα ελαστομερή, τα οποία είναι πολυμερή με ελαστικές ιδιότητες, που σημαίνει ότι μπορούν να τεντωθούν και να επιστρέψουν στο αρχικό τους σχήμα μετά την παραμόρφωση. Συχνά χρησιμοποιούνται όταν απαιτείται ευελιξία και ανθεκτικότητα στα δομικά υλικά. Τα πιο κοινά ελαστομερή που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή είναι:

- **Σιλικόνη:** Χρησιμοποιείται σε στεγανωτικά, κόλλες και στεγανωτικές μεμβράνες λόγω της ευκαμψίας, της αντοχής στις καιρικές συνθήκες και της θερμικής σταθερότητας.
- **Πολυουρεθάνη (PU):** Ευέλικτο πολυμερές που χρησιμοποιείται σε μονώσεις, κόλλες, στεγανοποιητικά και επιστρώσεις λόγω των εξαιρετικών θερμομονωτικών ιδιοτήτων και της ευελιξίας της.
- **Καουτσούκ:** Το φυσικό καουτσούκ χρησιμοποιείται σε μεμβράνες στεγών και δάπεδα καθώς προσδίδει ελαστικότητά και αντοχή σε καιρικές συνθήκες.

- **Θερμοπλαστικά ελαστομερή (TPE):** Πρόκειται για μια κατηγορία υλικών που συνδυάζουν τις ιδιότητες των θερμοπλαστικών και των ελαστομερών, προσφέροντας ευελιξία και δυνατότητα χύτευσης.

Εν κατακλείδι, τα πολυμερή χρησιμοποιούνται σε ποικίλες εφαρμογές στις κατασκευές, όπως στέγες, σωληνώσεις, δάπεδα, μονώσεις και στεγανοποιήσεις, προσφέροντας ευελιξία στο σχεδιασμό, αντοχή στο δομικό υλικό και ανθεκτικότητα σε διάβρωση και χημικά,. Ωστόσο, έχουν ορισμένα μειονεκτήματα, όπως η πιθανότητα πρόκλησης περιβαλλοντικών επιπτώσεων και η ανάγκη για προσεκτικό χειρισμό και απόρριψη, τα οποία πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν.

1.10 Οικολογικά υλικά

Τα οικολογικά υλικά αποτελούν οικοδομικά υλικά που παρουσιάζουν πολύ μικρές περιβαλλοντικές επιπτώσεις καθ'όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής τους. Τα υλικά αυτά προάγουν την αειφορία στις κατασκευές, ελαττώνοντας τις εκπομπές άνθρακα, την κατανάλωση ενέργειας και την παραγωγή αποβλήτων. Ωστόσο, αν και παρέχουν βιώσιμες λύσεις, η υιοθέτησή τους μπορεί να περιορίζεται από παράγοντες όπως η διαθεσιμότητα, η καταλληλότητα και οι κανονιστικοί περιορισμοί των κατασκευών. Παραδείγματα τέτοιων υλικών θεωρούνται τα ανακυκλώσιμα δομικά υλικά, η φυσική ξυλεία, τα δομικά υλικά με ελάχιστη βιομηχανική επεξεργασία και τα φυσικά μονωτικά υλικά. Με την ενσωμάτωση των παραπάνω υλικών στα κατασκευαστικά έργα, μειώνονται αισθητά οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις, προάγεται η βιωσιμότητα και αναπτύσσονται πιο υγιή και ανθεκτικά δομικά περιβάλλοντα. Ακολούθως, αναφέρονται συνοπτικά ορισμένα παραδείγματα.

- **Ανακυκλώσιμα υλικά:** Βασικά δομικά υλικά που χρησιμοποιούνται σε πολλά κατασκευαστικά έργα όπως το σκυρόδεμα και ο χάλυβας, μειώνουν σημαντικά το περιβαλλοντικό τους αποτύπωμα όταν ανακυκλώνονται και επαναχρησιμοποιούνται. Αυτό συμβαίνει διότι μειώνεται η ανάγκη για εξόρυξη και βιομηχανική επεξεργασία των πρώτων υλών. Το ανακυκλωμένο σκυρόδεμα και ο ανακυκλωμένος χάλυβας συμβάλλουν στη μείωση της καταναλισκόμενης ενέργειας και των εκπομπών CO_2 καθώς και στη μείωση των αποβλήτων στους χώρους υγειονομικής ταφής. Ακόμη με τη χρήση ανακυκλωμένων πλαστικών σε μονώσεις, πλαστική ξυλεία και σύνθετα υλικά, μειώνεται σε μεγάλο βαθμό η ενσωματωμένη ενέργεια και μετριάζονται οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις των πλαστικών.

- **Φυσική ξυλεία:** Το ξύλο, όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενη ενότητα, αποτελεί ένα βιώσιμο υλικό το οποίο όταν δεν υφίσταται υπερβολική επεξεργασία, θεωρείται ένα από τα πιο φιλικά προς το περιβάλλον υλικά. Η φυσική ξυλεία παράγει προϊόντα ξυλείας που περιλαμβάνουν τη δομική ξυλεία και τα υλικά φινιρίσματος τα οποία χρησιμοποιούνται σε δοκάρια - υποστυλώματα και δάπεδα – επενδύσεις αντίστοιχα. Δυο παράδειγμα ξυλείας τα οποία δεν αναφέρθηκαν σκόπιμα στην ενότητα 1.5, είναι το μπαμπού και ο φελλός. Το πρώτο είναι ένα αναπτυσσόμενο υλικό που παρουσιάζει υψηλό λόγο αντοχής προς βάρος και βρίσκει εφαρμογές σε δάπεδα, καταστρώματα και στην κατασκευή πλοίων. Αντιθέτως, ο φελλός λαμβάνεται από το εξωτερικό τμήμα του φλοιού δρυός (βελανιδιάς) με οικολογικό τρόπο χωρίς να προκαλέσει αρνητικές επιπτώσεις στα δέντρα. Μάλιστα, παρουσιάζει εξαιρετικές μονωτικές ιδιότητες, εξασφαλίζοντας προστασία από την υγρασία και μείωση των επιπέδων θορύβου, καθιστώντας το κατάλληλο υλικό για επενδύσεις τοίχων και δάπεδα.
- **Φυσικά μονωτικά υλικά:** Η κυτταρίνη, το βαμβάκι, η κάνναβη και το μαλλί προβάτου αποτελούν φυσικά μονωτικά υλικά που έχουν καλές θερμομονωτικές ιδιότητες, είναι ανανεώσιμα και βιοδιασπώμενα, παράγονται χωρίς την χρήση βιομηχανικής επεξεργασίας και παρουσιάζουν πολύ μικρή ενσωματωμένη ενέργεια και ελάχιστες περιβαλλοντικές επιπτώσεις, συγκριτικά με σύνθετα μονωτικά υλικά που εμπεριέχουν τοξικές χημικές ουσίες.

1.11 Τοξικά υλικά

Η κατασκευή τεχνικών έργων προϋποθέτει τον συνδυασμό και την εγκατάσταση ποικίλων δομικών υλικών που καταναλώνουν διαφορετικά ποσά ενέργειας και βασίζονται σε ανανεώσιμους ή μη φυσικούς πόρους. Ωστόσο, τα υλικά που χρησιμοποιούνται ενδέχεται να εγκυμονούν κινδύνους καθώς ίσως εμπεριέχουν ή εκπέμπουν επιβλαβείς και τοξικές ουσίες, οι οποίες επιφέρουν σοβαρές συνέπειες στην υγεία και το περιβάλλον. Αυτά τα τοξικά υλικά μπορούν να επηρεάσουν αρνητικά την ποιότητα του αέρα των εσωτερικών χώρων και να θέσουν κινδύνους για την ανθρώπινη υγεία, ιδιαίτερα κατά την κατασκευή και την κατεδάφιση κτιρίων (UN Enviroment Programme, 2021). Ακολούθως, παρατίθενται μερικά παραδείγματα τοξικών ουσιών και υλικών που εντοπίζονται στις κατασκευές.

- **Αμίαντος:** Ο αμίαντος αποτελεί ένα φυσικό ορυκτό που χρησιμοποιούνταν ευρέως σε κατασκευαστικά έργα λόγω της υψηλής μηχανικής αντοχής του και των μονωτικών του ιδιοτήτων σε ηλεκτρισμό και θερμότητα. Η εφαρμογή του περιλάμβανε κυρίως αγωγούς

υδάτων και κυματοειδείς πλάκες ελενίτ που χρησιμοποιούνταν σε στέγες κτιρίων. Ωστόσο, μετά από εργαστηριακές μελέτες, διαπιστώθηκε ότι η έκθεση σε ίνες αμιάντου προκαλούσε σοβαρές πνευμονικές παθήσεις. Τα υλικά προϊόντα που περιέχουν αμίαντο όπως τα πλακίδια δαπέδων και κουζίνας και οι μονώσεις, μπορούν να απελευθερώσουν τοξικές ίνες στο αέρα κατά την κατασκευή ή κατεδάφιση. Η χρήση αμιάντου έχει απαγορευτεί λόγω της υψηλής τοξικότητας του υλικού. Ωστόσο, σε παλιά κτίρια και εγκαταστάσεις που έχουν χρησιμοποιηθεί ήδη ίνες αμιάντου, χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή στην απομάκρυνση αυτών των υλικών κατά την ανακαίνιση ή την κατεδάφιση κτιρίου και την απόθεση των υλικών.

- **Μόλυβδος:** Ο χρωματισμός των κτιρίων με βάση τον μόλυβδο χρησιμοποιήθηκε σε μεγάλο βαθμό σε κτίρια την δεκαετία του 1970. Όμως, ο μόλυβδος αποτελεί ένα τοξικό μέταλλο που παράγει επιβλαβείς ρύπους και επιφέρει σημαντικές επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και για αυτό η χρήση του ελαττώθηκε δραστικά από τη νομοθεσία.
- **Φορμαλδεΰδη:** Η φορμαλδεΰδη αποτελεί μια οργανική χημική ένωση υπό τη μορφή άχρωμου αέριου που χρησιμοποιείται στην κατασκευή διαφόρων υλικών, όπως τα κόντρα πλακέ, οι μοριοσανίδες και οι μονώσεις. Η συγκεκριμένη ουσία προκαλεί αναπνευστικά προβλήματα, λοιμώξεις και ερεθισμό στα μάτια.
- **Πτητικές οργανικές ενώσεις (VOCs):** Τα VOCs εμπεριέχονται σε υλικά όπως οι κόλλες και τα στεγανωτικά, απελευθερώνοντας ρύπους που είναι επιβλαβείς για την ανθρώπινη υγεία. Η έκθεση σε αυτές τις ενώσεις για μεγάλα χρονικά διαστήματα προκαλεί παθήσεις στον ανθρώπινο οργανισμό, όπως η λοίμωξη του αναπνευστικού συστήματος.
- **Υδράργυρος:** Είναι ένα βαρύ μέταλλο που εμφανίζει τοξικότητα και χρησιμοποιείται σε λαμπτήρες φθορισμού και θερμοστάτες. Η έκθεση και η εισπνοή υδρατμών υδραργύρου προκαλεί σημαντικά προβλήματα στον ανθρώπινο οργανισμό ενώ αποτελεί τοξική ουσία για το περιβάλλον.

Εν κατακλείδι, με την πάροδο του χρόνου, η χρήση των τοξικών υλικών στα τεχνικά έργα έχει περιοριστεί αισθητά αλλά δεν έχει εξαλειφθεί. Για τον λόγο αυτό, είναι σκόπιμο να αναφερθούν οι πιθανοί κίνδυνοι και να ληφθούν τα κατάλληλα μέτρα για τον περιορισμό της χρήσης τους. Για τον μετριασμό των κινδύνων πρέπει να επιλέγονται εναλλακτικά υλικά και να χρησιμοποιούνται ασφαλείς μέθοδοι κατά την ανακαίνιση ή κατεδάφιση κτιρίων, έτσι ώστε να βελτιωθεί η ποιότητα του αέρα στους εσωτερικούς χώρους και να μειωθούν οι εκπομπές.

2.Ενσωματωμένη Ενέργεια & Ενσωματωμένος Άνθρακας

2.1 Βιώσιμες Κατασκευές

Τα σύγχρονα κτίρια αντικατοπτρίζουν τις φιλοδοξίες και τις ανάγκες της κοινωνίας, ενώ παράλληλα ενσωματώνουν τις ταχύτατες εξελίξεις της τεχνολογίας, νέα προηγμένα υλικά, σχεδιαστική σκέψη και καινοτομία. Κύριος στόχος των νέων κατασκευών είναι να δημιουργήσουν λειτουργικούς και βιώσιμους χώρους, με υψηλή αισθητική που εμπλουτίζουν το δομημένο περιβάλλον και βελτιώνουν την ποιότητα ζωής, θέτοντας συνθήκες ευεξίας για τους χρήστες. Για τον λόγο αυτό, οι σύγχρονες κατασκευές περιλαμβάνουν ένα ευρύ φάσμα κατασκευαστικών τεχνικών και αρχιτεκτονικού σχεδιασμού που αναδεικνύουν τις σύγχρονες τάσεις, τις τεχνολογικές εξελίξεις και τις πολιτιστικές επιρροές, ενσωματώνοντας την κοινωνική και την οικονομική διάσταση.

Σχήμα 30 : «Χρυσή τομή βιωσιμότητας» (worldsteel.org/steel-by-topic/life-cycle-thinking)

Ωστόσο, οι κατασκευαστικές δραστηριότητες αφήνουν ένα σημαντικό αποτύπωμα στο περιβάλλον, συμβάλλοντας στην εξάντληση πόρων, στην αύξηση των εκπομπών άνθρακα και αποβλήτων και στην κατανάλωση ενέργειας. Συνεπώς, στον σχεδιασμό κτιρίων και κατασκευών πρέπει να λαμβάνεται υπόψιν ο περιβαλλοντικός παράγοντας και να αναδεικνύεται η ανάγκη για μια αειφόρο και οικολογική ανάπτυξη. Βασικά χαρακτηριστικά των βιώσιμων κτιρίων είναι η βέλτιστη αξιοποίηση των πόρων, η εξοικονόμηση ενέργειας και η ελαχιστοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων σε ολόκληρο τον κύκλο ζωής των κτιρίων, από το σχεδιασμό και την κατασκευή έως τη λειτουργία και την κατεδάφιση.

Η εξοικονόμηση ενέργειας στα κτίρια επιτυγχάνεται μέσω βιοκλιματικού σχεδιασμού και θερμικής θωράκισης του κελύφους, ενώ ο υψηλός δείκτης ενεργειακής απόδοσης επιτυγχάνεται με χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ) και επιλογή του κατάλληλου ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού. Αξιοσημείωτη είναι η διαχείριση των αποβλήτων και η ανακύκλωση σε όλο τον κύκλο ζωής του κτιρίου καθώς και η διατήρηση των υδάτινων και αέριων ρύπων σε χαμηλά επίπεδα από την κατασκευή έως και την λειτουργία.

Άλλος ένα παράγοντας που επηρεάζει σημαντικά τη βιωσιμότητα του κτιρίου είναι η επιλογή των κατάλληλων δομικών υλικών κατά τη φάση σχεδιασμού και κατασκευής του έργου. Η επιλογή των σωστών δομικών υλικών επηρεάζει άμεσα την ενεργειακή και θερμική απόδοση των κτιρίων. Έτσι, υλικά όπως το ξύλο και οι οπτόπλινθοι διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στον καθορισμό της ρύθμισης της εσωτερικής θερμοκρασίας του κτιρίου και στη μείωση των ενεργειακών απαιτήσεων θέρμανσης και ψύξης. Η ενσωμάτωση ανανεώσιμων και ανακυκλωμένων υλικών ενθαρρύνει τη βιώσιμη κατασκευή και περιορίζει τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Τα ανανεώσιμα υλικά προέρχονται από φυσικούς πόρους που αναπληρώνονται γρήγορα ενώ τα ανακυκλωμένα υλικά ελαχιστοποιούν την ανάγκη για εξόρυξη φυσικών πόρων και παραγωγή νέων υλικών προϊόντων ενώ παράλληλα μειώνουν τα απόβλητα από τους χώρους υγειονομικής ταφής.

Από την άλλη πλευρά, πολλά παραδοσιακά δομικά υλικά, όπως το σκυρόδεμα, ο χάλυβας και το αλουμίνιο, αν και προσδίδουν μοναδικές ιδιότητες και χαρακτηριστικά στο κτίριο, απαιτούν μεγάλες ποσότητες ενέργειας και φυσικών πόρων για να παραχθούν. Η παραγωγή σε συνδυασμό με την εξόρυξη, τη μεταφορά, την εγκατάσταση και την απόρριψη των υλικών στο περιβάλλον, συμβάλλουν στις εκπομπές ρύπων, στην ρύπανση των υδάτων και στην αύξηση απορριμμάτων, μεγεθύνοντας το οικολογικό αποτύπωμα της κατασκευής.

Το οικολογικό αποτύπωμα των κατασκευαστικών έργων μπορεί να γίνει μετρήσιμο μέγεθος, μέσω της ενσωματωμένης ενέργειας και του ενσωματωμένου άνθρακα των υλικών. Η ενσωματωμένη ενέργεια και ο ενσωματωμένος άνθρακας αποτελούν δύο βασικά μεγέθη που χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των δομικών υλικών, προϊόντων ή κατασκευών. Αξίζει να σημειωθεί ότι ενώ η ενσωματωμένη ενέργεια και ο ενσωματωμένος άνθρακας είναι σχετικές έννοιες, που παρέχουν διαφορετικές προοπτικές για τη περιβαλλοντική βιωσιμότητα των δομικών υλικών. Ο πρώτος όρος αναφέρεται στη συνολική

ενέργεια που καταναλώνεται σε όλο το κύκλο ζωής ενός υλικού (Life Cycle Assessment, LCA) από την εξόρυξη έως και την απόθεση στο περιβάλλον, ενώ ο δεύτερος στις συνολικές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα που σχετίζονται με την παραγωγή και τη χρήση δομικών υλικών.

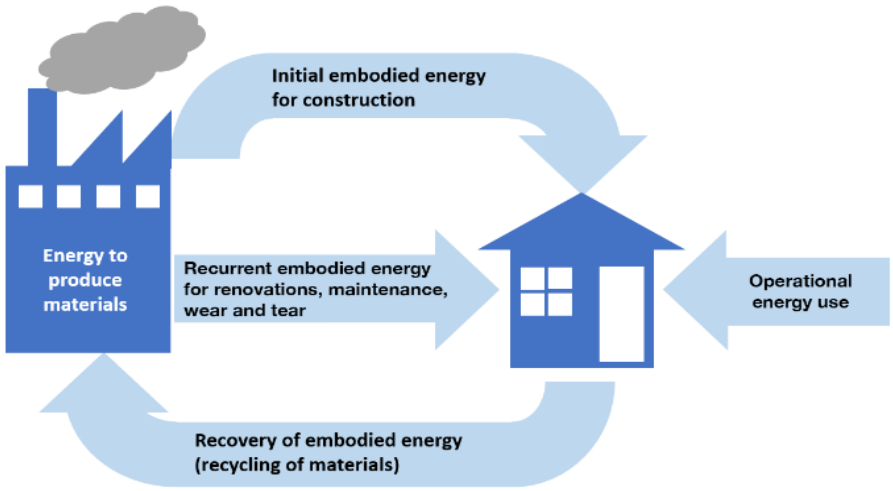
Εικόνα 8 : «Στόχοι της αειφόρου ανάπτυξης» (sbcgreece.org)

Η ενσωματωμένη ενέργεια ασχολείται περισσότερο με την κατανόηση και τη μείωση της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας στις κατασκευαστικές διαδικασίες, ενώ ο ενσωματωμένος άνθρακας είναι ζωτικής σημασίας για την αξιολόγηση και τον μετριασμό του αποτυπώματος άνθρακα των δομικών υλικών. Η κατανόηση αυτών των διακρίσεων είναι απαραίτητη για τη λήψη τεκμηριωμένων αποφάσεων σε βιώσιμες κατασκευαστικές πρακτικές για την ελαχιστοποίηση τόσο της κατανάλωσης ενέργειας όσο και των εκπομπών άνθρακα σε όλο τον κύκλο ζωής ενός κτιρίου.

2.2 Ενσωματωμένη Ενέργεια

Η ενσωματωμένη ενέργεια προσδιορίζει τη συνολική ενέργεια που καταναλώνεται σε ολόκληρο τον κύκλο ζωής ενός κτιρίου, ενός δομικού προϊόντος ή ενός υλικού. Ο κύκλος ζωής ενός κτιρίου περιλαμβάνει όλες τις εισροές ενέργειας που απαιτούνται για την εξόρυξη και

συγκομιδή πρώτων υλών, την επεξεργασία τους σε αξιοποιήσιμες μορφές, την παραγωγή των δομικών υλικών, τη μεταφορά τους στο εργοτάξιο και την ενσωμάτωσή τους στην κατασκευή.



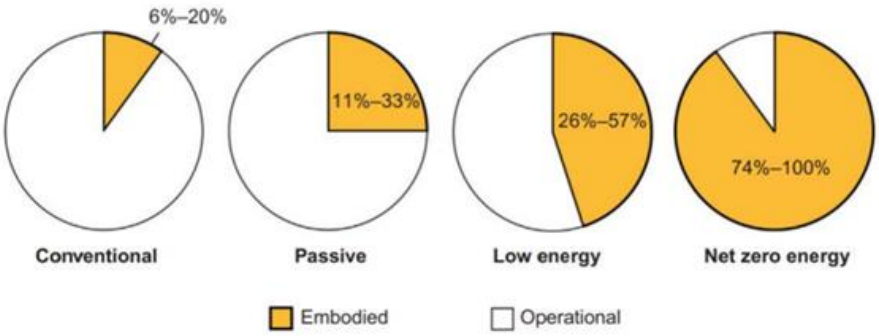
Σχήμα 31 : «Ενσωματωμένη Ενέργεια Κτιρίου» (Murray Hall, 2014)

Σύμφωνα με τους μελετητές, η ενσωματωμένη ενέργεια μπορεί να χωριστεί σε τρεις βασικές κατηγορίες : την ενέργεια που καταναλώνεται για την παραγωγή βασικών δομικών υλικών, την ενέργεια που απαιτείται για τη μεταφορά των δομικών υλικών και την ενέργεια που απαιτείται για τον συνδυασμό και την ενσωμάτωση ποικίλων υλικών για τον σχηματισμό του κτιρίου (Venkatamara, 2001). Η συνολική ενσωματωμένη ενέργεια ενός κτιρίου προσδιορίζεται, όπως φαίνεται και στο σχήμα 3, από την συνολική ενέργεια που απαιτείται για την παραγωγή όλων των υλικών που χρησιμοποιούνται τόσο για την αρχική κατασκευή (αρχική ενσωματωμένη ενέργεια) όσο και για τις επισκευές και ανακαινίσεις (επαναλαμβανόμενη ενσωματωμένη ενέργεια). Η μέτρησή της γίνεται με ενεργειακές μονάδες ανά μονάδα βάρους και συγκεκριμένα με MegaJoule/kilogram (MJ/kg) και ο υπολογισμός της αποσκοπεί στην κατανόηση του μεγέθους της καταναλισκόμενης ενέργειας και την ανάγκη περιορισμού της.

Η επιλογή των υλικών και των μεθόδων κατασκευής αποτελούν πολύ σημαντικές παραμέτρους καθώς μπορούν να αλλάξουν σημαντικά την ποσότητα ενέργειας που ενσωματώνεται σε ένα κτίριο. Η ενσωματωμένη ενέργεια ποικίλλει μεταξύ των δομικών υλικών ενώ ορισμένα υλικά παρουσιάζουν διαφορετικές δυνατότητες για επαναχρησιμοποίηση ή ανακύκλωση, κάτι που μπορεί να βοηθήσει στην ανάκτηση της ενσωματωμένης ενέργειας στο τέλος της ζωής ενός κτιρίου. Ωστόσο, είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι η επιλογή υλικών με

χαμηλή ενσωματωμένη ενέργεια ενδέχεται να οδηγήσει σε υψηλότερη λειτουργική χρήση ενέργειας, ενώ ένα υλικό με υψηλότερη ενσωματωμένη ενέργεια μπορεί να οδηγήσει σε ένα κτίριο με χαμηλότερη λειτουργική ενέργεια. Για παράδειγμα, το αλουμίνιο ενώ έχει υψηλή ενσωματωμένη ενέργεια, μπορεί να μειώσει σημαντικά τις λειτουργικές ανάγκες θέρμανσης και ψύξης σε καλά σχεδιασμένα και μονωμένα κτίρια.

Η ενσωματωμένη ενέργεια των κτιρίων δεν πρέπει να συγχέεται με την λειτουργική του ενέργεια, καθώς ο πρώτος όρος αναφέρεται στην ενέργεια που έχει καταναλωθεί από την παραγωγή των δομικών υλικών έως και την μεταφορά και ενσωμάτωση τους στην κατασκευή, ενώ η λειτουργική ενέργεια αναφέρεται στην ενέργεια που καταναλώνεται κατά τη φάση λειτουργίας και συντήρησης του κτιρίου, δηλαδή μετά την φάση κατασκευής. Μια πρόσφατη έρευνα που πραγματοποιήθηκε μεταξύ διαφορετικών κτιρίων κατοικιών έδειξε ότι το ποσοστό ενσωματωμένης ενέργειας για συμβατικά κτίρια και παθητικά κτίρια ανέρχεται μεταξύ 6%-20% και 11%-33% αντίστοιχα. Αρκετά μεγαλύτερο μερίδιο ενσωματωμένης ενέργειας (26%-57%) παρουσίασαν τα κτίρια χαμηλής και μηδενικής ενέργειας με ποσοστά άνω του 30% και τείνουν να φτάσουν σε πολύ μεγάλο ποσοστό ενσωματωμένης ενέργειας για κτίρια μηδενικής ενέργειας.



Σχήμα 32 : «Ποσοστά ενσωματωμένης και λειτουργικής ενέργειας κτιρίων κατοικιών, προς τη συνολική ενέργεια που καταναλώνουν, ανάλογα με την ενεργειακή τους απόδοση» (Chastas et al., 2016)

Καθώς τα κτίρια σήμερα γίνονται όλο και περισσότερο αποδοτικά στη λειτουργία τους, το ενεργειακό ποσοστό της συνολικής ενσωματωμένης ενέργειας αυξάνεται. Αυτό μπορεί να γίνει ακόμη πιο έντονο όταν προστίθενται πρόσθετα υλικά (διπλά τζάμια, μόνωση) στο κτίριο για να επιτευχθεί λειτουργική εξοικονόμηση ενέργειας (Crawford, 2014). Για τους παραπάνω λόγους γίνεται αξιολόγηση του κύκλου ζωής των δομικών υλικών και πραγματοποιούνται μελέτες περιβαλλοντικών επιπτώσεων πριν τον σχεδιασμό και την κατασκευή ενός μεγάλου

κτιρίου ή κατασκευαστικού έργου. Επιπρόσθετα, έχουν αναπτυχθεί διάφοροι μέθοδοι περιβαλλοντικής διαχείρισης και λογισμικά εργαλεία για την εύρεση της ενσωματωμένης ενέργειας των κτιρίων και των εκπομπών άνθρακα. Τα υλικά με χαμηλότερη ενσωματωμένη ενέργεια θεωρούνται γενικά πιο φιλικά προς το περιβάλλον επειδή απαιτούν λιγότερη ενέργεια για την παραγωγή και τη μεταφορά τους, οδηγώντας σε χαμηλότερες εκπομπές άνθρακα και μικρότερη εξάντληση των πόρων (Hafez, 2023).

2.3 Ενσωματωμένος Άνθρακας

Ο ενσωματωμένος άνθρακας μετρά τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) που παράγονται σε όλο τον κύκλο ζωής ενός υλικού και προκύπτουν από την καύση ορυκτών καυσίμων, τις χημικές αντιδράσεις στις διαδικασίες επεξεργασίας και τις δραστηριότητες μεταφοράς και ενσωμάτωσης δομικών υλικών στις κατασκευές. Προσδιορίζει ποσοτικά τη συμβολή στην κλιματική αλλαγή που έχει η φάση παραγωγής των υλικών και στοχεύει στη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων της κατασκευής, εστιάζοντας στη μείωση των εκπομπών άνθρακα σε όλες τις φάσεις της παραγωγής και κατασκευής. Ο ενσωματωμένος άνθρακας ταυτίζεται αρκετά συχνά με τον όρο «αποτύπωμα άνθρακα», ωστόσο η κύρια διαφορά τους είναι ότι ο τελευταίος όρος μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για να συζητηθούν οι λειτουργικές απαιτήσεις άνθρακα που έχει ένα κτίριο (π.χ. θέρμανση, φωτισμός). Τουναντίον, ο ενσωματωμένος άνθρακας μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο στο πλαίσιο υλικών, όπως για παράδειγμα για τον προσδιορισμό όλων των δραστηριοτήτων που σχετίζονται με την κατασκευή ενός κτιρίου, συμπεριλαμβανομένης της παραγωγής υλικών.

Ο ενσωματωμένος άνθρακας μετριέται συνήθως σε μονάδες μάζας, όπως κιλά (kg) ή τόνοι (tn) ισοδυνάμου διοξειδίου του άνθρακα (CO_2e). Αυτή η μονάδα εκφράζει τη συνολική ποσότητα αερίων θερμοκηπίου που εκπέμπονται ως ισοδύναμα διοξειδίου του άνθρακα κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής ενός υλικού ή προϊόντος. Για παράδειγμα, εάν ένα υλικό έχει ενσωματωμένο άνθρακα 1000 kg CO_2e, σημαίνει ότι η παραγωγή, η μεταφορά και η εγκατάσταση αυτού του υλικού είχαν ως αποτέλεσμα εκπομπές ισοδύναμες με 1000 κιλά διοξειδίου του άνθρακα. Η χρήση μονάδων μάζας επιτρέπει τη σύγκριση του ενσωματωμένου άνθρακα μεταξύ διαφορετικών υλικών και κατασκευαστικών έργων, διευκολύνοντας τη λήψη αποφάσεων για τη μείωση των εκπομπών και τη βελτίωση της βιωσιμότητας ενός έργου.

Σχήμα 33 : «Κύκλος ενσωματωμένου άνθρακα» (circularecology.com/embodied-carbon-footprint-database)

Η ενσωματωμένη ενέργεια και ο ενσωματωμένος άνθρακας αποτελούν δυο έννοιες που σχετίζονται αλλά δεν είναι πάντα αναλογικές. Αυτό σημαίνει ότι κάποια υλικά με χαμηλή ενσωματωμένη ενέργεια μπορεί να έχουν υψηλές εκπομπές άνθρακα και το αντίστροφο. Ως εκ τούτου, είναι σημαντικό να ληφθούν υπόψιν και οι δύο παράγοντες ανεξάρτητα για να αναπτυχθεί μια ολοκληρωμένη κατανόηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των υλικών. Η ενσωματωμένη ενέργεια εστιάζει στη συνολική χρήση ενέργειας, χωρίς να λαμβάνει υπόψιν παράγοντες εκπομπών ή πηγές ενέργειας, ενώ ο ενσωματωμένος άνθρακας μετρά τις εκπομπές αερίων θερμοκηπίου που σχετίζονται με την παραγωγή υλικού σε σχέση με ισοδύναμα CO_2. Τα δύο μεγέθη είναι εξίσου σημαντικά στις βιώσιμες κατασκευαστικές πρακτικές και μπορούν να βοηθήσουν στη λήψη αποφάσεων σχετικά με την επιλογή υλικού, τη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού και τις κατασκευαστικές διαδικασίες που στοχεύουν στη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων (Asdrubali F. et al., 2023).

2.4 Κύκλος Ζωής Δομικών Υλικών

Ο μηχανικός κατά τον σχεδιασμό και την κατασκευή μια κτιριακής δομής οφείλει να εντάσσει στο κτίριο οικοδομικά υλικά που ικανοποιούν ορισμένα κριτήρια για όλον τον κύκλο ζωής ενός κτιρίου. Τέτοια κριτήρια αποτελούν η εξοικονόμηση, η επαναχρησιμοποίηση και η ανακύκλωση πρώτων υλών, ο περιορισμός των GHGs και των τοξικών εκπομπών, ο υπολογισμός της ενσωματωμένης ενέργειας των υλικών και η προσπάθεια για εξοικονόμηση ενέργειας στην κατασκευή (Σαργέντης, 2014). Η οικονομοτεχνική αλλά και περιβαλλοντική

αποδοτικότητα των υλικών έχει δέουσα σημασία στη βιωσιμότητα των κατασκευαστικών έργων καθώς πέρα από τις ιδιότητες και τα χαρακτηριστικά που προσφέρουν στο κτίριο, τα υλικά κοστίζουν και έχουν περιβαλλοντικό αποτύπωμα. Η συνετή επιλογή δομικών υλικών στοχεύει στη μείωση των καταναλωμένων πόρων, στην ελαχιστοποίηση των αποβλήτων και στον περιορισμό του ενσωματωμένου άνθρακα και της καταναλισκόμενης ενέργειας.

Σημαντική παράμετρο αποτελεί και η απόσταση μεταφοράς που διανύουν τα δομικά υλικά από το εργοστάσιο παραγωγής στο εργοτάξιο για την ενσωμάτωση των υλικών στο έργο. Οι εκπομπές από τις μεταφορές αποτελούν σημαντικό κριτήριο για την επιλογή ενός υλικού δόμησης και πρέπει να λαμβάνονται πάντοτε υπόψιν, ωστόσο παρουσιάζουν διακυμάνσεις στις τιμές τους που οφείλονται στην απόσταση που διανύθηκε καθώς και στον τρόπο και αποτελεσματικότητα της μεταφοράς. Η επιλογή υλικών με χαμηλότερες ενεργειακές απαιτήσεις για παραγωγή ή με χρήση ΑΠΕ συμβάλλει στη μείωση της ενσωματωμένης ενέργειας. Ταυτόχρονα, οι δραστηριότητες και οι τεχνικές κατασκευής μπορούν να οδηγήσουν σε διαφορετικά επίπεδα ενσωματωμένων μεγεθών, ενώ πρέπει να διερευνείται και η αποδοτικότητα των δραστηριοτήτων επεξεργασίας των πρώτων υλών και παραγωγής των δομικών υλικών.

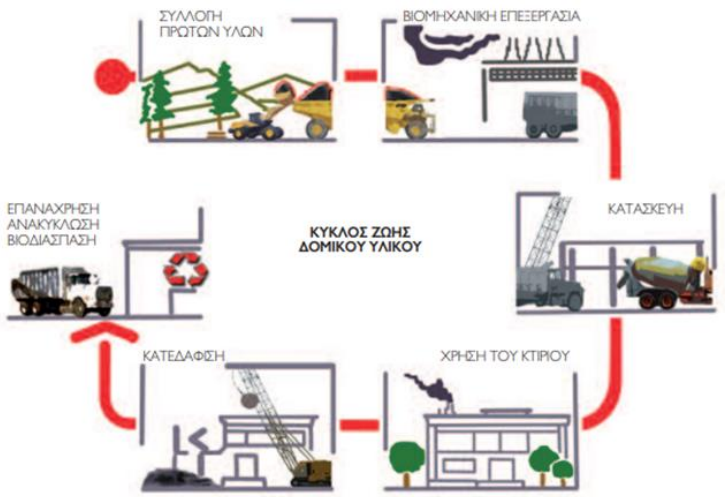
Παράλληλα ορισμένα υλικά, όπως τα προϊόντα ξύλου, έχουν την ικανότητα να δεσμεύουν άνθρακα από την ατμόσφαιρα. Η αξιολόγηση του δυναμικού αποθήκευσης άνθρακα των υλικών επηρεάζει και εκείνη με την σειρά της, τις αποφάσεις σχετικά με την επιλογή υλικού και τις στρατηγικές αντιστάθμισης άνθρακα στο περιβάλλον. Καθοριστικό ρόλο διακατέχουν και οι απαιτήσεις σε αντοχή και συντήρηση των υλικών, καθώς η τακτική αντικατάσταση ή επισκευή μπορεί να αυξήσει τον ενσωματωμένο άνθρακα κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής ενός κτιρίου. Η επιλογή ανθεκτικών υλικών με χαμηλές ανάγκες συντήρησης μπορεί να μειώσει τις μακροπρόθεσμες εκπομπές. Συνάμα, το τέλος του κύκλου ζωής των δομικών υλικών αποτελεί και εκείνο ένα σημαντικό παράγοντα για τη μείωση της καταναλισκόμενης ενέργειας και των εκπομπών. Ο σχεδιασμός για κυκλικότητα και η εξέταση για δυνατότητα ανακύκλωσης, επαναχρησιμοποίησης ή βιοδιάσπασης των υλικών μπορεί να ωφελήσει τόσο την βιωσιμότητα των νέων κατασκευών όσο και την ελάττωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων.

Συμπερασματικά, μεριμνώντας τις παραπάνω παραμέτρους που επηρεάζουν άμεσα τον ενσωματωμένο άνθρακα, την ενσωματωμένη ενέργεια και την αειφορία των κατασκευών, δύναται να χαραχθεί μια ολοκληρωμένη στρατηγική για τη μείωση των περιβαλλοντικών

επιπτώσεων, με στόχο την ελαχιστοποίηση της καταναλισκόμενης ενέργειας και την προώθηση ενεργειακά αποδοτικών πρακτικών στις βιομηχανίες κατασκευών και δομικών υλικών.

Ο κύκλος ζωής ενός δομικού υλικού περιλαμβάνει όλα τα στάδια που περνάει ένα υλικό από την αρχή έως και το τέλος της σκοπιμότητας του και την απόθεση του στο περιβάλλον. Σε αυτά τα στάδια συμπεριλαμβάνονται η συλλογή και η εξόρυξη πρώτων υλών, η βιομηχανική επεξεργασία και παραγωγή του δομικού προϊόντος, η κατασκευή και η εφαρμογή, η συντήρηση, το τέλος ζωής και πιθανώς η ανακύκλωση και η επαναχρησιμοποίηση του υλικού ή η βιοδιάσπαση και τελική απόθεση του στο περιβάλλον.

Το στάδιο της εξόρυξης και συλλογής πρώτων υλών αποτελεί το αρχικό στάδιο του κύκλου ζωής ενός δομικού υλικού και περιλαμβάνει όλες εκείνες τις δραστηριότητες εξόρυξης και συγκομιδής πόρων που είναι απαραίτητες για τον σχηματισμό προϊόντων, όπως ορυκτών μεταλλευμάτων για μέταλλα και αδρανών για σκυρόδεμα. Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις των παραπάνω διεργασιών ενδέχεται να είναι πολύ σοβαρές, αν δεν λαμβάνονται αυστηρά μέτρα και προδιαγραφές. Οι επιπτώσεις αυτές κυμαίνονται από καταστροφή οικοσυστημάτων, ρύπανση υδάτων, αποψίλωση δασών έως και την εκπομπή τοξικών ρύπων.



Εικόνα 9 : «Κύκλος ζωής δομικών υλικών» (Σαργέντης, 2014)

Η βιομηχανική επεξεργασία και παραγωγή ενός δομικού υλικού ενδεχομένως να αντιπροσωπεύει το πιο σημαντικό στάδιο ως προς την κατανάλωση ενέργειας και παραγωγής εκπομπών άνθρακα. Οι διαδικασίες παραγωγής ποικίλλουν ανάλογα με τον τύπο του υλικού, όμως σχεδόν για κάθε υλικό η χημική του επεξεργασία και η μετατροπή της πρώτης ύλης σε τελικό προϊόν καταναλώνει μεγάλες ποσότητες ενέργειας και χρήσης ορυκτών καυσίμων. Για

παράδειγμα, η παραγωγή σκυροδέματος περιλαμβάνει ανάμειξη τσιμέντου, αδρανών υλικών και νερού, ενώ η παραγωγή χάλυβα απαιτεί την τήξη σιδηρομεταλλεύματος και την ανάμειξη με άνθρακα. Συνεπώς, η επεξεργασία και των δυο θα απαιτήσει σημαντικά ποσά ενέργειας, όμως ο χάλυβας. λόγω της χρήσης πυρομεταλλουργικών μεθόδων για την επεξεργασία του, εμφανίζει μεγαλύτερες ενεργειακές απαιτήσεις. Τα σημαντικότερα ζητήματα που πρέπει να αντιμετωπιστούν σε αυτό το στάδιο είναι η συνολική ενεργειακή κατανάλωση, οι εκπομπές GHGs, η αποτροπή μόλυνσης των υδάτων και η ελάττωση της παραγωγής των απορριμμάτων.

Ένα ακόμη σημαντικό στάδιο του κύκλου ζωής των υλικών καθορίζεται από τη μεταφορά των πρώτων υλών από τις εγκαταστάσεις εξόρυξης στο εργοστάσιο παραγωγής και από εκεί στο εργοτάξιο, όπου θα δομηθεί ένα κτίριο. Η ενέργεια και οι εκπομπές που σχετίζονται με τη μεταφορά υλικών είναι εξίσου σημαντικές με τα παραπάνω στάδια, καθώς η απόσταση που διανύεται και ο τρόπος μεταφοράς αποτελούν κρίσιμες παραμέτρους. Ο τρόπος μεταφοράς σχετίζεται και μπορεί να ποικίλει ανάλογα με την διανυθείσα απόσταση, τον απαιτούμενο όγκο και βάρος των υλικών και το συνολικό κόστος. Έτσι, γίνεται χρήση φορτηγών, τρένων και μεγάλων εμπορικών πλοίων για την εξυπηρέτηση των παραπάνω απαιτήσεων. Κάθε τύπος οχήματος και μέσου μεταφοράς καταναλώνει ενέργεια και ορυκτά καύσιμα, εκπέμπει ρύπους και επιδρά αρνητικά στο περιβάλλον. Επομένως, είναι πολύ σημαντικό να εξετάζονται προσεκτικά οι εκπομπές, η κατανάλωση καυσίμου και η διανυθείσα απόσταση που σχετίζονται με τις μεταφορές, καθώς η λεπτομερής μελέτη θα συμβάλει στον περιορισμό του ανθρακικού αποτυπώματος και στη βελτιστοποίηση της εφοδιαστικής αλυσίδας από το λατομείο στο εργοτάξιο.

Όσον αφορά το στάδιο κατασκευής, η ενσωματωμένη ενέργεια και ο ενσωματωμένος άνθρακας σχετίζονται με τις τεχνικές και μεθόδους κατασκευής, συμπεριλαμβανομένων των δραστηριοτήτων προετοιμασίας, συναρμολόγησης, εγκατάστασης, φινιρίσματος και παραγωγής αποβλήτων. Η κατανάλωση ενέργειας κατά την κατασκευή έγκειται στο γεγονός χρήσης εξειδικευμένου ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού και οχημάτων εντός εργοταξίου. Η χρήση φιλικών προς το περιβάλλον τεχνικών κατασκευής και η αποτελεσματική διαχείριση έργων μπορούν να μειώσουν τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις, ελαχιστοποιώντας τα απόβλητα, την κατανάλωση ενέργειας και τους ρύπους.

Μετά από την κατασκευή ενός κτιρίου, έπεται η παράδοση του στον κύριο του έργου και η αξιοποίηση, χρησιμοποίηση και συντήρηση του. Σε αυτό το στάδιο αξιολογούνται οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις που σχετίζονται με τη χρήση δομικών υλικών εντός του κατασκευασμένου κτιρίου, συμπεριλαμβανομένης της ανθεκτικότητας με την πάροδο του χρόνου και της κατανάλωσης ενέργειας για θέρμανση, ψύξη, φωτισμό και εξαερισμό. Για τον μετριασμό των επιπτώσεων, μπορούν να παρθούν μέτρα ενεργειακής απόδοσης ακόμα και μετά την κατασκευή, όπως η μόνωση και η ενσωμάτωση ΑΠΕ. Ωστόσο, είναι θεμιτό να έχουν προβλεφθεί από την αρχική φάση σχεδιασμού του κτιρίου, έτσι ώστε να αποφεύγονται επιπλέον κόστη και να υπάρξει μεγαλύτερη λειτουργικότητα και ενεργειακή απόδοση.

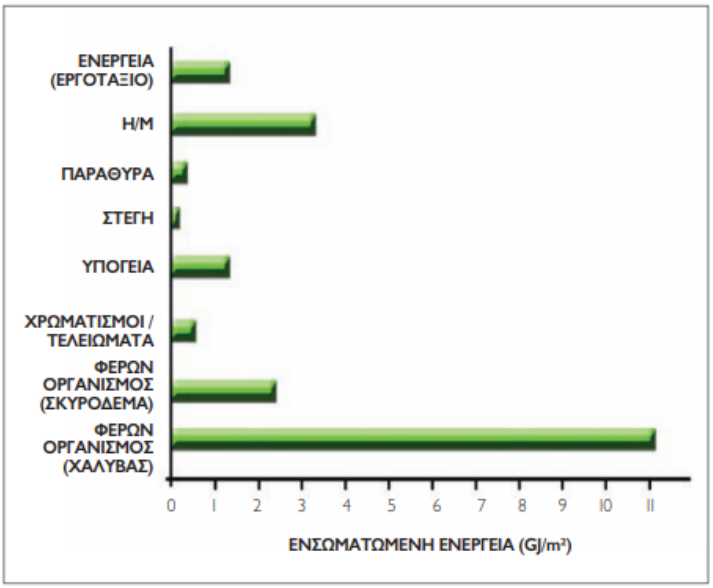
Με την πάροδο του χρόνου, όταν ένα έργο έχει επιτελέσει τον σκοπό για τον οποίο κατασκευάστηκε και η συντήρηση ή η ανακαίνιση του δεν είναι οικονομικά και περιβαλλοντικά συμφέρουσα, ενδέχεται να κατεδαφιστεί. Το τελικό στάδιο του κύκλου ζωής ενός έργου περιλαμβάνει την απόρριψη και υγειονομική ταφή ή την ανακύκλωση των δομικών υλικών που το συντελούν. Στο συγκεκριμένο στάδιο μελετώνται οι περιβαλλοντικές συνέπειες των μεθόδων διάθεσης όπως η υγειονομική ταφή, η αποτέφρωση, η βιοδιάσπαση ή η ανακύκλωση. Η επιλογή της τελευταίας δίνει το καλύτερο περιβαλλοντικό αποτέλεσμα καθώς μειώνει αισθητά τις εκπομπές που βασίζονται στην επεξεργασία και παραγωγή νέων δομικών προϊόντων. Τα περισσότερα δομικά υλικά διατηρούν σε μεγάλο βαθμό τις αρχικές τους ιδιότητες και συνεπώς είναι σκόπιμο να χρησιμοποιηθούν ξανά και να συντελέσουν σε ένα παρόμοιο κατασκευαστικό έργο παρά να απορριφθούν ως απόβλητα σε κάποιο χώρο υγειονομικής ταφής. Με την ανακύκλωση, μειώνεται η ανάγκη για εξόρυξη και συγκομιδή νέων πόρων και μεταλλευμάτων και κλείνει ο κύκλος ζωής του έργου, βασιζόμενος στις αρχές της κυκλικής οικονομίας (Almusaed A. et al., 2024).

2.5 Ενσωματωμένη Ενέργεια & CO_2 Δομικών Υλικών

Η ενσωματωμένη ενέργεια και ο ενσωματωμένος άνθρακας των δομικών υλικών διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στον προσδιορισμό των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των κατασκευαστικών έργων. Η εξέταση αυτών των παραγόντων μπορεί να βοηθήσει μηχανικούς, επιχειρηματίες και κατασκευαστές να λάβουν ορθολογικές και τεκμηριωμένες αποφάσεις για να ελαχιστοποιήσουν το αποτύπωμα άνθρακα και την κατανάλωση ενέργειας των κτιρίων. Κάθε υλικό έχει διαφορετικές ενεργειακές απαιτήσεις, συνεπώς η επιλογή ως υλικό δόμησης πρέπει να

πληροί πέρα από τεχνικές και οικονομικές παραμέτρους και περιβαλλοντικά πρότυπα και απαιτήσεις, έτσι ώστε να υπάρξει αειφόρος ανάπτυξη και ενεργειακά βιώσιμες κατασκευές.

Για την κατασκευή ενός κτιρίου απαιτείται ο συνδυασμός ποικίλων υλικών που προσδίδουν διαφορετικές ιδιότητες και χαρακτηριστικά στο κτίριο. Σύμφωνα, με μελέτες ο μεγαλύτερος όγκος ενσωματωμένης ενέργειας σε ένα κτιριακό έργο συναντάται στον φέροντα του οργανισμό, διότι χρησιμοποιούνται μεγάλες ποσότητες σκυροδέματος αλλά κυρίως χάλυβα, ο οποίος αποτελεί ένα υλικό με υψηλή ενσωματωμένη ενέργεια. Στο ακόλουθο διάγραμμα γίνονται αντιληπτά τα επίπεδα ενσωματωμένης ενέργειας που απαιτούνται για κάθε οικοδομική εργασία, επιβεβαιώνοντας τα υψηλά ποσοστά του φέροντα οργανισμού, ενώ σημαντική συνεισφορά έχουν τα Η/Μ και η ενέργεια που καταναλώνεται στο εργοτάξιο (Σαργέντης, 2014).



Σχήμα 34 : «Ενσωματωμένη ενέργεια τμημάτων κατασκευής κτιρίου» (Σαργέντης, 2014)

2.5.1 Ενσωματωμένη Ενέργεια & CO_2 Σκυροδέματος

Το σκυρόδεμα αποτελεί ένα από τα βασικότερα δομικά υλικά που χρησιμοποιούνται παγκοσμίως για κατασκευαστικά έργα λόγω των ιδιοτήτων που προσδίδει στην κατασκευή. Η παραγωγή του απαιτεί μεγάλες ποσότητες αδρανών, νερού και τσιμέντου. Το τελευταίο παρασκευάζεται από ασβεστόλιθο και άργιλο και υπόκειται σε υψηλές θερμοκρασίες, με αποτέλεσμα να εκπέμπεται CO_2 στην ατμόσφαιρα και να καταναλώνονται μεγάλα ποσά ενέργειας. Η ανάμειξη με πρόσθετα βελτιώνει ορισμένα χαρακτηριστικά του υλικού ωστόσο αυξάνει την ενσωματωμένη ενέργεια του σκυροδέματος.

Συνολικά, πρόκειται για ένα ευέλικτο και ευρέως διαθέσιμο υλικό, που είναι ιδιαίτερα ανθεκτικό και αντέχει στο χρόνο και στις εξωτερικές συνθήκες, καθιστώντας το κατάλληλο για διάφορες κατασκευαστικές εφαρμογές. Επίσης, οι ιδιότητες θερμικής μάζας που παρουσιάζει βοηθούν στη ρύθμιση της θερμοκρασίας εντός κτιρίου και συμβάλλουν στην μείωση των ενεργειακών καταναλώσεων σε θέρμανση και ψύξη. Τουναντίον, οι υψηλές εκπομπές ενέργειας και CO_2 κατά την φάση εξόρυξης των πόρων (ασβεστόλιθος, άργιλος) και παραγωγής τσιμέντου αυξάνουν σημαντικά την ενσωματωμένη ενέργεια του υλικού.

Η εξόρυξη, η σύνθλιψη και η επεξεργασία αδρανών αυξάνουν τα ενσωματωμένα μεγέθη του σκυροδέματος. Οι εργασίες εξόρυξης, μεταφοράς πρώτων υλών σε μονάδες επεξεργασίας, το κοσκίνισμα, το πλύσιμο, η σύνθλιψη και το άλεσμα των αδρανών για την τήρηση των προτύπων ποιότητας, καταναλώνουν σημαντικά ποσά ενέργειας και παράγουν ρύπους, καθιστώντας το σκυρόδεμα ένα υλικό με αυξημένη ενσωματωμένη ενέργεια. Η εξόρυξη αποτελεί ένα στάδιο που απαιτεί σημαντική κατανάλωση ενέργειας ωστόσο η αυξημένη τιμή του υλικού οφείλεται κυρίως στην παραγωγή τσιμέντου, που αποτελεί την πιο ενεργοβόρα διαδικασία από όλα τα στάδια του κύκλου ζωής του σκυροδέματος.

Παράλληλα, η χρήση κλιβάνου υψηλής θερμοκρασίας που απαιτείται για την παραγωγή κλίνκερ, του κύριου συστατικού του τσιμέντου, καταναλώνει μεγάλες ποσότητες ενέργειας, κυρίως με τη μορφή ορυκτών καυσίμων, αυξάνοντας την ενσωματωμένη ενέργεια του σκυροδέματος. Ωστόσο υπάρχουν τρόποι για να μετριαστεί το περιβαλλοντικό αποτύπωμα και να μειωθεί η συνολική ενέργεια του υλικού. Η χρήση εναλλακτικών καυσίμων ή πιο ενεργειακά αποδοτικών κλιβάνων ενδεχομένως να περιορίσει τον βαθμό της ενσωματωμένης ενέργειας, όμως η ανακύκλωση του υλικού είναι εκείνη που θα μειώσει ραγδαία τις εκπομπές άνθρακα και την ανάγκη για παραγωγή σκυροδέματος.

Σημαντικά ποσά ενέργειας δαπανώνται και στη μεταφορά από λατομεία σε εργοστάσια και από εκεί σε εργοτάξια. Η απόσταση, ο τρόπος μεταφοράς, η συνολική ποσότητα του προϊόντος και η απόδοση των καυσίμου των οχημάτων επηρεάζουν την ενσωματωμένη ενέργεια που σχετίζεται με τη μεταφορά. Πρόσθετη ενέργεια καταναλώνεται και κατά την κατασκευή ενός έργου μέσω της χρήσης ειδικών εξαρτημάτων, τη συναρμολόγηση ξυλότυπου και τη χρήση μηχανολογικού εξοπλισμού για την ενσωμάτωση των δομικών υλικών στην κατασκευή.

Επιπρόσθετα, η συντήρηση μιας κατασκευής από σκυρόδεμα, όπως κάποια επισκευή μπορεί να αυξήσει έστω και ελάχιστα την ενσωματωμένη ενέργεια του υλικού. Σημαντικότερο στάδιο αποτελεί το τέλος ζωής του κτιρίου που συνεπάγεται με κατεδάφιση και απόρριψη των υλικών από σκυρόδεμα. Αυτό θα είχε ως συνέπεια να αυξηθεί το ενεργειακό κόστος, αν και το σκυρόδεμα μπορεί να ανακυκλωθεί, μειώνοντας σημαντικά τις περιβαλλοντικές του συνέπειες.

Λύση στις ενεργειακές απαιτήσεις που εμφανίζονται σε όλα τα στάδια του κύκλου ζωής του σκυροδέματος μπορεί να δώσει η ανακύκλωση του υλικού, έτσι όταν κλείσει ο πρώτος κύκλος ζωής του υλικού να συνεχιστεί ο επόμενος χωρίς να χρειάζεται να επαναληφθούν οι φάσεις της εξόρυξης και της παραγωγής. Επίσης, η ενσωμάτωση ανακυκλωμένων αδρανών στο μείγμα τσιμέντου ενδεχομένως να συνέβαλε στη μείωση της ενσωματωμένης ενέργειας του υλικού. Παράλληλα, νέες και καινοτόμες διαδικασίες παραγωγής υπόσχονται μικρότερες ενεργειακές δαπάνες ενώ η προώθηση τσιμέντων με χαμηλές εκπομπές άνθρακα οδηγούν στην ελαχιστοποίηση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος του σκυροδέματος διατηρώντας παράλληλα τη δομική του ακεραιότητα και απόδοση του υλικού (Woubishet et al., 2019).

2.5.2 Ενσωματωμένη Ενέργεια & CO_2 Χάλυβα

Ο χάλυβας αποτελεί ένα κοινό υλικό δόμησης με εξαιρετικές ιδιότητες που όμως απαιτεί σημαντικά ποσά ενέργειας. Η υψηλή αντοχή και ανθεκτικότητα που παρουσιάζει επιτρέπει αποτελεσματικό δομικό σχεδιασμό ενώ το γεγονός ότι είναι ανακυκλώσιμο υλικό με καλές υποδομές ανακύκλωσης μειώνει τον όγκο των αποβλήτων και διευρύνει τη χρήση του στις κατασκευές. Όμως, οι υψηλές εκπομπές άνθρακα και η σημαντική κατανάλωση ενέργειας που σχετίζονται με την παραγωγή χάλυβα, τον καθιστά ως ένα από τα πιο ενεργοβόρα υλικά.

Συγκεκριμένα, οι δραστηριότητες που σχετίζονται με την εξόρυξη του μεταλλεύματος, τη τήξη, την επεξεργασία και τη παραγωγή χάλυβα προϋποθέτουν υψηλές θερμοκρασίες που συνεπάγονται με κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας και ορυκτών καυσίμων. Η παραγωγή χάλυβα αντιπροσωπεύει σημαντικό μέρος της παγκόσμιας κατανάλωσης ενέργειας και εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, με αποτέλεσμα την υψηλή ενσωματωμένη ενέργεια του υλικού. Η ενσωματωμένη ενέργεια του χάλυβα περιλαμβάνει όλες τις δραστηριότητες που σχετίζονται με την εξόρυξη του μεταλλεύματος, τη μεταφορά σε χαλυβουργεία και τις διαδικασίες παραγωγής για τη διαμόρφωση του χάλυβα στην τελική του μορφή. Ομοίως, το

ενσωματωμένο CO_2 του χάλυβα περιλαμβάνει τις εκπομπές από όλα τα στάδια παραγωγής και τις δραστηριότητες που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Ωστόσο η ενσωματωμένη ενέργεια και το ενσωματωμένο CO_2 μπορεί να ποικίλλουν ανάλογα με τη μέθοδο παραγωγής, την πηγή ενέργειας που χρησιμοποιείται στην παραγωγή, τις αποστάσεις μεταφοράς και την αποτελεσματικότητα των διαδικασιών παραγωγής.

Το στάδιο της εξόρυξης και επεξεργασίας των πρώτων υλών του χάλυβα είναι ενεργειακά απαιτητικό. Οι τεχνικές εξόρυξης και οι μέθοδοι επεξεργασίας δαπανούν αρκετή ενέργεια και παράγουν σημαντικές εκπομπές CO_2 ενώ η χρήση και λειτουργία των μηχανημάτων για εκσκαφές και μεταφορές απαιτεί ορυκτά καύσιμα. Συνάμα, η φάση παραγωγής χάλυβα είναι ιδιαιτέρως ενεργοβόρα καθώς περιλαμβάνει την τήξη του μεταλλεύματος σε υψικαμίνους, απαιτώντας τεράστιες εισροές ενέργειας για θέρμανση, διύλιση και διαμόρφωση του χάλυβα. Παράλληλα με την κατανάλωση ενέργειας, εκπέμπεται CO_2 και άλλα αέρια του θερμοκηπίου, κυρίως λόγω της καύσης ορυκτών. Η ενσωματωμένη ενέργεια και ο ενσωματωμένος άνθρακας σε αυτό το στάδιο είναι σε πολύ υψηλά επίπεδα, ειδικά όταν πρόκειται για συμβατικές διαδικασίες παραγωγής χάλυβα.

Η μεταφορά μεταλλεύματος σε χαλυβουργεία και η τελική διανομή του δομικού χάλυβα στα εργοτάξια απαιτούν ενέργεια και καύσιμα για την εύρυθμη λειτουργία τους. Η ενσωματωμένη ενέργεια και ο ενσωματωμένος άνθρακας στις μεταφορές εξαρτούνται σε μεγάλο βαθμό από την διανυθείσα απόσταση, τον τρόπο μεταφοράς και τον τύπο και την απόδοση του καυσίμου. Ακόμη, κατά τη φάση κατασκευής και λειτουργίας του κτιρίου ο δομικός χάλυβας συμβάλει στις ενεργειακές απαιτήσεις των κτιρίων και στην αύξηση του ενεργειακού περιεχομένου του υλικού. Η τιμή του μπορεί να ποικίλλει ανάλογα με την αντοχή του χάλυβα στον χρόνο, την ενεργειακή του απόδοση και εάν χρησιμοποιείται σε εφαρμογές που διευκολύνουν τη δέσμευση άνθρακα ή τη μείωση των εκπομπών. Επίσης, αξίζει να σημειωθεί ότι οι μεταλλικές κατασκευές χρειάζονται συντήρηση καθώς απαιτούν πρόσθετες επικαλύψεις (βαφές) ή επεξεργασία για την πρόληψη της διάβρωσης και την παράταση της διάρκειας ζωής τους, κάτι που μπορεί να έχει περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

Τέλος, πρέπει να επισημανθεί ότι ο χάλυβας είναι ένα υλικό που ανακυκλώνεται όμως η ενέργεια που δαπανάται για την ανακύκλωση του προστίθεται στην ενσωματωμένη ενέργεια του

υλικού. Η ανακύκλωση χάλυβα απαιτεί συνήθως λιγότερη ενέργεια και έχει χαμηλότερες εκπομπές CO_2 σε σύγκριση με την πρωτογενή του παραγωγή καθώς αποφεύγεται η εξόρυξη και η επεξεργασία μεταλλευμάτων. Ως εκ τούτου, ο ενσωματωμένος άνθρακας που σχετίζεται με την ανακύκλωση χάλυβα είναι χαμηλότερος από εκείνον της πρωτογενούς παραγωγής.

Οι προσπάθειες για τη μείωση της ενσωματωμένης ενέργειας και του ενσωματωμένου CO_2 του χάλυβα επικεντρώνονται στη βελτίωση της παραγωγικής διαδικασίας και στην αύξηση της χρήσης ανακυκλωμένου χάλυβα, στη μετάβαση σε πηγές ενέργειας με χαμηλότερες εκπομπές άνθρακα και στην υιοθέτηση εναλλακτικών μεθόδων παραγωγής. Τέλος, οι καινοτομίες στις τεχνολογίες παραγωγής και η εφαρμογή βιώσιμων πρακτικών καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής του χάλυβα στοχεύουν στην περαιτέρω μείωση του περιβαλλοντικού του αποτυπώματος (Ahmed M. et al., 2021).

2.5.3 Ενσωματωμένη Ενέργεια & CO_2 Αλουμινίου

Το αλουμίνιο αποτελεί ένα ανθεκτικό δομικό υλικό που παρουσιάζει υψηλή αντοχή σε σχέση με το βάρος του και είναι κατάλληλο για ποικίλα κατασκευαστικά έργα. Επίσης, είναι ανακυκλώσιμο υλικό με υψηλά ποσοστά ανακύκλωσης, προσφέροντας εξοικονόμηση ενέργειας και πόρων. Ωστόσο, η πρωτογενής παραγωγή του αποτελεί μια από τις πιο ενεργοβόρες βιομηχανικές διεργασίες, συμβάλλοντας σε υψηλές εκπομπές άνθρακα και μεγάλη ενσωματωμένη ενέργεια. Το αλουμίνιο και ο χάλυβας είναι μέταλλα υψηλής ενσωματωμένης ενέργειας που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή κτιρίων, όμως το αλουμίνιο, αν και πολύ ελαφρύτερο από τον χάλυβα, καταναλώνει περίπου έξι φορές περισσότερη ενέργεια από τον χάλυβα ανά μονάδα βάρους.

Η εξόρυξη μεταλλεύματος βωξίτη και οι διεργασίες διύλισης και ανάκτησης καθαρού αλουμινίου μέσω ηλεκτρόλυσης της αλουμίνας (οξείδιο του αλουμινίου), καταναλώνουν σημαντικές ποσότητες ηλεκτρικής ενέργειας, παρουσιάζουν μεγάλο περιβαλλοντικό αποτύπωμα και εκπέμπουν τοξικούς ρύπους. Το στάδιο της εξόρυξης απαιτεί σημαντικές εισροές ενέργειας, κυρίως από ορυκτά καύσιμα για την εκσκαφή και τη μεταφορά στο εργοστάσιο παραγωγής, παράγοντας εκπομπές CO_2 και αυξάνοντας την τιμή του ενσωματωμένου άνθρακα του υλικού. Σε αυτό συμβάλει και η διαδικασία επεξεργασίας και χημικής διεργασίας της αλουμίνας για την ανάκτηση αλουμινίου καθώς η ηλεκτρική ενέργεια που δαπανάται είναι πάρα πολύ υψηλή.

Κατά το στάδιο κατασκευής, το αλουμίνιο υπόκειται σε τροποποιήσεις και διαμορφώνεται στο σχήμα και στη μορφή που απαιτείται. Ωστόσο, η μηχανική κατεργασία και το φινίρισμα του στις κατασκευές απαιτούν πρόσθετες εισροές ενέργειας. Ο ενσωματωμένος άνθρακας κατά τη φάση κατασκευής εξαρτάται από τις πηγές ενέργειας που χρησιμοποιούνται στις παραπάνω διαδικασίες, καθώς και από την αποτελεσματικότητα των μεθόδων παραγωγής. Η μεταφορά δομικού αλουμινίου είναι πανομοιότυπη με τα υπόλοιπα δομικά υλικά και η τάξη της ενσωματωμένης ενέργειας και των εκπομπών CO_2 εξαρτώνται από την απόσταση, τον τύπο του οχήματος και το ορυκτό καύσιμο που χρησιμοποιείται.

Το αλουμίνιο είναι ελαφρύ υλικό και ιδιαίτερα ανθεκτικό στη διάβρωση, συνεπώς επιλέγεται σε πολλαπλές εφαρμογές. Ωστόσο, η ενσωματωμένη ενέργεια του εξαρτάται εμμέσως από την εφαρμογή του. Αυτό σημαίνει ότι αν και παρουσιάζει υψηλές ενεργειακές απαιτήσεις στα στάδια εξόρυξης και παραγωγής, χρησιμοποιείται σε εφαρμογές που αντισταθμίζουν τα αρχικά ενσωματωμένα ενεργειακά μεγέθη του. Όσον αφορά την ανακύκλωση του αλουμινίου, είναι δεδομένο ότι δαπανάται λιγότερη ενέργεια σε σύγκριση με την πρωτογενή παραγωγή του ενώ η ενσωματωμένη ενέργεια και οι εκπομπές CO_2 είναι μικρότερες λόγω παράλειψης των αρχικών σταδίων.

Συμπερασματικά, η πρωτογενής παραγωγή του αλουμινίου είναι ιδιαίτερα ενεργοβόρα και έχει σημαντικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα. Η ανακύκλωση του αλουμινίου και η επαναχρησιμοποίηση του μπορεί να συμβάλει στη μείωση του ενσωματωμένου άνθρακα και τον μετριασμό των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Στο ίδιο μήκος κύματος, η βελτίωση της παραγωγικής διαδικασίας και η προώθηση βιώσιμων πρακτικών μπορούν να περιορίσουν την ενέργεια που δαπανάται για την παραγωγή του (Stacey M., 2017).

2.5.4 Ενσωματωμένη Ενέργεια & CO_2 Χαλκού

Ο χαλκός αποτελεί ένα μέταλλο που παρουσιάζει μεγάλη αντοχή σε διάβρωση, υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα και σημαντική ελατότητα. Αυτές οι ιδιότητες του, τον καθιστούν κατάλληλο για πολλές χρήσεις, όπως οι ηλεκτρικές καλωδιώσεις και τα υδραυλικά συστήματα. Ο χαλκός όταν χρησιμοποιείται ως συστατικό σε αντλίες θερμότητες και ηλιακούς συλλέκτες, συμβάλλει στη ενεργειακή αναβάθμιση του κτιρίου μέσω παραγωγής ανανεώσιμης ενέργειας. Ωστόσο, η εξόρυξη του μεταλλεύματος όπου εμπεριέχεται ο χαλκός σε συνδυασμό με την

βιομηχανική του επεξεργασία απαιτούν μεγάλα ποσά ενέργειας για όλες τις διεργασίες εμπλουτισμού, τήξης και διύλισης. Αυτό συνεπάγεται με υψηλές τιμές ενσωματωμένης ενέργειας και άνθρακα, οι οποίες δεν επιθυμητές στα δομικά υλικά.

Η εξόρυξη και οι διεργασίες επεξεργασίας που διέπουν την ανάκτηση του χαλκού από το μετάλλευμα είναι ενεργειακά δαπανηρές διαδικασίες και εκπέμπουν σημαντικές ποσότητες διοξειδίου του άνθρακα και άλλων ρύπων. Μάλιστα, κατά τη φάσης της διύλισης, όπου επιδιώκεται η παραγωγή καθαρού μετάλλου χαλκού, καταναλώνονται μεγάλα ποσά ενέργειας που οφείλονται στη καύση ορυκτών καυσίμων για την επίτευξη υψηλών θερμοκρασιών που απαιτούνται για τις χημικές αντιδράσεις που επιτρέπουν τον διαχωρισμό του χαλκού από τα υπόλοιπα πρόσμικτα. Αυτό έχει ως συνέπεια, ο χαλκός να παρουσιάζει υψηλή ενσωματωμένη ενέργεια, παρόμοιας τάξης με αυτή του χάλυβα.

Μετά το στάδιο παραγωγής, ο χαλκός μορφοποιείται ανάλογα με τις απαιτήσεις και χρησιμοποιείται κυρίως σε σωληνώσεις, υλικά στέγης ενώ βρίσκει εφαρμογές με την μορφή σύρματος σε πολλές ηλεκτρολογικές εγκαταστάσεις. Η διαδικασία διαμόρφωσης και φινιρίσματος του τελικού προϊόντος χαλκού απαιτεί πρόσθετες εισροές ενέργειας, όμως το ποσοστό του ενσωματωμένου CO_2 και ενέργειας εξαρτάται από το είδος και την αποτελεσματικότητα των διεργασιών. Όσον αφορά τη ενέργεια που καταναλώνεται κατά τη μεταφορά, αυτή εξαρτάται όπως και στα περισσότερα δομικά υλικά από την απόσταση του εργοστασίου από την περιοχή κατασκευής, το όχημα μεταφοράς και την ποιότητα του καυσίμου.

Ο χαλκός είναι ένα υλικό που αντέχει στο χρόνο, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε χαμηλότερες εκπομπές ρύπων κατά τη διάρκεια ζωής του. Αξιοσημείωτο είναι δε το γεγονός ότι αποτελεί ένα υλικό με ενθαρρυντικά ποσοστά ανακύκλωσης και επαναχρησιμοποίησης, συνεισφέροντας στην εξοικονόμηση ενέργειας και στον περιορισμό του συνολικού περιβαλλοντικού αποτυπώματος, μετρούμενο σε δείκτες ενσωματωμένης ενέργειας και CO_2. Η ανακύκλωση του χαλκού χρειάζεται λιγότερη ενέργεια συγκριτικά με την πρωτογενή παραγωγή του υλικού οδηγώντας σε μικρότερες τιμές ενσωματωμένης ενέργειας.

Για τον περιορισμό των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των διαδικασιών επεξεργασίας τόσο του χαλκού όσο και των υπόλοιπων μετάλλων, η ανακύκλωση αποτελεί μια λύση αλλά όχι την μοναδική. Σημαντικά βήματα πρέπει να γίνουν ως προς τη βελτίωση των παραγωγικών

διαδικασιών, μέσω εισαγωγής καινοτόμων και φιλικών προς το περιβάλλον μεθόδων και τη διαχείριση του όγκου των αποβλήτων με βιώσιμες πρακτικές (Trissot O., 2022).

2.5.5 Ενσωματωμένη Ενέργεια & CO_2 Ξύλου

Το ξύλο αποτελεί ένα οικολογικό και ανανεώσιμο δομικό υλικό που παρουσιάζει μικρότερους ενεργειακούς δείκτες κατανάλωσης ενέργειας και εκπομπών ρύπων, σε σύγκριση με άλλα κοινά υλικά δόμησης. Οι βιώσιμες μέθοδοι συγκομιδής και επεξεργασίας απαιτούν μικρά ποσά ενέργειας οδηγώντας σε χαμηλά επίπεδα ενσωματωμένης ενέργειας, καθιστώντας το ξύλο ως ένα ενεργειακά αποδοτικό υλικό και ιδανική επιλογή για αειφόρα έργα. Ένα ακόμη χαρακτηριστικό που ενισχύει την αξία του ξύλου είναι η ικανότητα του να δεσμεύει CO_2 συνεισφέροντας στον περιορισμό των ρύπων και της κλιματικής αλλαγής. Στον αντίποδα, τα ξύλα είναι επιρρεπή σε συνθήκες υγρασίας και χωρίς την κατάλληλη προστασία και συντήρηση είναι εκτεθειμένα σε έντομα και σήψη. Επιπλέον κατά την επιλογή του ξύλου ως δομικό υλικό πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν τόσο η διαθεσιμότητα της επιλεχθείσας δομικής ξυλείας όσο και οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις των μεγάλων αποστάσεων μεταφοράς.

Όσον αφορά τον κύκλο ζωής του ξύλου και την επίδραση του κάθε σταδίου στην ενσωματωμένη ενέργεια και στο ενσωματωμένο CO_2, πρέπει να σημειωθεί ότι κάθε φάση απαιτεί διαφορετικές ενεργειακές εισροές και παράγει μεταβλητούς ρύπους. Η συλλογή πρώτων υλών μέσω υλοτόμησης και η επεξεργασία του για παραγωγή τελικών προϊόντων καταναλώνει πολύ μικρά ποσά ενέργειας ενώ οι εκπομπές άνθρακα είναι ελάχιστες. Οι ρύποι και η ενέργεια που οφείλονται στις μεταφορές μεριμνούνται μόνο όταν η δομική ξυλεία απέχει πολύ μεγάλη απόσταση από την περιοχή κατασκευής και χρησιμοποιούνται τύποι οχημάτων που καταναλώνουν σημαντικές ποσότητες καυσίμων.

Παράλληλα, η ενέργεια που καταναλώνεται κατά την κατασκευή, τη συναρμολόγηση της δομικής ξυλείας στο κτίριο και τη συντήρηση κυμαίνεται στα ίδια επίπεδα καταναλισκόμενης ενέργειας με τα προηγούμενα στάδια ενώ οι εκπομπές CO_2 είναι σχεδόν μηδενικές. Το ξύλο όταν φτάσει στο τέλος ζωής του μπορεί να ανακυκλωθεί και να επαναχρησιμοποιηθεί ή να απορριφθεί και να αποσυντεθεί ή να καεί, απελευθερώνοντας το αποθηκευμένο CO_2 στην ατμόσφαιρα και συμβάλλοντας στον μετριασμό του οικολογικού αποτυπώματος. (Schrenk D. & Amiri A., 2023).

2.5.6 Ενσωματωμένη Ενέργεια & CO_2 Τούβλων

Τα τούβλα, όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο, μπορούν να παρασκευαστούν είτε από σκυρόδεμα ή από πυλό, ενώ οι διαδικασίες παραγωγής που τα συνοδεύουν απαιτούν σημαντικά ποσά ενέργειας. Στην συγκεκριμένη υποενότητα θα αναλυθεί ο τρόπος που επιδρά ο κύκλος ζωής του υλικού στην ενσωματωμένη ενέργεια και στον ενσωματωμένο άνθρακα μόνο για τα τούβλα που είναι κατασκευασμένα από πυλό.

Τα τούβλα ή αλλιώς οπτόπλινθοι αποτελούν ένα ανθεκτικό και πυρίμαχο δομικό υλικό που προσφέρει στις κατασκευές καλή θερμική μόνωση και αξιόλογη θλιπτική αντοχή και είναι συνήθως τοπικά διαθέσιμο. Τουναντίον, κατά την διαδικασία παραγωγής, απαιτούνται μεγάλες εισροές ενέργειας και πόρων για την επίτευξη υψηλών θερμοκρασιών για το ψήσιμο των τούβλων σε κλίβανους, αυξάνοντας την ενσωματωμένη ενέργεια του υλικού. Παράλληλα, η συγκεκριμένη διαδικασία συνοδεύεται με την εκπομπή πολλαπλών ρύπων, από CO_2 έως και σωματίδια και οξείδια του θείου και του αζώτου, συμβάλλοντας στην αύξηση του ενσωματωμένου άνθρακα των οπτόπλινθων και στην ατμοσφαιρική ρύπανση.

Ο κύκλος ζωής των οπτόπλινθων ξεκινά με την εκσκαφή ή την εξόρυξη πυλού που αποτελεί το βασικό συστατικό τους. Η εξόρυξη μπορεί να χρειάζεται από απλό μηχανολογικό εξοπλισμό για εργασίες μικρής κλίμακας έως βαριά μηχανήματα για εργασίες μεγάλης κλίμακας, για τον λόγο αυτό η καταναλισκόμενη ενέργεια και οι εκπομπές άνθρακα εξαρτώνται άμεσα από το μέγεθος της εκσκαφής. Αντιθέτως, η διαδικασία επεξεργασίας αποτελεί το πιο ενεργοβόρο στάδιο καθώς όπως προαναφέρθηκε απαιτεί την καύση ορυκτών καυσίμων για να αναπτυχθούν υψηλές θερμοκρασίες και να παρασκευαστούν δομικά τούβλα.

Συνήθως, όταν χρησιμοποιούνται τούβλα στις κατασκευές, η διανυθείσα απόσταση από το εργοστάσιο έως και το εργοτάξιο δεν είναι πολύ μεγάλη, συνεπώς η δαπανούμενη ενέργεια και οι εκπομπές CO_2 που οφείλονται στην μεταφορά είναι ελάχιστες. Συνάμα, η εγκατάσταση και η ενσωμάτωση τούβλων στην κατασκευή δεν απαιτούν σημαντικά ποσά ενέργειας, ενώ αξιοσημείωτο είναι ότι μετά την κατασκευή, τα τούβλα συνεισφέρουν στη θερμική μάζα της κατασκευής περιορίζοντας τις απαιτήσεις για θέρμανση και ψύξη, ελαττώνοντας κατά αυτόν τον τρόπο την συνολική ενέργεια του κτιρίου. Σχετικά με το τέλος ζωής, τα κτίρια όταν ανακαινίζονται ή κατεδαφίζονται ενδέχεται να περιέχουν σημαντικά ποσότητες οπτόπλινθων, οι

οποίες μπορούν είτε να απορριφθούν σε χώρους υγειονομικής ταφής ή να ανακυκλωθούν, καθώς το τούβλο είναι ένα ανακυκλώσιμο υλικό και μπορεί να χρησιμοποιηθεί εκ νέου σε νέες κατασκευαστικές εφαρμογές.

Συμπερασματικά, τα τούβλα ενδέχεται να εμφανίζουν υψηλή ενσωματωμένη ενέργεια και μεγάλο δείκτη ενσωματωμένου άνθρακα, τα οποία οφείλονται κυρίως στην βιομηχανική τους επεξεργασία που αποτελεί μια ενεργοβόρα διαδικασία πριν προκύψει το τελικό δομικό προϊόν. Ωστόσο, τα τούβλα λόγω της μεγάλης ανθεκτικότητας στο χρόνο μπορούν να αντισταθμίσουν ως ένα βαθμό το περιβαλλοντικό αποτύπωμα της διαδικασίας παραγωγής τους, όταν ανακυκλώνονται και επαναχρησιμοποιούνται. Η τάξη της ενσωματωμένης ενέργειας και του ενσωματωμένου άνθρακα του συγκεκριμένου υλικού ποικίλει ανάλογα με τις διεργασίες παραγωγής, την διανυθείσα απόσταση μεταφοράς και με την διαχείριση του όταν φτάσει στο τέλος του κύκλου ζωής (Marwa D. et al., 2020).

2.5.7 Ενσωματωμένη Ενέργεια & CO_2 Φυσικών Λίθων

Οι φυσικοί λίθοι αποτελούν ένα από τα παλαιότερα οικοδομικά υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στην κατασκευαστική βιομηχανία. Λίθοι όπως το μάρμαρο, ο γρανίτης και ο ασβεστόλιθος χρησιμοποιούνται ακόμη και σήμερα λόγω της ανθεκτικότητας τους στον χρόνο και της υψηλής αντοχής σε θλίψη. Παράλληλα, προσδίδουν στις κατασκευές καλή και φυσική αισθητική και εμφανίζουν χαμηλές απαιτήσεις συντήρησης, ωστόσο οι διαδικασίες εξόρυξης και επεξεργασίας των πετρωμάτων φέρουν μεγάλες περιβαλλοντικές συνέπειες, όπως η διάβρωση του εδάφους, η επέμβαση σε υπάρχοντα οικοσυστήματα, η ατμοσφαιρική ρύπανση και η μόλυνση των υδάτων.

Η εξόρυξη φυσικών λίθων γίνεται στα λατομεία με χρήση βαρέων οχημάτων που καταναλώνουν μεγάλα ποσά ενέργειας που προέρχονται από ορυκτά καύσιμα, ενώ η λειτουργία των μηχανημάτων συμβάλλει στις εκπομπές CO_2. Μετά από αυτό το στάδιο επακολουθεί η φάση της βιομηχανικής τους επεξεργασίας για να αποκτήσουν το επιθυμητό μέγεθος και σχήμα. Οι διεργασίες που συνοδεύουν την επεξεργασία των πετρωμάτων απαιτούν ηλεκτρική και θερμική ενέργεια για την κοπή, τη στίλβωση και τη λείανση των φυσικών λίθων, παράγοντας ρύπους, το μέγεθος των οποίων εξαρτάται από τον βαθμό και τον τύπο επεξεργασίας τους.

Αξιοσημείωτη είναι δε, η κατανάλωση ενέργειας που σχετίζεται με την μεταφορά των πετρωμάτων, καθώς ο όγκος και το βάρος των λίθων σε συνδυασμό με την δυνητικά μεγάλη απόσταση του λατομείου από το εργοστάσιο παραγωγής και από εκεί στην περιοχή ανάπτυξης του κατασκευαστικού έργου, προϋποθέτει την χρήση πολλών τύπων οχημάτων που εκπέμπουν πολλούς ρύπους και καταναλώνουν ορυκτά καύσιμα και σημαντικά ποσά ενέργειας. Παράλληλα, κατά τη φάση κατασκευής και ενσωμάτωσης της πέτρας στην κατασκευή, απαιτούνται ειδικευμένοι τεχνίτες, που χρειάζονται ειδικό εξοπλισμό και μηχανήματα για το τελικό φινίρισμα και τοποθέτηση των λίθων στην κατασκευή, είτε με τη μορφή δομικών στοιχείων ή επενδύσεων και πλακοστρώσεων, οδηγώντας σε αύξηση της καταναλισκόμενης ενέργειας του υλικού. Ακόμη είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι η ανακύκλωση και η επαναχρησιμοποίηση των λίθων είναι εφικτή, μειώνοντας μάλιστα αισθητά την τάξη της ενσωματωμένης ενέργειας και των εκπομπών άνθρακα του υλικού.

Συνολικά, οι φυσικοί λίθοι παρουσιάζουν υψηλή ενσωματωμένη ενέργεια και μεγάλα ποσά ενσωματωμένου άνθρακα σε σύγκριση με άλλα δομικά υλικά. Αυτό οφείλεται κατά ένα μεγάλο βαθμό στις ενεργοβόρες διεργασίες εξόρυξης και επεξεργασίας των φυσικών λίθων έτσι ώστε να πάρουν την τελική τους μορφή. Ωστόσο, τα μεγέθη αυτά μπορούν να μεταβληθούν ανάλογα με το είδος των λίθων, τις διαδικασίες επεξεργασίας, την πηγή των πετρωμάτων, τη διανυθείσα απόσταση και τις κατασκευαστικές μεθόδους. Δεν πρέπει να παραλείπεται το γεγονός ότι η πέτρα έχει πολύ μεγάλη διάρκεια ζωής που μπορεί να αντισταθμίσει ορισμένες περιβαλλοντικές συνέπειες που έχουν οι διαδικασίες παραγωγής της, και να περιορίσει την συνολική ενσωματωμένη ενέργεια που δαπανάται στον κύκλο ζωής του υλικού. Σε αυτό μπορούν να συνεισφέρουν και κάποιες βιώσιμες πρακτικές όπως η τοπική προμήθεια λίθων και η προτίμηση πιο οικολογικών μεθόδων επεξεργασίας που θα βοηθήσουν στη μείωση του οικολογικού αποτυπώματος των φυσικών λίθων στις κατασκευές (Kristensen S., 2016).

2.5.8 Ενσωματωμένη Ενέργεια & CO_2 Γυαλιού

Το γυαλί αποτελεί ένα ευέλικτο δομικό υλικό που προσφέρει ιδιαίτερη αισθητική στα κατασκευαστικά έργα βρίσκοντας ποικίλες εφαρμογές σε κτίρια όπως παράθυρα, πόρτες, προσόψεις και χωρίσματα. Η χρήση γυαλιού ενισχύει τον φυσικό φωτισμό στα κτίρια, αναβαθμίζει την αισθητική και συμβάλλει στην ενεργειακή απόδοση του κτιρίου, μειώνοντας την ανάγκη για θέρμανση και τεχνητό φωτισμό. Παράλληλα, είναι ένα ανακυκλώσιμο υλικό που

συμβάλει στην εξοικονόμηση πόρων και απορριμμάτων, ωστόσο είναι ενεργοβόρο καθώς χρειάζεται μεγάλα ποσά ενέργειας για την επίτευξη υψηλών θερμοκρασία που απαιτούνται για την παραγωγή του. Το γεγονός δε ότι είναι ένα διαφανές υλικό, μέσα από το οποίο διέρχονται οι ακτίνες του ήλιου, έχει ως συνέπεια να αυξάνεται η θερμοκρασία των κτιρίων, το οποίο δεν είναι επιθυμητό σε περιοχές με θερμά κλίματα, καθώς αυξάνεται η ενέργεια που καταναλώνεται για την ψύξη των κτιρίων.

Η παραγωγή του γυαλιού περιλαμβάνει την τήξη του μείγματος πυριτικής άμμου, ανθρακικού νατρίου και ασβεστόλιθου σε κλίβανο υψηλής θερμοκρασίας, που απαιτεί σημαντικές εισροές ενέργειας με την μορφή ορυκτών καυσίμων, τα οποία κατά την καύση απελευθερώνουν μεγάλες εκπομπές CO_2. Μετά την τήξη του γυαλιού, επακολουθεί η μορφοποίηση και σκλήρυνση του με σκοπό την τελική του διαμόρφωση και την βελτίωση της αντοχής του. Αυτές οι διαδικασίες απαιτούν θέρμανση και ψύξη του υλικού καταναλώνοντας πρόσθετα ποσά ενέργειας.

Όσον αφορά την ενέργεια που δαπανάται για την μεταφορά, αυτή σχετίζεται με την διανυθείσα απόσταση, τον τύπο του οχήματος και την αποδοτικότητα του καυσίμου, οδηγώντας σε εκπομπές ρύπων που αυξάνουν τον ενσωματωμένο άνθρακα του υλικού. Από την άλλη, η εγκατάσταση και η συντήρηση του γυαλιού σε μεγάλα έργα προϋποθέτει ειδικό εξοπλισμό και μηχανήματα, που απαιτούν μη αμελητέα ποσά ενέργειας. Όταν έρθει το τέλος του κύκλου ζωής του, το γυαλί μπορεί να απορριφθεί σε χώρους υγειονομικής ταφής ή μπορεί να ανακυκλωθεί επιδρώντας θετικά στη μείωση της ενσωματωμένης ενέργειας και των εκπομπών CO_2.

Συμπερασματικά, τα ενεργειακά μεγέθη του γυαλιού ενδέχεται να είναι αυξημένα σε σύγκριση με άλλα οικοδομικά υλικά, κυρίως λόγω της βιομηχανικής επεξεργασίας του υλικού. Ωστόσο, το ενεργειακό του περιεχόμενο ποικίλλει ανάλογα με τον τύπο του γυαλιού, τις διεργασίες παραγωγής, την συνολική απόσταση μεταφοράς και τις κατασκευαστικές μεθόδους. Επομένως, για την μείωση της καταναλισκόμενης ενέργειας και τον περιορισμό των ρύπων πρέπει να υιοθετηθούν βιώσιμες πρακτικές, όπως η ανακύκλωση και επαναχρησιμοποίηση του γυαλιού, η βελτιστοποίηση κι η επιλογή πιο οικολογικών μεθόδων παραγωγής και τέλος η προμήθεια υλικών σε τοπικό επίπεδο (Vitro Architectural Glass, 2024).

2.5.9 Ενσωματωμένη Ενέργεια & CO_2 Πολυμερών

Τα πολυμερή αποτελούν τα τελευταία χρονικά δομικά υλικά που εισήχθησαν στον κατασκευαστικό κλάδο, ωστόσο προσφέρουν επιθυμητές ιδιότητες και έχουν σημαντικό ρόλο στα σύγχρονα έργα. Η συγκεκριμένη κατηγορία υλικών περιλαμβάνει πλαστικά, ελαστομερή, PVC, καουτσούκ, κόλλες και αφρούς τα οποία βρίσκουν εφαρμογές σε παράθυρα, σωληνώσεις, στεγανοποιήσεις και μονώσεις. Τα τελευταία χρόνια η χρήση των πολυμερών στις κατασκευές αυξάνεται με γοργούς ρυθμούς και νέες εφαρμογές εμφανίζονται συνεχώς. Πρόκειται για ελαφριά και ευέλικτα υλικά που προσδίδουν στεγανότητα και θερμομονωτικές ιδιότητες στις κατασκευές. Από την άλλη βασίζονται σε πρώτες ύλες που δεν βρίσκονται σε μεγάλο απόθεμα και απαιτούνται σημαντικά ποσά ενέργειας για την παρασκευή τους, ενώ δεν πρέπει να παραλείπεται η πιθανή υποβάθμιση των πολυμερών με το χρόνο που οδηγεί σε προβλήματα συντήρησης και δυνητικής αντικατάστασης σε κτιριακές εφαρμογές.

Η ενσωματωμένη ενέργεια και ο ενσωματωμένος άνθρακας των πολυμερών ποικίλουν ανάλογα με το είδος του πολυμερούς και τις μεθόδους παραγωγής. Αυτό έχει ως συνέπεια ορισμένα πολυμερή να εμφανίζουν σχετικά χαμηλή ενσωματωμένη ενέργεια και άλλα να απαιτούν σημαντικές εισροές ενέργειας για την επεξεργασία τους σε τελικό προϊόν. Τα πολυμερή προέρχονται από ορυκτά καύσιμα, συμπεριλαμβανομένου του αργού πετρελαίου, του φυσικού αερίου, του άνθρακα και της βιομάζας. Η εξόρυξη, η επεξεργασία και η μεταφορά των πρώτων υλών συμβάλλουν δυναμικά στην άνοδο των τιμών της ενσωματωμένης ενέργειας και των εκπομπές CO_2.

Μετά από την ανάκτηση των ορυκτών πόρων έπεται η παραγωγή πολυμερών μέσω της ενεργειακά απαιτητικής χημικής διαδικασίας του πολυμερισμού η οποία εκτός από ενεργοβόρα, είναι υπεύθυνη για την εκπομπή αρκετών ρύπων στην ατμόσφαιρα. Παράλληλα με την παραπάνω διαδικασία λαμβάνει χώρα και η παραγωγή προσθέτων, όπως οι πλαστικοποιητές, οι επιταχυντές και οι χρωστικές που χρησιμοποιούνται για τη βελτίωση των ιδιοτήτων των πολυμερών. Ακολούθως, τα πολυμερή επεξεργάζονται για να πάρουν την τελική τους μορφή έπειτα από μια σειρά διεργασιών που απαιτούν ειδικό εξοπλισμό, υψηλές θερμοκρασίες και μεγάλα ποσά ενέργειας.

Η καταναλισκόμενη ενέργεια και οι παραγόμενες εκπομπές των πολυμερών σχετικά με τη μεταφορά, την εγκατάσταση και τη χρήση βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο με άλλα δομικά υλικά ενώ όσον αφορά το τέλος του κύκλου ζωής των υλικών, τα πολυμερή ανακυκλώνονται ή απορρίπτονται σε χώρους υγειονομικής ταφής. Η επιλεγμένη μέθοδος απόρριψης επηρεάζει την συνολική ενσωματωμένη ενέργεια και τις εκπομπές CO_2 των πολυμερών.

Η ανακύκλωση πολυμερών συμβάλλει στη μείωση της ζήτησης για νέες πρώτες ύλες, εξοικονομεί ενέργεια και μετριάζει τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις που σχετίζονται με την παραγωγή πολυμερών. Ωστόσο, η δυνατότητα ανακύκλωσης των πολυμερών μπορεί να ποικίλλει ανάλογα με τον τύπο του πολυμερούς, τον σχεδιασμό και τη χρήση του υλικού, το ποσοστό ανακύκλωσης και τη ζήτηση και αξιοποίηση των ανακυκλωμένων πολυμερών. Επομένως, υπάρχουν πολυμερή όπως το πολυαιθυλένιο (PET) και το πολυπροπυλένιο που ανακυκλώνονται ευρέως και άλλα όπως το πολυστερένιο που ανακυκλώνονται λιγότερο συχνά λόγω τεχνικών προκλήσεων ή περιορισμένης τεχνογνωσίας και υποδομών ανακύκλωσης. Αυτό έχει ως συνέπεια κάθε πολυμερές να πρέπει να εξετάζεται μεμονωμένα καθώς η γενική κατηγοριοποίηση των συγκεκριμένων υλικών να παρουσιάζει διαφορετικές τιμές για ενσωματωμένη ενέργεια κι ενσωματωμένο άνθρακα.

2.5.10 Ενσωματωμένη Ενέργεια & CO_2 Οικολογικών Υλικών

Τα οικολογικά υλικά είναι τα υλικά εκείνα που δίνουν προτεραιότητα στην αειφορία και στη βιωσιμότητα των κατασκευών και στοχεύουν στον περιορισμό της ρύπανσης του περιβάλλοντος, της εξάντλησης των πόρων και των παραγόμενων ρύπων. Παραδείγματα τέτοιων υλικών αποτελούν το ξύλο στις διάφορες μορφές του (ερυθρά ξυλεία, μπαμπού κλπ.), τα ανακυκλωμένα υλικά και τα φυσικά μονωτικά. Αυτά τα υλικά επιλέγονται συχνά για τις ανανεώσιμες και ενεργειακά αποδοτικές ιδιότητές τους, συμβάλλοντας στη βιώσιμη ανάπτυξη των κατασκευών. Συνεπώς, παρουσιάζουν πολύ χαμηλή τιμή ενσωματωμένης ενέργειας και μικρές εκπομπές CO_2, ωστόσο η ακριβής τιμή των δυο ενεργειακών μεγεθών ποικίλλει ανάλογα με το επιλεγμένο οικολογικό υλικό και τον κύκλο ζωής του.

Συγκεκριμένα, ο κύκλος ζωής της συγκεκριμένης κατηγορίας υλικών εκκινεί με την συγκομιδή πρώτων υλών, συνήθως με βιώσιμες και περιβαλλοντικά υπεύθυνες πρακτικές ή με την επαναχρησιμοποίηση ανακυκλωμένων δομικών υλικών. Στην συνέχεια, τα οικολογικά υλικά

επεξεργάζονται κατάλληλα με ενεργειακά αποδοτικές μεθόδους, χωρίς τη χρήση επιβλαβών χημικών ουσιών, για να μετατραπούν σε δομικά προϊόντα με ελάχιστες περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Αυτά τα δυο στάδια εμφανίζουν μικρές ενεργειακές απαιτήσεις και συνεπώς η ενσωματωμένη ενέργεια είναι σε χαμηλά επίπεδα και οι εκπεμπόμενοι ρύποι σχεδόν μηδαμινοί.

Όσον αφορά τη μεταφορά των υλικών από τις εγκαταστάσεις παραγωγής στα εργοτάξια, η ενσωματωμένη ενέργεια και ο ενσωματωμένος άνθρακάς τους εξαρτώνται από τη διανυθείσα απόσταση, τον τρόπο μεταφοράς και την επιλογή καυσίμου. Ωστόσο, αξίζει να σημειωθεί ότι η τοπική προμήθεια των υλικών και η αποκεντρωμένη παραγωγή μπορούν να συμβάλλουν στην ελαχιστοποίηση των δυο παραπάνω δεικτών. Ακολούθως, τα οικολογικά υλικά εντάσσονται στην κατασκευή και συμβάλλουν στην ενεργειακή απόδοση, στην ποιότητα του αέρα των εσωτερικών χώρων και στη βιωσιμότητα, μειώνοντας τη συνολική κατανάλωση ενέργειας και τις εκπομπές ρύπων κατά τη φάση λειτουργίας του κτιρίου (Woubishet Z.T et al., 2019).

Στο τέλος του κύκλου ζωής τους, τα οικολογικά υλικά είναι βιοαποδομήσιμα και μπορούν να κομποστοποιηθούν, μειώνοντας την ανάγκη απόρριψης σε χώρους υγειονομικής ταφής και ελαχιστοποιώντας τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Μάλιστα, η ανακύκλωση και η κομποστοποίηση αποτελούν δυο διεργασίες που μπορούν να βοηθήσουν στην ανάκτηση πολύτιμων πόρων και στη μείωση της ενσωματωμένης ενέργειας και του CO_2 που σχετίζονται με την παραγωγή νέων υλικών. Συνολικά, τα οικολογικά υλικά αποτελούν εναλλακτικά υλικά που παρέχουν λύσεις φιλικές προς το περιβάλλον, αλλά η υιοθέτησή τους μπορεί να περιορίζεται από παράγοντες όπως η διαθεσιμότητα, η καταλληλότητα και οι κανονιστικοί περιορισμοί.

3.Εργαλεία Προσδιορισμού Ενσωματωμένης Ενέργειας & CO_2

Ο υπολογισμός της ενσωματωμένης ενέργειας και άνθρακα των δομικών υλικών περιλαμβάνει την αξιολόγηση της ενέργειας που καταναλώνεται και των εκπομπών άνθρακα που απελευθερώνονται κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής αυτών των υλικών.

3.1 Αξιολόγηση Κύκλου Ζωής Δομικών Υλικών (LCA)

Η αξιολόγηση του κύκλου ζωής (LCA) των δομικών υλικών αποτελεί μια ολοκληρωμένη μέθοδο που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των υλικών σε ένα κατασκευαστικό έργο. Η LCA βασίζεται στα στάδια που αναφέρθηκαν προηγουμένως, δηλαδή την εξόρυξη πρώτων υλών, την επεξεργασία και παραγωγή δομικών υλικών, τη μεταφορά, τη λειτουργία, τη συντήρηση και την απόρριψη ή ανακύκλωση των υλικών μέχρι το τέλος του κύκλου ζωής τους. Η ανάλυση αυτών των σταδίων δίνει σημαντικές πληροφορίες σχετικά με τις ενεργειακές απαιτήσεις, τις καταναλώσεις και τις εκπομπές διάφορων δομικών υλικών, με αποτέλεσμα να βοηθούν τους μηχανικούς να παίρνουν ορθές αποφάσεις σχετικά με τις επιλογές υλικών για τον περιορισμό των περιβαλλοντικών επιπτώσεων καθ'όλη την διάρκεια του κύκλου ζωής των κτιρίων.

Από άποψη βιωσιμότητας, επιλέγονται υλικά δόμησης με μικρή ενσωματωμένη ενέργεια και χαμηλές εκπομπές άνθρακα με σκοπό τον περιορισμό του περιβαλλοντικού αποτυπώματος των κατασκευών. Η LCA αποτελεί βάση επιλογής υλικών, που όχι μόνο είναι φιλικά προς το περιβάλλον αλλά προσδίδουν κοινωνικό αντίκρισμα, λαμβάνοντας υπόψιν εργασιακές συνθήκες, ανθρώπινα δικαιώματα και αντίκτυπο στις τοπικές κοινωνίες.

Η παραπάνω μέθοδος εκτός από τις δυο βασικές ποσοτικές παραμέτρους (ενσωματωμένος άνθρακας, ενσωματωμένη ενέργεια) συνυπολογίζει και αξιολογεί μερικούς ακόμη περιβαλλοντικούς παράγοντες, όπως είναι η εξάντληση των πόρων, η κατανάλωση νερού, η ρύπανση της ατμόσφαιρας και η μόλυνση των υδάτων. Η διαδικασία της LCA μπορεί να ταξινομηθεί σε τρεις κύριες προσεγγίσεις έτσι ώστε να παρέχει μια ολοκληρωμένη εικόνα των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που σχετίζονται με κάθε στάδιο του κύκλου ζωής των δομικών υλικών. Πρόκειται για τις εξής προσεγγίσεις «cradle to gate», «cradle to grave» και «cradle to cradle». Ως cradle (λίκνος) ορίζεται η γη ή διαφορετικά το στάδιο εξόρυξης ή συγκομιδής των

πρώτων υλών και χρησιμοποιείται ως η αρχή του ορίου για τις εκτιμήσεις ενσωματωμένου άνθρακα, αποτυπώματος άνθρακα και LCA (circularecology.com).

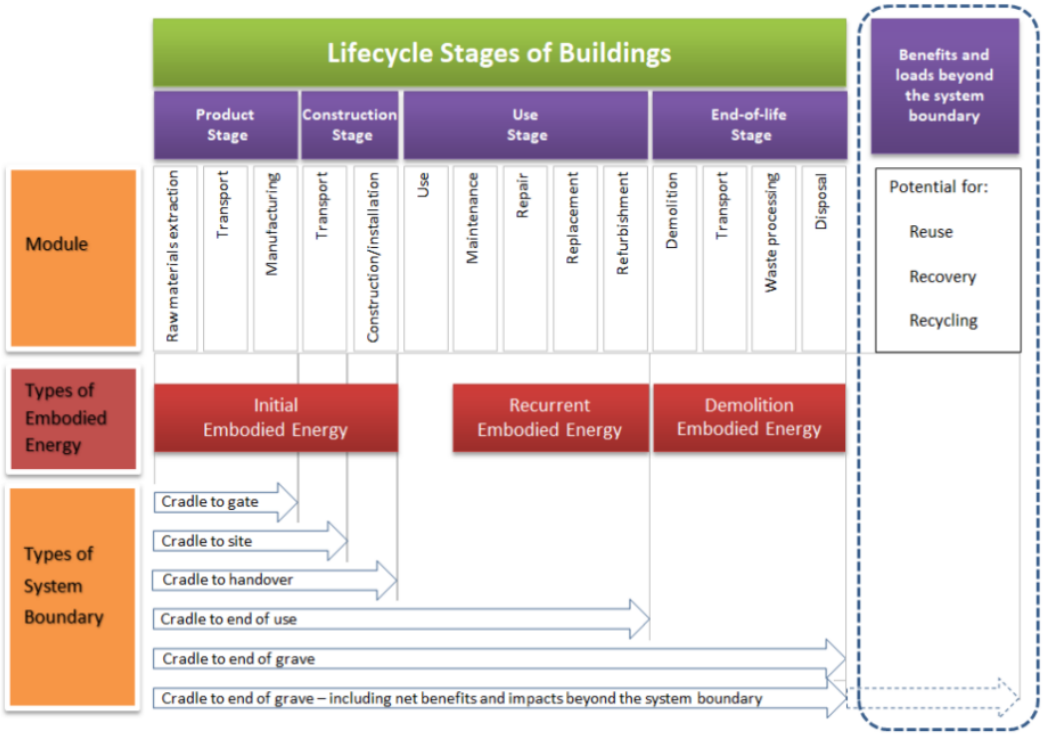
Η προσέγγιση «cradle to gate» δίνει έμφαση στο περιβαλλοντικό αποτύπωμα που αφήνει ένα υλικό από την στιγμή της εξόρυξης της πρώτης ύλης έως ότου προκύψει το τελικό δομικό προϊόν από τη βιομηχανική μονάδα, χωρίς να μεριμνούνται οι φάσεις λειτουργίας, συντήρησης και απόθεσης του δομικού υλικού. Η αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων σε αυτή τη μέθοδο εστιάζει στις μεθόδους εξόρυξης και παραγωγής καθώς θεωρείται ότι αυτά τα δυο στάδια εκπέμπουν περισσότερους ρύπους και καταναλώνουν μεγάλα ποσά ενέργειας.

Αντιθέτως, η προσέγγιση «cradle to grave» παρέχει μια πιο ολοκληρωμένη άποψη συγκριτικά με την προηγούμενη μέθοδο, αφού βασίζεται σε όλο τον κύκλο ζωής των υλικών. Η αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων ξεκινά από την φάση εξόρυξης των πόρων και συνεχίζει έως την τελική διάθεση ή ανακύκλωση, συμπεριλαμβανομένων των σταδίων μεταφοράς, λειτουργίας και συντήρησης, παρέχοντας μια πλήρη αναπαράσταση της συνολικής βιωσιμότητας του προϊόντος. Με την κατανόηση και τη βελτίωση όλων των σταδίων, επιχειρηματίες και μηχανικοί μπορούν να αποφανθούν για τα υλικά που είναι κατάλληλα για ένα δομικό έργο και να δημιουργήσουν ένα βιώσιμο και ενεργειακά αναβαθμισμένο κτίριο.

Τέλος, η προσέγγιση «cradle to cradle» λαμβάνει υπόψη την περιβαλλοντική επιβάρυνση του υλικού από την στιγμή εξαγωγής των πόρων μέχρι και την στιγμή που το προϊόν ανακυκλώνεται ή επαναχρησιμοποιείται, ξεκινώντας ένα νέο κύκλο ζωής. Η συγκεκριμένη μέθοδος παρέχει μια ολοκληρωμένη αξιολόγηση όλων των σταδίων του κύκλου ζωής ενός προϊόντος και προωθεί τον σχεδιασμό προϊόντων με τρόπο που τους επιτρέπει να ανακυκλώνονται ή να επαναχρησιμοποιούνται, εξαλείφοντας αποτελεσματικά τον όγκο των αποβλήτων. Σε αυτή την προσέγγιση, σκοπός είναι να δημιουργηθούν προϊόντα που μπορούν να επιστραφούν με ασφάλεια είτε στη φύση (βιολογικός κύκλος) είτε στη βιομηχανία (τεχνικός κύκλος) μετά την ωφέλιμη ζωή τους, χωρίς να προκαλέσουν βλάβη στο περιβάλλον (circularecology.com).

Οι παραπάνω προσεγγίσεις δίνουν διαφορετικές προοπτικές για την αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων και των δραστηριοτήτων που βασίζονται στον κύκλο ζωής των δομικών υλικών. Η ανάλυση και η κατανόηση τους, μπορεί να συμβάλει στην αναβάθμιση όλων

των σταδίων του κύκλου ζωής των υλικών και να αποτελέσει πολύτιμο εργαλείο ώστε να λαμβάνονται ορθολογικές και τεκμηριωμένες αποφάσεις για αειφόρο ανάπτυξη και περιορισμό του αποτυπώματος άνθρακα.



Εικόνα 10 : «Στάδια ζωής του κύκλου ζωής των κτιρίων» (S. Bastianoni et al., 2006)

Είναι πλέον σαφές, ότι η LCA μπορεί να βελτιώσει την καινοτομία και την ανάπτυξη νέων μεθόδων επεξεργασίας και παραγωγής βιώσιμων προϊόντων, που θα έχουν θετικό αντίκτυπο στο περιβάλλον. Το γεγονός ότι η ανάλυση του κύκλου ζωής των υλικών βασίζεται στην κυκλική οικονομία, δίνει περιθώριο στον σχεδιασμό και την ανάπτυξη υλικών που θα σχεδιάζονται με τρόπο τέτοιο ώστε να επαναχρησιμοποιούνται για τον ίδιο ή παρεμφερή σκοπό. Αυτό θα έχει ως συνέπεια την μείωση των απορριμμάτων σε όλα τα στάδια του κύκλου και τον περιορισμό των εκπομπών στα στάδια παραγωγής.

Η ευρεία χρήση της LCA είναι ικανή να επιφέρει αλλαγές και στην αλυσίδα εφοδιασμού των προϊόντων και δομικών υλικών καθώς τα τμήματα αγοράς μπορούν να αποφανθούν ποιοι προμηθευτές διαθέτουν βιώσιμα υλικά που παράγονται και μεταφέρονται με πιστοποιημένα πρότυπα. Ωστόσο, μια μελέτη LCA αποτελεί μια σύνθετη και ακριβή διαδικασία που απαιτεί χρόνο καθώς περιλαμβάνει εκτενή δεδομένα των υλικών για κάθε στάδιο του κύκλου ζωής.

Επομένως, για μια τέτοια ανάλυση να απαιτείται μεγάλος όγκος δεδομένων, ενώ πρέπει να εξετάζεται και να επαληθεύεται η ορθότητα και η ακρίβεια των πληροφοριών. Η επιτυχία μιας μελέτης LCA βασίζεται στη διαθεσιμότητα αξιόπιστων δεδομένων και την προσβασιμότητα της πληροφορίας στα ενδιαφερόμενα μέρη, συνεπώς καταβάλλονται προσπάθειες για την ανάπτυξη απλοποιημένων εργαλείων που επιτρέπουν τη άμεση επαλήθευση του κύκλου ζωής ενός υλικού.

Ο Διεθνής Οργανισμός Τυποποίησης (ISO, International Organization for Standardization) έχει αναπτύξει πρότυπα για τη διεξαγωγή LCA, τονίζοντας τη σημασία του «Σχεδιασμού για το Περιβάλλον (DfE, Design for Environment)» και προωθώντας βιώσιμες πρακτικές στην ανάπτυξη και κατασκευή προϊόντων. Τα πρότυπα περιβαλλοντικής διαχείρισης βασίζονται στο κύκλο ζωής των υλικών και πιστοποιούνται σύμφωνα με το ISO 14000 και τα συμπληρωματικά πρότυπα για τη διεξαγωγή αξιολόγησης του κύκλου ζωής (ISO 14040 και ISO 14044). Τα πρότυπα αυτά προωθούν την αειφόρο ανάπτυξη και σχεδιασμό για το περιβάλλον εστιάζοντας στη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων και βελτιώνοντας τα στάδια σχεδιασμού και κατασκευής.

Τα τελευταία χρόνια όλο και περισσότερες εταιρίες και επιχειρήσεις συμμορφώνονται και δεσμεύονται να εφαρμόσουν πρακτικές βιώσιμης ανάπτυξης, ακολουθώντας τα πρότυπα και τις τυποποιήσεις με βάση το ISO 14000. Με αυτόν τον τρόπο, οι επιχειρήσεις θα ενισχύσουν τη φήμη τους, θα κερδίσουν την εμπιστοσύνη και την προτίμηση επενδυτών και καταναλωτών, ενώ ταυτόχρονα θα επιτύχουν σημαντική εξοικονόμηση κόστους, βελτιώνοντας τις διαδικασίες παραγωγής και μειώνοντας τα απορρίμματα.

Με τη συνολική αξιολόγηση κάθε σταδίου του κύκλου ζωής, τα ενδιαφερόμενα μέρη έχουν την δυνατότητα να εντοπίζουν ευκαιρίες για τη βελτίωση των κατασκευαστικών τεχνικών και των δομικών υλικών. Συνοψίζοντας, το LCA αποτελεί ένα ισχυρό εργαλείο που είναι αναγκαίο για την ανάδειξη και επίτευξη περιβαλλοντικά βιώσιμων κτιριακών έργων με περιορισμένο αποτύπωμα άνθρακα και ελάχιστα απόβλητα.

3.2 Λογισμικά Ανάλυσης Κύκλου Ζωής Υλικών

Τα εργαλεία λογισμικού LCA έχουν σχεδιαστεί για να αξιολογούν τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις προϊόντων, υπηρεσιών ή διαδικασιών σε ολόκληρο τον κύκλο ζωής τους, από την εξόρυξη πρώτων υλών, την παραγωγή δομικών προϊόντων, τη χρήση και την ενσωμάτωση τους

στις κατασκευές έως και το τέλος ζωής τους. Αυτά τα εργαλεία βοηθούν στην ποσοτικοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων όπως η ενσωματωμένη ενέργεια και ο ενσωματωμένος άνθρακας. Τα πλέον γνωστά λογισμικά είναι το SimaPro, το Gabi και το One Click LCA.

Το SimaPro αποτελεί ένα αναγνωρισμένο λογισμικό αξιολόγησης κύκλου ζωής που χρησιμοποιείται για λεπτομερή ανάλυση περιβαλλοντικών επιπτώσεων και αποτυπώματος άνθρακα. Το συγκεκριμένο λογισμικό παρέχει μια μεγάλη ποικιλία ολοκληρωμένων βάσεων δεδομένων διαφορετικών τομέων και δίνει την δυνατότητα μοντελοποίησης πολύπλοκων κύκλων ζωής δομικών υλικών και αλυσίδων εφοδιασμού. Παράλληλα, υποστηρίζει πρότυπα ISO 14040/44 και βοηθάει στην αξιολόγηση της βιωσιμότητας δομικών προϊόντων.

Το GaBi είναι ένα άλλο σημαντικό λογισμικό LCA που αναλύει το αποτύπωμα άνθρακα παράλληλα με άλλες εκτιμήσεις περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Μάλιστα, παρέχει εκτεταμένες βάσεις δεδομένων LCA με δεδομένα ειδικά για τον κατασκευαστικό κλάδο ενώ προσφέρει ισχυρές δυνατότητες μοντελοποίησης και ανάλυσης σεναρίων, το οποίο το καθιστούν ιδανικό για εταιρείες που αναζητούν πληροφορίες για τα αποτυπώματα άνθρακα των προϊόντων τους.

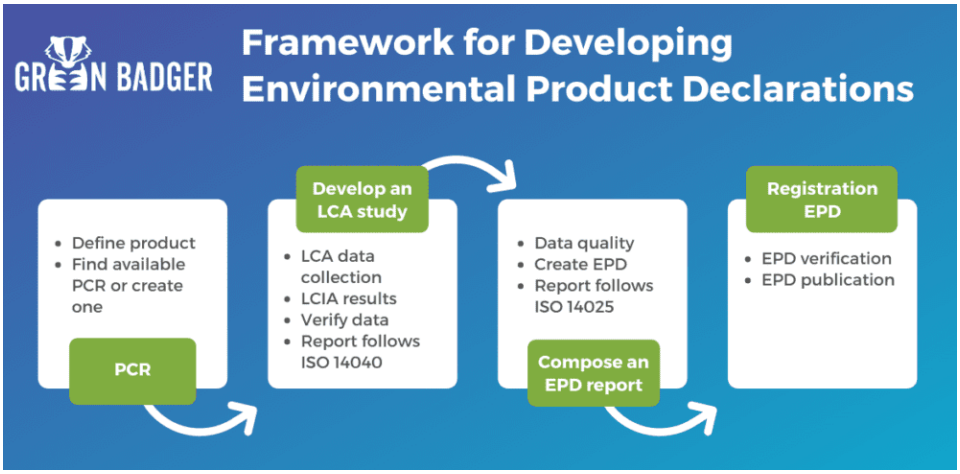
Τέλος, το One Click LCA αποτελεί ένα εργαλείο που βασίζεται σε cloud και έχει σχεδιαστεί για τον υπολογισμό του αποτυπώματος άνθρακα και άλλων περιβαλλοντικών επιπτώσεων των οικοδομικών υλικών και των κατασκευαστικών έργων. Το κύριο χαρακτηριστικό του είναι ότι υποστηρίζει τη δημιουργία EPD ενώ παράλληλα μπορεί να ενσωματωθεί σε εργαλεία BIM, παρέχοντας δεδομένα για ακριβείς υπολογισμούς και καλύτερη αξιολόγηση και διαχείριση του αποτυπώματος άνθρακα των έργων στον κατασκευαστικό κλάδο.

Συμπερασματικά, όλα τα παραπάνω λογισμικά αποτελούν εργαλεία αποτύπωσης της κατανάλωσης άνθρακα που παρέχουν τις απαραίτητα δεδομένα και δυνατότητες για την ακριβή μέτρηση και διαχείριση των εκπομπών άνθρακα σε διαφορετικούς κλάδους και τομείς. Οι επιχειρήσεις είναι σημαντικό να κατανοήσουν τον αντίκτυπό των προϊόντων τους στον άνθρακα, να συμμορφωθούν με τους κανονισμούς και να εφαρμόσουν αποτελεσματικές στρατηγικές μείωσης του περιβαλλοντικού τους αποτυπώματος.

3.3 Περιβαλλοντικές Δηλώσεις Προϊόντων (EPD)

Οι Περιβαλλοντικές Δηλώσεις Προϊόντων (EPD, Environmental Product Declaration) αποτελούν τυποποιημένα έγγραφα που παρέχουν διαφανείς και συγκρίσιμες πληροφορίες σχετικά με τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις των δομικών προϊόντων και υλικών. Τα EPD βασίζονται σε δεδομένα αξιολόγησης του κύκλου ζωής των υλικών (LCA) σύμφωνα με τη σειρά προτύπων ISO 14040 και περιλαμβάνουν πληροφορίες για την ενσωματωμένη ενέργεια, το ενσωματωμένο CO_2, την εξάντληση των πόρων και άλλους περιβαλλοντικούς δείκτες, επιτρέποντας στους μηχανικούς να λαμβάνουν ορθές αποφάσεις κατά την φάση προμήθειας και επιλογής υλικών για κατασκευαστικά έργα.

Τα EPD έχουν σχεδιαστεί για να διευκολύνουν τις συναλλαγές μεταξύ επιχειρήσεων και να παρέχουν διαφάνεια σχετικά με τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις ενός προϊόντος, επιτρέποντας συγκρίσεις μεταξύ προϊόντων που εκπληρώνουν την ίδια λειτουργία. Όταν ένα δομικό υλικό διαθέτει EPD, σημαίνει ότι οι επιπτώσεις του υλικού κατά τη διάρκεια ζωής του έχουν ήδη υπολογιστεί και δηλωθεί, διευκολύνοντας τον υπολογισμό των περιβαλλοντικών επιπτώσεων του κτιρίου (www.environdec.com).



Εικόνα 11 : «Ανάπτυξη ενός EDP» (www.getgreenbadger.com)

Το περιεχόμενο ενός EPD ποικίλλει ανάλογα με την κατηγορία προϊόντος και τη μεθοδολογία που χρησιμοποιείται. Συνήθως, περιλαμβάνει πληροφορίες σχετικά με το προϊόν, την εταιρεία και τις μεθόδους παραγωγής, καθώς και υπολογισμούς περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Στην αγορά επικρατούν δυο τύποι EPD, ένας μεμονωμένα για το προϊόν και ένας

συλλογικός για όλο τον κλάδο. Για παράδειγμα, όταν γίνεται αναφορά σε EPD κλάδου τότε αυτό αντιπροσωπεύει τον μέσο όρο για μια συγκεκριμένη βιομηχανία ή τύπο προϊόντος, όπως το αλουμίνιο, τα τούβλα, ο χάλυβας και η δομική ξυλεία. Αντιθέτως, όταν αναφερόμαστε σε EPD συγκεκριμένου προϊόντος τότε αυτό προσδιορίζει ένα συγκεκριμένο προϊόν από συγκεκριμένο κατασκευαστή.

Τα EPD χρησιμοποιούνται συνήθως στον κατασκευαστικό τομέα, όπου αναπτύσσονται σύμφωνα με τα ευρωπαϊκά και διεθνή πρότυπα καλύπτοντας μια σειρά από κατηγορίες περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Επίσης, χρησιμοποιούνται ιδιαίτερα για την ποσοτικοποίηση των διαδικασιών αποβλήτων και παρέχουν πληροφορίες σχετικά με τα πιθανά οφέλη από την επαναχρησιμοποίηση, την ανάκτηση ή την ανακύκλωση στο τέλος της ζωής ενός προϊόντος (www.epddanmark.dk). Τα EPD αναπτύσσονται από κατασκευές οι οποίοι χρησιμοποιούν λογισμικά αξιολόγησης του κύκλου ζωής (LCA), μοντελοποιώντας το σύστημα του προϊόντος και υπολογίζοντας τις περιβαλλοντικές συνέπειες τους. Ακολούθως, τα αποτελέσματα επαληθεύονται από ένα εξωτερικό σύμβουλο πριν από τη δημοσίευση και είναι διαθέσιμα στους ενδιαφερόμενους είτε απευθείας από τους κατασκευαστές είτε από βάσεις δεδομένων με επαληθευμένες δημοσιεύσεις.

3.4 Μοντελοποίηση πληροφοριών κτιρίου (BIM)

Το Building Information Modeling (BIM) είναι ένα ψηφιακό εργαλείο που χρησιμοποιείται για τον σχεδιασμό, την προσομοίωση και τη διαχείριση κτιριακών έργων. Ουσιαστικά αποτελεί ένα ολιστικό τρόπο αναπαράστασης ενός έργου, όπου αναπτύσσεται ένα τρισδιάστατο ψηφιακό μοντέλο, το οποίο περιλαμβάνει όλες εκείνες τις πληροφορίες και ιδιότητες που είναι αναγκαίες για να ολοκληρωθεί η μελέτη, η κατασκευή, η λειτουργία και η συντήρηση ενός έργου. Το λογισμικό BIM μπορεί να εισάγει δεδομένα για την ενσωματωμένη ενέργεια και τις εκπομπές CO_2 των οικοδομικών υλικών, επιτρέποντας στους μηχανικούς να αξιολογούν τον περιβαλλοντικό αντίκτυπο διαφορετικών υλικών από τα πρώιμα στάδια της φάσης σχεδιασμού, ενώ παράλληλα διευκολύνει τη συνεργασία μεταξύ των ενδιαφερόμενων μερών του έργου και συμβάλλει στη βελτιστοποίηση της απόδοσης του κτιρίου.

Ουσιαστικά πρόκειται για μια ψηφιακή αναπαράσταση των χαρακτηριστικών ενός κτιρίου, όπου ενσωματώνονται διάφορες πτυχές του κύκλου ζωής του κτιρίου και των υλικών

που χρησιμοποιούνται, οι οποίες επηρεάζουν σημαντικά την ανάλυση και τη μείωση των ενσωματωμένων μεγεθών. Το BIM δίνει την δυνατότητα στον χρήστη να προσθέτει την ακριβή ποσότητα και τον τύπο των υλικών που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή ενώ περιλαμβάνει βάσεις δεδομένων με περιβαλλοντικά προφίλ υλικών, διευκολύνοντας τους χρήστες να επιλέξουν υλικά με χαμηλότερη ενσωματωμένη ενέργεια και εκπομπές άνθρακα (H.G. Chong et al. 2017). Τα μοντέλα BIM περιέχουν λεπτομερείς, τυποποιημένες πληροφορίες σχετικά με τα δομικά στοιχεία, επιτρέποντας πιο ακριβείς υπολογισμούς ενσωματωμένης ενέργειας με βάση συγκεκριμένους τύπους και ποσότητες υλικών διασφαλίζοντας συμμόρφωση με τα πρότυπα και τις πιστοποιήσεις βιωσιμότητας (π.χ. LEED).

Παράλληλα, η δυνατότητα που προσφέρει το BIM για ενσωμάτωση εργαλείων LCA επιτρέπει την προσομοίωση διαφορετικών σεναρίων σχεδιασμού για τη σύγκριση των περιβαλλοντικών τους επιπτώσεων, διευκολύνοντας την καλύτερη λήψη αποφάσεων σχετικά με την επιλογή υλικών. Η LCA μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αυτοματοποίηση της αξιολόγησης του ενσωματωμένου άνθρακα και της ενσωματωμένης ενέργειας των οικοδομικών υλικών και των προκατασκευασμένων κτιρίων. Σημαντικό είναι δε να αναφερθεί ότι το παραπάνω λογισμικό αναλύει την ενσωματωμένη ενέργεια και τον ενσωματωμένο άνθρακα από τα αρχικά στάδια του σχεδιασμού, όπου οι αλλαγές είναι διαχειρίσιμες και συνοδεύονται από μικρότερο κόστος (S.Azhar & M.Hein, 2011). Οι χρήστες έχουν την δυνατότητα να επαναλάβουν και να βελτιώσουν τα αρχικά σχέδιά τους, βελτιστοποιώντας τη μειωμένη ενσωματωμένη ενέργεια και άνθρακα, ενώ ταυτόχρονα μέσω του BIM προωθείται η πολυεπιστημονική συνεργασία και η οπτική αναπαράσταση των μοντέλων βελτιστοποίησης.

Η διαχείριση των κατασκευών μέσω του BIM μπορεί να διευκολύνει την βελτιστοποίηση των κατασκευαστικών διαδικασιών, την επιτάχυνση του έργου, την ορθή εκτέλεση του και τις διεργασίες συντήρησης, περιορίζοντας σημαντικά την κατανάλωση ενέργειας και μειώνοντας τον όγκο των αποβλήτων. Πολλά εργαλεία λογισμικού BIM έχουν σχεδιαστεί ειδικά για να αντιμετωπίζουν την ενσωματωμένη ενέργεια και άνθρακα, μερικά από τα οποία είναι το Tally, το One Click LCA και το Revit's Green Building Studio. Τα παραπάνω εργαλεία χρησιμοποιούνται σε πολλά βιώσιμα κτίρια κατοικιών, εμπορικά συγκροτήματα και δημόσια έργα υποδομής, θέτοντας ως στόχο τη μείωση της ενσωματωμένης ενέργειας και του άνθρακα.

Από όλα τα παραπάνω γίνεται σαφές ότι οι κύριες προκλήσεις στη χρήση λογισμικού BIM για αξιολόγηση ενσωματωμένης ενέργειας και άνθρακα εντοπίζονται στην ακρίβεια και διαλειτουργικότητα των δεδομένων, στην ενσωμάτωση των κατάλληλων εργαλείων, στην πολυπλοκότητα των κτιριακών συστημάτων και στους περιορισμούς των διαθέσιμων πόρων. Συνεπώς, είναι σημαντικό να διασφαλίζεται η ακρίβεια των εισροών δεδομένων στο μοντέλο BIM ώστε να αντικατοπτρίζεται με ακρίβεια η ενσωματωμένη περιεκτικότητα σε άνθρακα των δομικών υλικών και εξαρτημάτων ενώ παράλληλα θα εξασφαλίζεται η ενοποίηση και η ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ εργαλείων LCA και μοντέλων BIM. Παράλληλα, η ενσωμάτωση εργαλείων για την αυτοματοποίηση της αξιολόγησης του ενσωματωμένου άνθρακα σε ένα πρόγραμμα BIM απαιτεί εξειδικευμένο λογισμικό και τεχνογνωσία, ενώ κρίσιμη δραστηριότητα αποτελεί η αντιμετώπιση της πολυπλοκότητας των κτιριακών συστημάτων και του πλήθους υλικών και εξαρτημάτων που εμπλέκονται στην ακριβή εκτίμηση του ενσωματωμένου άνθρακα και ενσωματωμένης ενέργειας. Τέλος, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η διαχείριση των πόρων και της τεχνογνωσίας που απαιτούνται για την αξιολόγηση του ενσωματωμένου άνθρακα εντός του περιβάλλοντος BIM, καθώς οι διαθέσιμοι πόροι είναι διαφορετικοί για κάθε έργο και η απαιτούμενη τεχνογνωσία να χρειάζεται χρόνο για να αποκτηθεί.

Συμπερασματικά, το BIM αποτελεί ένα ισχυρό εργαλείο για τη διαχείριση και τη μείωση της ενσωματωμένης ενέργειας και του ενσωματωμένου άνθρακα των δομικών υλικών και των κτιρίων συνολικά, παρέχοντας ακριβή δεδομένα, διευκολύνοντας την αξιολόγηση του κύκλου ζωής, βελτιστοποιώντας το σχεδιασμό, ενισχύοντας τη συνεργασία, διασφαλίζοντας τη συμμόρφωση με τα πρότυπα και συμβάλλοντας σημαντικά στη βιωσιμότητα των κτιριακών έργων. Η ανάλυση LCA στο BIM επιτρέπει την αυτοματοποιημένη, ακριβή αξιολόγηση του ενσωματωμένου άνθρακα και της ενέργειας των οικοδομικών υλικών και των κτιρίων, υποστηρίζοντας αποφάσεις βιώσιμου σχεδιασμού. Παράλληλα, δίνει την δυνατότητα για επαναληπτική ανάλυση, αξιοποιεί τυποποιημένες μορφές δεδομένων και χρησιμοποιεί προηγμένες τεχνικές τεχνητής νοημοσύνης για να βελτιώσει σημαντικά την ακρίβεια, ταχύτητα και αποτελεσματικότητα των ενσωματωμένων ενεργειακών αξιολογήσεων για κτίρια (H.G. Chong et al. 2017). Ωστόσο, αν και το BIM προσφέρει σημαντικές δυνατότητες για την αξιολόγηση του ενσωματωμένου άνθρακα στα κτίρια, έρχεται αντιμέτωπο με προκλήσεις όπως η διαλειτουργικότητα και ακρίβεια δεδομένων, η ενσωμάτωση υπολογιστικών εργαλείων, η τυποποίηση, η πολυπλοκότητα των συστημάτων κτιρίων και οι περιορισμοί πόρων.

3.5 Συστήματα Πιστοποίησης Πράσινων Κτιρίων

Τα συστήματα πιστοποίησης πράσινων κτιρίων διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην προσπάθεια για μείωση της ενσωματωμένης ενέργειας και του ενσωματωμένου άνθρακα στα κατασκευαστικά έργα. Αυτά τα συστήματα θέτουν πρότυπα και παρέχουν πλαίσια για την αξιολόγηση και την επαλήθευση της περιβαλλοντικής απόδοσης των κτιρίων ενώ είναι διεθνώς αναγνωρισμένα. Μερικά από αυτά είναι τα LEED (Leadership in Energy and Environmental Design), το BREEAM (Building Research Establishment Environmental Assessment Method) και το Green Star, τα οποία ενθαρρύνουν τη χρήση βιώσιμων δομικών υλικών και επιβραβεύουν έργα που ελαχιστοποιούν τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

Ένα από τα πιο γνωστά συστήματα πιστοποίησης πράσινων κτιρίων παγκοσμίως είναι το LEED το οποίο αναπτύχθηκε από το U.S. Green Building Council (USGBC) και εστιάζει στη βιωσιμότητα κατά τον σχεδιασμό, την κατασκευή και τη λειτουργία κτιρίων με σκοπό το μικρότερο δυνατό περιβαλλοντικό αποτύπωμα. Το LEED δίνει έμφαση στην αποδοτικότητα των πόρων και στην χρήση αειφόρων δομικών υλικών, έτσι ώστε να μειωθεί η περιβαλλοντική επιβάρυνση που σχετίζεται με την εξόρυξη, την επεξεργασία, τη μεταφορά, τη συντήρηση και τη διάθεση δομικών υλικών, συμβάλλοντας κατά αυτό τον τρόπο δυναμικά στον περιορισμό της ενσωματωμένης ενέργειας και των εκπομπών άνθρακα των κτιρίων. Παράλληλα, κατά την πιστοποίηση LEED τα προϊόντα και τα υλικά που χρησιμοποιούνται απαιτείται να διαθέτουν EPD, έτσι ώστε να διαπιστωθεί ότι προέρχονται από πιστοποιημένο προμηθευτή και έχουν μικρή ενσωματωμένη ενέργεια, λόγω αποτελεσματικότερων διαδικασιών παραγωγής. Η επιλογή υλικών με χαμηλότερη ενσωματωμένη ενέργεια και εκπομπές άνθρακα καθώς και η διασφάλιση υπεύθυνης προμήθειας μειώνει αισθητά τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις που έχει ένα κτίριο και για τον λόγο αυτό τα συστήματα πιστοποίησης επιβραβεύουν την χρήση αυτών των υλικών (USGBC, LEED v4.1 Building Design and Construction).

Μια ακόμη παράμετρος που εξετάζεται κατά την πιστοποίηση LEED είναι η επιλογή αποτελεσματικών και βιώσιμων πρακτικών σχεδιασμού και κατασκευής που μειώνουν το συνολικό ενεργειακό αποτύπωμα του κτιρίου. Οι αποτελεσματικές πρακτικές σχεδιασμού και κατασκευής, όπως η αρθρωτή κατασκευή, η χρήση προκατασκευασμένων στοιχείων και η βελτιστοποίηση του σχεδιασμού του κτιρίου με καινοτόμα υλικά, ελαχιστοποιούν τα απόβλητα και μειώνουν την ενσωματωμένη ενέργεια και άνθρακα ενός κτιρίου. Μάλιστα, πολλά

συστήματα πιστοποίησης, συμπεριλαμβανομένου του LEED, συχνά απαιτούν ή επιβραβεύουν τη χρήση LCA για την αξιολόγηση και τη μείωση της ενσωματωμένης ενέργειας και άνθρακα.

Συνάμα, η βελτιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων βασίζεται στην χρήση καινοτόμων συστημάτων αυτοματισμού, στην αξιοποίηση των ΑΠΕ και στην μείωση της συνολικής καταναλισκόμενης ενέργειας του κτιρίου. Σημαντική σημείωση για την πιστοποίηση LEED αποτελεί η συνειδητή επιλογή της τοποθεσίας ανέγερσης ενός κτιρίου, καθώς αυτό πρέπει να ενσωματώνεται αρμονικά στο εκάστοτε περιβάλλον και να ικανοποιεί τον στόχο που πρέπει να επιτελέσει. Κατά αυτό τον τρόπο ενθαρρύνεται η προστασία και η αποκατάσταση φυσικών οικοτόπων ελαττώνοντας τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις του έργου, ενώ παράλληλα ο περιορισμός των επεμβάσεων στην τοποθεσία του έργου μειώνει σημαντικά την ανάγκη για νέα υλικά και κατασκευαστικές δραστηριότητες, οδηγώντας σε μικρότερη ενσωματωμένη ενέργεια και εκπομπές CO_2.

Σε αντίθεση με το LEED, το BREEAM αναπτύχθηκε στο Ηνωμένο Βασίλειο από το Building Research Establishment (BRE), κι αποτελεί ένα ακόμη αναγνωρίσιμο σύστημα πιστοποίησης πράσινων κτιρίων στην Ευρώπη και διεθνώς. Το BREEAM βασίζεται κι εκείνο στην αξιολόγηση του κύκλου ζωής του κτιρίων και των υλικών έτσι ώστε να επιλέγονται υλικά με προδιαγραφές, EPD και χαμηλή ενσωματωμένη ενέργεια και εκπομπές CO_2. Επίσης, δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στην διαχείριση αποβλήτων και στις τεχνικές κατασκευής και λειτουργίας των κτιρίων. Στο ίδιο μήκος κύματος βρίσκεται και η πιστοποίηση Green Star ενώ το WELL Building Standard εστιάζει στην υγεία και την ευημερία των ενοίκων του κτιρίου συμπληρώνοντας τις άλλες πιστοποιήσεις και προωθώντας βιώσιμα υλικά και πρακτικές, υποστηρίζοντας έμμεσα τον περιορισμό των ενσωματωμένων μεγεθών.

Συμπερασματικά, τα συστήματα πιστοποίησης πράσινων κτιρίων διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στη μείωση της ενσωματωμένης ενέργειας και άνθρακα στον κατασκευαστικό κλάδο. Με την ενσωμάτωση προτύπων και πλαισίων για την αξιολόγηση και την ελαχιστοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των δομικών υλικών, προωθείται η αειφορία και οι βιώσιμες κατασκευαστικές πρακτικές, συμβάλλοντας στη δημιουργία έργων με μικρό οικολογικό αποτύπωμα και με περιορισμένες εκπομπές ρύπων.

3.6 Οικολογική σήμανση

Τα συστήματα οικολογικής σήμανσης πιστοποιούν προϊόντα και υλικά που πληρούν συγκεκριμένα κριτήρια περιβαλλοντικής απόδοσης. Αυτές οι ετικέτες παρέχουν στους καταναλωτές πληροφορίες σχετικά με τα περιβαλλοντικά χαρακτηριστικά των δομικών υλικών, συμπεριλαμβανομένης της ενσωματωμένης ενέργειας και των εκπομπών CO_2. Τα συστήματα οικολογικής σήμανσης προωθούν τη χρήση περιβαλλοντικά προτιμώμενων προϊόντων και ενθαρρύνουν τους κατασκευαστές να βελτιώσουν τη βιωσιμότητα των προϊόντων τους (P.Wu et al, 2014). Χαρακτηριστικά παραδείγματα αυτών των πιστοποιητικών αποτελούν τα Energy Star, EPEAT, EU Ecolabel και το Green Seal.

Το Energy Star εστιάζει πρωτίστως στην ενεργειακή απόδοση κατά τη φάση χρήσης των προϊόντων και στοχεύει στον περιορισμό της κατανάλωσης ενέργειας μέσω μείωσης της συνολικής ζήτησης και των επιπτώσεων της παραγωγικής διαδικασίας. Αντιθέτως, το EPEAT (Electronic Product Environmental Assessment Tool) παρέχει ολοκληρωμένα κριτήρια για τη χρήση ενέργειας, την επιλογή υλικών και την διαχείριση τους όταν φτάσουν στο τέλος του κύκλου ζωής τους. Μάλιστα, αντιμετωπίζει την ενσωματωμένη ενέργεια και CO_2 προωθώντας τον ενεργειακά αποδοτικό σχεδιασμό, τη χρήση ανακυκλωμένων υλικών και τη μακροζωία του προϊόντος.

Στην Ευρωπαϊκή Ένωση χρησιμοποιείται ιδιαιτέρως η σήμανση EU Ecolabel, μέσω της οποίας πιστοποιούνται πολλαπλά υλικά και προϊόντα που καλύπτουν τις προδιαγραφές για τα όρια της ενσωματωμένης ενέργειας και εκπομπών άνθρακα σε ολόκληρο τον κύκλο ζωής τους. Τέλος, το Green Seal αποτελεί και αυτό ένα πρότυπο περιβαλλοντικής πολιτικής για ένα εύρος προϊόντων και υλικών, συμπεριλαμβανομένης της μειωμένης τοξικότητας των αποβλήτων και της βέλτιστης χρήσης πόρων, λαμβάνοντας υπόψιν ολόκληρο τον κύκλο ζωής των προϊόντων.

Συνολικά, τα συστήματα οικολογικού σήμανσης διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην προώθηση της βιωσιμότητας παρέχοντας διαφανείς πληροφορίες σχετικά με τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις των προϊόντων. Αυτές οι ετικέτες συχνά λαμβάνουν υπόψιν ολόκληρο τον κύκλο ζωής των προϊόντων, αντιμετωπίζοντας έτσι τις υψηλές τιμές της ενσωματωμένης ενέργειας και άνθρακα των υλικών (Wu et al, 2014). Με την προώθηση προϊόντων που καταναλώνουν λιγότερη ενέργεια και έχουν χαμηλότερο αποτύπωμα άνθρακα, δύναται να μειωθεί σημαντικά το

περιβαλλοντικό αποτύπωμα των δομικών προϊόντων και γενικότερα των κατασκευών, αναδεικνύοντας ένα πιο βιώσιμο πρότυπο κατανάλωσης ενέργειας και παραγωγής προϊόντων.

3.7 Λογιστικά Εργαλεία Άνθρακα

Μια ακόμη σημαντική παράμετρος για τον προσδιορισμό του ενσωματωμένου άνθρακα των δομικών υλικών αποτελούν τα εργαλεία λογιστικής εκπομπών άνθρακα, τα οποία επιτρέπουν στους οργανισμούς να ποσοτικοποιούν και να διαχειρίζονται τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου. Ο υπολογισμός άνθρακα βοηθά τους οργανισμούς να θέτουν στόχους μείωσης των εκπομπών, να παρακολουθούν την πρόοδο με την πάροδο του χρόνου και να λαμβάνουν τεκμηριωμένες αποφάσεις για τη μείωση του αποτυπώματος άνθρακα. Μάλιστα, τα εργαλεία αυτά επικεντρώνονται ειδικά στη μέτρηση και τη διαχείριση των εκπομπών άνθρακα που σχετίζονται με προϊόντα και παραγωγικές διαδικασίες. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αυτών των εργαλείων αποτελούν το πρωτόκολλο για τα αέρια του θερμοκηπίου (Green House Gas Protocol, GHGP) και το Carbon Trust Footprint Calculator.

Το τελευταίο αποτελεί μια πλατφόρμα που προσφέρει μια σειρά εργαλείων και πόρων για τον υπολογισμό του αποτυπώματος άνθρακα προϊόντων, υπηρεσιών και οργανισμών, βασιζόμενη στο πρωτόκολλο GHG. Παράλληλα, δίνει ολοκληρωμένες υπηρεσίες καθοδήγησης και συμβουλευτικών υπηρεσιών, ενώ υποστηρίζει τη συμμόρφωση με διάφορα πρότυπα αναφοράς άνθρακα. Χρησιμοποιείται κυρίως από επιχειρήσεις που θέλουν να μετρήσουν το αποτύπωμα άνθρακα και να εφαρμόσουν στρατηγικές μείωσης, έτσι ώστε να μειωθούν οι εκπομπές και κατ’επέκταση το οικολογικό αποτύπωμα των δομικών υλικών και κατασκευών.

Το Πρωτόκολλο GHG αποτελεί ένα ευρέως αναγνωρισμένο πρότυπο για τη μέτρηση και τη διαχείριση των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου (GHGs) σε όλες τις αλυσίδες εφοδιασμού. Παρέχει πρότυπα τόσο για την εταιρική όσο και για τη λογιστική κύκλου ζωής προϊόντων, προσφέροντας εργαλεία για υπολογισμούς τόσο των άμεσων εκπομπών άνθρακα όσο και των έμμεσων εκπομπών από ηλεκτρική ενέργεια. Η χρήση του πρωτοκόλλου μπορεί να ξεκινήσει από την εξόρυξη του υλικού έως και την τελική του χρήση, εστιάζοντας στον ενσωματωμένο άνθρακα. Τα εργαλεία αποτύπωσης άνθρακα είναι απαραίτητα για τον ποσοτικό προσδιορισμό και τη διαχείριση των εκπομπών άνθρακα που σχετίζονται με προϊόντα, υπηρεσίες και δραστηριότητες. Μάλιστα βοηθούν τους οργανισμούς και τις επιχειρήσεις να κατανοήσουν τον

αντίκτυπό τους στον άνθρακα και να εντοπίσουν ευκαιρίες για μείωση και καλύτερη διαχείριση του αποτυπώματος άνθρακα που σχετίζεται με τις δραστηριότητές τους (ghgprotocol.org/standards-guidance).

3.8 Μελέτη Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων

Η Μελέτη Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων (ΜΠΕ) είναι μια διαδικασία που χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση των πιθανών περιβαλλοντικών επιπτώσεων των προτεινόμενων κατασκευαστικών έργων. Οι ΜΠΕ λαμβάνουν υπόψιν παράγοντες όπως η χρήση γης, η ποιότητα του αέρα και των υδάτων, η βιοποικιλότητα και οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου. Η ενσωματωμένη ενέργεια και ο ενσωματωμένος άνθρακας είναι κρίσιμες πτυχές αυτής της μελέτης, καθώς αντιπροσωπεύουν τη συνολική ενέργεια που καταναλώνεται και τις συνολικές εκπομπές άνθρακα που εκπέμπονται σε όλο τον κύκλο ζωής των υλικών και των προϊόντων που χρησιμοποιούνται στο έργο. Οι ΜΠΕ βοηθούν στον εντοπισμό, στην αξιολόγηση και τον μετριασμό των πιθανών περιβαλλοντικών επιπτώσεων, έτσι ώστε να διασφαλιστεί ότι οι υπεύθυνοι λήψης αποφάσεων εξετάζουν τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις πριν εγκρίνουν ένα έργο, προωθώντας την αειφόρο ανάπτυξη.

Η ΜΠΕ προϋποθέτει την ενσωμάτωση της αξιολόγησης του κύκλου ζωής των υλικών και προϊόντων από την εξόρυξη των πρώτων υλών έως και την απόρριψη των προϊόντων. Η LCA παρέχει μια ολοκληρωμένη εικόνα για την αξιολόγηση της ενσωματωμένης ενέργειας και του άνθρακα, διασφαλίζοντας ότι λαμβάνονται υπόψη όλες οι έμμεσες επιπτώσεις. Σημαντικό είναι να υπάρχει διαφάνεια και ακρίβεια στη συλλογή δεδομένων σχετικά με τα ποσά ενέργειας και άνθρακα που δαπανούνται και εκπέμπονται κατά την παραγωγή και επεξεργασία δομικών υλικών, τη μεταφορά στο εργοτάξιο και την τελική κατασκευή και ενσωμάτωση στο έργο. Παράλληλα, πρέπει να γίνει χρήση εργαλείων λογισμικού για τη μοντελοποίηση και τον υπολογισμό της συνολικής ενσωματωμένης ενέργειας, όπως το SimaPro και το Gabi.

Όσον αφορά την εκτίμηση του ενσωματωμένου άνθρακα χρησιμοποιείται το Carbon Trust Footprint Calculator με βάση τα στάδια του κύκλου ζωής του υλικού βασιζόμενο στο πρωτόκολλο GHG που παρέχει πρότυπα και εργαλεία για τη μέτρηση και τη διαχείριση των εκπομπών GHGs. Μερικά ακόμη εργαλεία είναι το Tally για την ενσωμάτωση των

αξιολογήσεων άνθρακα στο BIM και το One Click LCA για τον υπολογισμό του ενσωματωμένου άνθρακα σε κατασκευαστικά έργα.

Ο υπολογισμός της ενσωματωμένης ενέργειας και του ενσωματωμένου άνθρακα των υλικών προϋποθέτει τη διασφάλιση ακριβών και περιεκτικών δεδομένων καθώς και τη χρήση τυποποιημένων βάσεων και επαληθευμένων πηγών δεδομένων έτσι ώστε να πραγματοποιούνται πιο αξιόπιστες αξιολογήσεις. Επίσης, είναι σημαντικό να γίνει σαφής καθορισμός των ορίων των σταδίων του κύκλου ζωής των υλικών που θα συμπεριληφθούν στην αξιολόγηση και να εξεταστούν οι άμεσες και έμμεσες επιπτώσεις. Στο επόμενο στάδιο, στόχος είναι η μείωση της ενσωματωμένης ενέργειας και του άνθρακα μέσω επιλογής πιστοποιημένων και ανακυκλώσιμων υλικών, η βελτίωση του σχεδιασμού και των μεθόδων κατασκευής, με σκοπό την ενεργειακή απόδοση των κατασκευών και το μικρότερο δυνατό περιβαλλοντικό αποτύπωμα.

Συμπερασματικά, η προσθήκη της ενσωματωμένης ενέργειας και άνθρακα στις εκτιμήσεις περιβαλλοντικών επιπτώσεων διασφαλίζει μια ολοκληρωμένη κατανόηση του οικολογικού αποτυπώματος ενός έργου. Αξιοποιώντας εργαλεία όπως το LCA, το Carbon Footprint και άλλα λογισμικά, οι ενδιαφερόμενοι φορείς είναι σε θέση να λαμβάνουν τεκμηριωμένες αποφάσεις για την ελαχιστοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων και την προώθηση της αειφόρου ανάπτυξης στις κατασκευές.

4. Υπολογισμός Ενσωματωμένης Ενέργειας & Ενσωματωμένου CO_2

Ο προσδιορισμός και η αξιολόγηση της ενσωματωμένης ενέργειας και άνθρακα ενός δομικού υλικού, ενός προϊόντος ή γενικότερα ενός ολόκληρου κτιρίου είναι μια πολύπλοκη και σύνθετη εργασία. Τα κτίρια αποτελούνται από μια πληθώρα υλικών, κάθε ένα από τα οποία υπόκειται σε διαφορετικές συνθήκες παραγωγής και επεξεργασίας καθώς χρησιμοποιούνται διαφορετικές πηγές ενέργειας και πρώτες ύλες, με αποτέλεσμα για τον ίδιο τύπο υλικού η ενσωματωμένη ενέργεια ενός υλικού να διαφέρει μεταξύ των κατασκευαστών.

Ο υπολογισμός της ενσωματωμένης ενέργειας και άνθρακα των προϊόντων γίνεται βάση διεθνών προτύπων (ISO 14067:2018 Αέρια θερμοκηπίου - Αποτύπωμα άνθρακα προϊόντων - Απαιτήσεις και κατευθυντήριες γραμμές για ποσοτικοποίηση) και μπορεί να επιτευχθεί με διαφορετικές μεθόδους. Η πιο συνήθης μέθοδος προσδιορισμού των παραπάνω μεγεθών βασίζεται μέσα σε ένα πλαίσιο αξιολόγησης του κύκλου ζωής (LCA) λαμβάνοντας υπόψη μια σειρά περιβαλλοντικών επιπτώσεων (ISO 14040:2006 Περιβαλλοντική διαχείριση - Αξιολόγηση κύκλου ζωής - Αρχές και πλαίσιο) και χρησιμοποιείται για την ανάπτυξη περιβαλλοντικών δηλώσεων προϊόντων (EPD). Ωστόσο, χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή όταν επιλέγονται τιμές ενσωματωμένης ενέργειας και ενσωματωμένου άνθρακα από διαφορετικές πηγές, καθώς τα υλικά δεν είναι εύκολα συγκρίσιμα. Για τους παραπάνω λόγους, στην παρούσα εργασία θα επιλεχθεί μια ενιαία βάση δεδομένων, η οποία θα αναλυθεί εκτενέστερα σε παρακάτω ενότητα.

Η LCA των δομικών υλικών είναι ιδιαίτερη σημαντική καθώς μας παρέχει μια γενική καθοδήγηση για την επιλογή των κατάλληλων υλικών για το εκάστοτε κατασκευαστικό έργο. Πολλά υλικά με υψηλή θερμική μάζα παρουσιάζουν συχνά υψηλή ενσωματωμένη ενέργεια, ωστόσο είναι σε θέση να εξοικονομούν ενέργεια κατά τη φάση λειτουργίας του κτιρίου όταν χρησιμοποιούνται στα σωστά κλίματα και με τις σωστές αρχές παθητικού σχεδιασμού. Ωστόσο, όταν χρησιμοποιούνται σε κλίματα με διαφορετικές θερμοκρασιακές συνθήκες ή χωρίς να λαμβάνονται υπόψιν οι αρχές παθητικού σχεδιασμού, η υψηλή θερμική μάζα αυξάνει σημαντικά την ενσωματωμένη ενέργεια του κτιρίου και την κατανάλωση ενέργειας κατά τη χρήση ενώ παράλληλα ενδέχεται να μειώσει τη θερμική άνεση (Crawford, 2020). Η γενική κατεύθυνση είναι να χρησιμοποιούνται δομικά υλικά που δεν έχουν πολύ μεγαλύτερη ενσωματωμένη ενέργεια από αυτή που απαιτείται για τον επιδιωκόμενο σκοπό.

Η τάξη μεγέθους της ενσωματωμένης ενέργειας ενός δομικού υλικού εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τον βαθμό επεξεργασίας των πρώτων υλών για να παραχθεί ένα τελικό προϊόν. Σήμερα, στα περισσότερα κτίρια χρησιμοποιούνται μεγάλες ποσότητες υλικών με σχετικά χαμηλή (ξυλεία) ή μέση (σκυρόδεμα) ενσωματωμένη ενέργεια και μικρότερες ποσότητες υλικών με υψηλή ενσωματωμένη ενέργεια (μέταλλα) (Hall, 2020). Βέβαια, κάθε υλικό ίδιου τύπου μπορεί να έχει διαφορετικές τιμές ενσωματωμένης ενέργειας και άνθρακα καθώς χρησιμοποιούνται διαφορετικές κατασκευαστικές τεχνικές. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δίνεται στις πηγές ενέργειας που χρησιμοποιούνται για το εκάστοτε υλικό, αφού η ενεργειακή επιβάρυνση ενός υλικού που βασίζεται σε ορυκτά καύσιμα είναι πολλαπλάσια των υλικών που η παραγωγή τους βασίζεται σε ΑΠΕ. Επομένως, η ενσωματωμένη ενέργεια ενός υλικού διαφέρει ανάλογα με τον τρόπο παραγωγής αλλά και την τοποθεσία παραγωγής (απόσταση μεταφοράς) του δομικού προϊόντος.

Επιπρόσθετα, οι ενσωματωμένες τιμές των υλικών διαφοροποιούνται αρκετά όταν χρησιμοποιούνται ανακυκλώσιμα υλικά, καθώς η ανακύκλωση και επαναχρησιμοποίηση υλικών μειώνει σημαντικά τα ενσωματωμένα μεγέθη. Για παράδειγμα, υλικά με υψηλό κόστος και μεγάλες ενεργειακές απαιτήσεις για την παραγωγή τους (ανοξείδωτος χάλυβας, αλουμίνιο) είναι πιθανό να ανακυκλωθούν και να επαναχρησιμοποιηθούν μειώνοντας αισθητά την ενσωματωμένη τους ενέργεια σε σύγκριση με εκείνα της αρχική παραγωγής. Η εξοικονόμηση από την ανακύκλωση υλικών ποικίλλει σημαντικά, με εξοικονόμηση έως και 95% για το αλουμίνιο, αλλά μόνο 20% για το γυαλί (Crawford, 2020). Παράλληλα, ορισμένα υλικά ενδέχεται να απαιτούν επεξεργασία προτού επαναχρησιμοποιηθούν, αυξάνοντας το ενεργειακό τους κόστος, ιδιαίτερα εάν πρόκειται για μεγάλες αποστάσεις μεταφοράς.

Συνολικά, η ενσωματωμένη ενέργεια αποτελεί ένα μείζον περιβαλλοντικό ζήτημα, με αποτέλεσμα η επιλογή ενός δομικού υλικού να πρέπει να λαμβάνει υπόψιν τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις που σχετίζονται με την κατασκευή, τη χρήση και το τέλος του κύκλου ζωής του κτιρίου. Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις περιλαμβάνουν πτυχές όπως η απελευθέρωση ρύπων και οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, η εξάντληση πρώτων υλών και η απώλεια οικοτόπων και βιοποικιλότητας (www.yourhome.gov.au).

4.1 Βάση Δεδομένων ICE

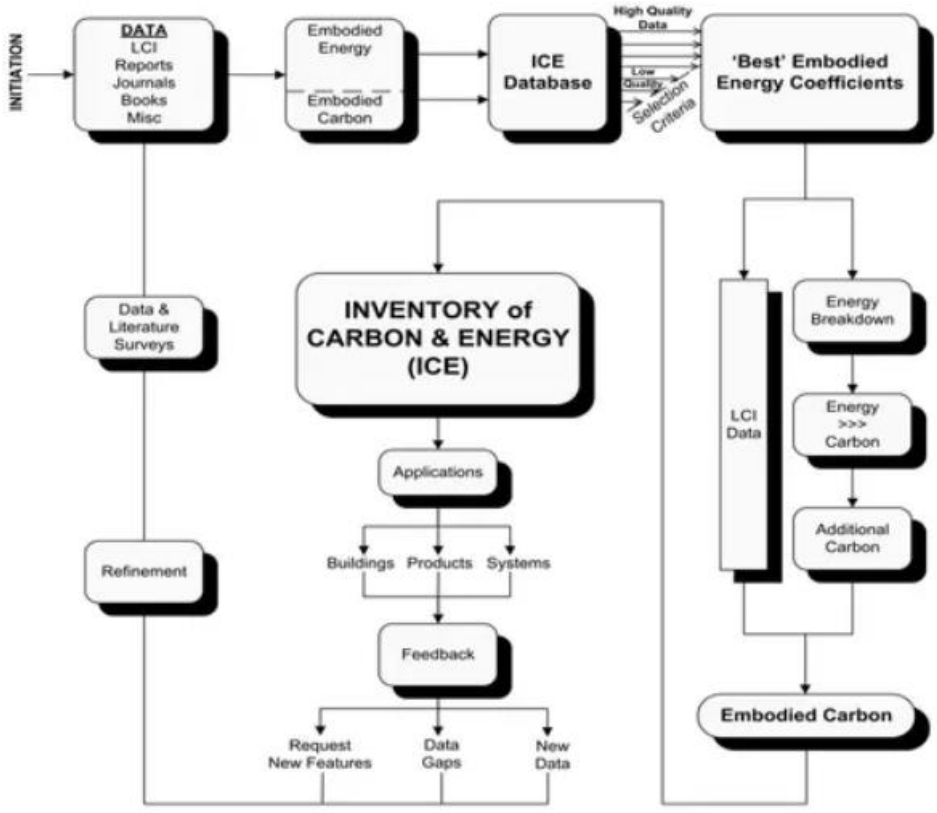
Ο προσδιορισμός της ενσωματωμένης ενέργειας και του ενσωματωμένου άνθρακα ενός κατασκευαστικού έργου βασίζεται σε βάσεις δεδομένων, που περιλαμβάνουν μέσους όρους ενέργειας που απαιτούνται για την παραγωγή των υλικών κατά βάρος ή κατ' όγκο, οι οποίοι έχουν εκπονηθεί από ανεξάρτητους φορείς (Σαργέντης, 2014). Στη σημερινή αγορά υπάρχουν πολυάριθμες βάσεις δεδομένων που σχετίζονται με την ενσωματωμένη ενέργεια και τον ενσωματωμένο άνθρακα των δομικών υλικών, ωστόσο η πλειοψηφία αυτών των βάσεων αποτελούν ιδιόκτητους πόρους όπου κι απαιτείται συνδρομή. Στην παρούσα εργασία κρίθηκε σκόπιμο να επικεντρωθούμε σε μια και μόνο βάση δεδομένων έτσι ώστε να μπορούμε να συγκρίνουμε τα ενσωματωμένα μεγέθη των υλικών. Για τον λόγο αυτό, επιλέχθηκε η βάση δεδομένων ICE (Inventory of Carbon and Energy) όπου το περιεχόμενο της είναι διαθέσιμο στο ευρύτερο κοινό και παρέχει διαφανή και αξιόπιστα δεδομένα για μια πληθώρα υλικών.

Η βάση δεδομένων ICE αναπτύχθηκε από τους Geoffrey Hammond και Craig Jones από το Πανεπιστήμιο του Bath και στοχεύει να παρέχει τα απαραίτητα δεδομένα για τον υπολογισμό της καταναλισκόμενης ενέργειας και του ενσωματωμένου άνθρακα ενός κτιρίου. Η ICE εμπεριέχει πάνω από 1800 εγγραφές για 34 κατηγορίες δομικών υλικών, τα δεδομένα έχουν συγκεντρωθεί από ανεξάρτητες πηγές και ανοιχτή βιβλιογραφία και έχουν αναλυθεί αυστηρά για να δώσει στους χρήστες εμπιστοσύνη στην αξιοπιστία των τιμών (G.Hammond & C.Jones, 2011). Τα δεδομένα κατηγοριοποιούνται σε επιμέρους κατηγορίες σε μορφή πινάκων όπου δίνονται οι τιμές τους σε ενσωματωμένη ενέργεια (MJ/kg) και ενσωματωμένο άνθρακα ($kgCO_2/kg$), ($kgCO_2e/kg$) καθώς και επισημαίνονται κάποια σχόλια ως προς την πηγή των δεδομένων. Η τελευταία μονάδα μέτρησης ($kgCO_2e/kg$), όπως έχει ήδη αναφερθεί, εκφράζει τη συνολική ποσότητα αερίων θερμοκηπίου που εκπέμπονται ως ισοδύναμα διοξειδίου του άνθρακα κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής ενός υλικού.

Η πλειονότητα των δεδομένων εισόδου στην ICE προήλθε από δευτερεύοντες πόρους δεδομένων, όπως δημοσιεύματα περιοδικών και τεχνικών εκθέσεων, ενώ αποφεύχθηκαν οι πόροι που βασίζονται στη συνδρομή λόγω πιθανών ζητημάτων πνευματικών δικαιωμάτων (G.Hammond & C.Jones, 2011). Για λόγους αξιοπιστίας τηρήθηκαν ορισμένα κριτήρια συμμόρφωσης με εγκεκριμένα πρότυπα, τα οποία είχα να κάνουν με τα όρια του συστήματος, την χώρα προέλευσης και την ηλικία των πηγών δεδομένων. Ακολούθως, τα δεδομένα

αποθηκεύτηκαν σε μια βάση δεδομένων σε μορφή πινάκων και αξιολογηθήκαν ως προς την ποιότητα για να εξαχθούν οι καλύτεροι ενσωματωμένοι συντελεστές ενέργειας και άνθρακα.

Σημαντικό είναι να σημειωθεί ότι η βάση δεδομένων ICE έχει όρια cradle-to-gate, δηλαδή από την εξόρυξη έως και την επεξεργασία των υλικών στις μονάδες επεξεργασίας και παραγωγής. Μια πιο αξιόπιστη αξιολόγηση της ενσωματωμένης ενέργειας και άνθρακα θα έπρεπε να έχει όρια cradle-to-grave, έτσι ώστε να λαμβάνει υπόψιν τις επιπτώσεις του υλικού σε ολόκληρο τον κύκλο ζωής του. Γενικότερος σκοπός της συγκεκριμένης βάσης δεδομένων είναι να γνωστοποιήσει τις ενεργειακές και περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις των δομικών υλικών σε όλους τους φορείς του κατασκευαστικού κλάδου έτσι ώστε να λαμβάνονται τεκμηριωμένες αποφάσεις σχετικά με την επιλογή υλικού σε ένα έργο.



Σχήμα 35 : «Διάγραμμα ροής βάσης δεδομένων ICE» (Hammond & Jones, 2011)

Το 2011 οι Hammond και Jones ανέπτυξαν ένα ολοκληρωμένο και λεπτομερή κατάλογο δεδομένων ο οποίος αναφέρεται στην βιβλιογραφία ως ICE v2 database, έχει την δομή πινάκων και τα δεδομένα κατηγοριοποιούνται σε επιμέρους κατηγορίες ενσωματωμένης ενέργειας και ενσωματωμένο άνθρακα, ενώ παρατίθενται και κάποιοι σχολιασμοί. Ωστόσο, το 2019

αναπτύσσεται μια νέα βάση δεδομένων ICE v3 από όπου προκύπτει μια αλλαγή στην εστίαση και τη μεθοδολογία, αντανακλώντας τις ευρύτερες τάσεις στην έρευνα και την πολιτική αειφορίας. Συγκεκριμένα, η πιο πρόσφατη βάση δεδομένων v3 εστιάζει στον ενσωματωμένο άνθρακα αντανακλώντας μια οικουμενική στροφή προς τον περιορισμό των GHGs και ιδιαιτέρα του CO_2 λόγω της συμβολής του στην κλιματική αλλαγή.

Σήμερα, πολλές πιστοποιήσεις, πλαίσια και κανονισμοί επικεντρώνονται στο αποτύπωμα του άνθρακα και των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των υλικών καθώς η κλιματική αλλαγή και η υπερθέρμανση του πλανήτη αποτελούν μείζονα θέματα. Σε αυτό το πλαίσιο, το ICE v3 ευθυγραμμίζεται με τις σύγχρονες ανάγκες και δίνει έμφαση στον ενσωματωμένο άνθρακα των δομικών υλικών, με σκοπό τον μετριασμό των συνεπειών της κλιματικής αλλαγής. Παράλληλα, η εστίαση στον ενσωματωμένο άνθρακα έναντι της ενσωματωμένης ενέργειας οφείλεται και στη βελτίωση των πρακτικών συλλογής δεδομένων, οι οποίες τείνουν να είναι περισσότερο αξιόπιστες για τον άνθρακα παρά την ενέργεια (Circular Ecology - ICE Database v3.0, 2019).

Επιπρόσθετα, το ICE v3 σχεδιάστηκε για να είναι πιο φιλικό προς τον χρήστη και να απλοποιεί τις διαδικασίες λήψης αποφάσεων υλικών για τη μείωση των αποτυπωμάτων άνθρακα στα κατασκευαστικά έργα. Έτσι, για αποφυγή αλληλεπικαλύψεων μεταξύ ενσωματωμένης ενέργειας και CO_2, το οποίο οδηγεί σε πιθανή διπλή καταμέτρηση εάν αναφέρονται και τα δύο μεγέθη, το v3 αναφέρεται αποκλειστικά στον ενσωματωμένο άνθρακα των υλικών. Τέλος, είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι έχουν σημειωθεί πρόοδοι στην κατανόηση και στις μεθόδους υπολογισμού του ενσωματωμένου άνθρακα τα τελευταία χρόνια και ως συνέπεια η ανάπτυξη της ICE v3 αναδεικνύει αυτές τις βελτιώσεις, παρέχοντας πιο ακριβή και σχετικά δεδομένα (Circular Ecology - ICE Database v3.0, 2019).

Συμπερασματικά, η εξαίρεση της ενσωματωμένης ενέργειας στην τελευταία έκδοση σε σύγκριση με την ICE v2 αντικατοπτρίζει μια σκόπιμη απόφαση να δοθεί προτεραιότητα στον ενσωματωμένο άνθρακα λόγω της άμεσης σχέσης του με τον μετριασμό της κλιματικής αλλαγής, της καλύτερης διαθεσιμότητας δεδομένων και της στροφής των αναγκών των χρηστών προς μετρήσεις που σχετίζονται με το αποτύπωμα του άνθρακα. Στην παρούσα έκθεση για καλύτερη κατανόηση της ενσωματωμένης ενέργειας θα αποδοθούν ορισμένοι πίνακες υλικών και θα γίνει η αξιολόγηση τους από την ICE v2, ωστόσο τα σημαντικότερα συμπεράσματα θα εξαχθούν από τους πίνακες και διαγράμματα του ενσωματωμένου άνθρακα από την ICE v3.

4.2 Αξιολόγηση Ενσωματωμένης Ενέργειας (ICE v2)

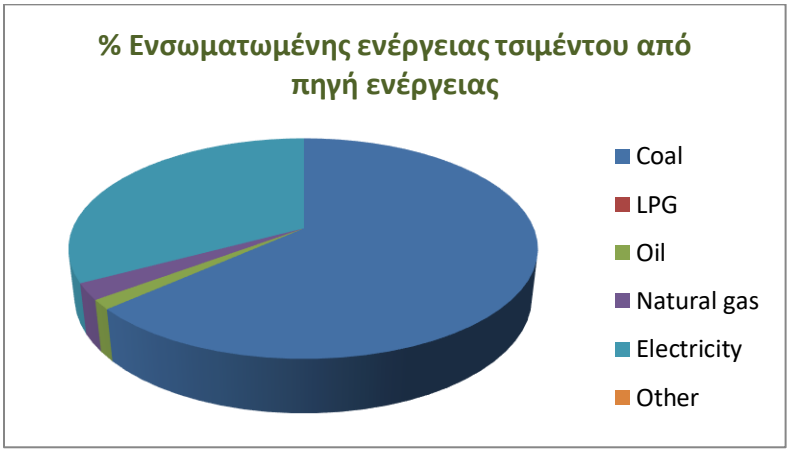
Η ενσωματωμένη ενέργεια και ο ενσωματωμένος άνθρακας είναι δύο κρίσιμοι παράγοντες που πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν κατά την αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των δομικών υλικών. Η ενσωματωμένη ενέργεια, όπως έχει ήδη αναφερθεί, προσδιορίζει τη συνολική ενέργεια που απαιτείται για την παραγωγή ενός υλικού, συμπεριλαμβανομένης της ενέργειας που χρησιμοποιείται για εξόρυξη, κατασκευή, μεταφορά και εγκατάσταση. Στην παρούσα ενότητα για την καλύτερη κατανόηση των παραπάνω όρων, θα παρουσιαστούν πίνακες υλικών από τη βάση δεδομένων ICE v2 και θα αξιολογηθεί η ενσωματωμένη ενέργεια των πιο κοινών υλικών δόμησης.

Στο ακόλουθο διάγραμμα αποτυπώνονται οι τιμές της ενσωματωμένης ενέργειας των πιο κοινών υλικών που χρησιμοποιούνται στην κατασκευαστική βιομηχανία. Παρατηρείται εύκολα ότι την μεγαλύτερη τιμή την παρουσιάζει το αλουμίνιο ενώ υψηλές τιμές παρουσιάζουν και τα πολυμερή (πλαστικά), αντιθέτως μικρές τιμές εντοπίζονται στους φυσικούς λίθους, στα κεραμικά προϊόντα, στα αδρανή και στο σκυρόδεμα. Αξίζει βέβαια να σημειωθεί στο συγκεκριμένο διάγραμμα λαμβάνονται υπόψιν οι τιμές των υλικών που έχουν προκύψει από βιομηχανική παραγωγή και δεν έχουν ανακυκλωθεί ή επαναχρησιμοποιηθεί, κάτι που θα μείωνε σημαντικά την τιμή της ενσωματωμένης ενέργειας τους. Συνάμα, είναι σημαντικό να υπενθυμιστεί ότι η βάση δεδομένων ICE v2 λαμβάνει υπόψιν την διαδρομή cradle to gate, δηλαδή από την εξόρυξη των υλικών έως και την βιομηχανική τους επεξεργασία, χωρίς να συμπεριλαμβάνεται η μετέπειτα πορεία του υλικού.

Σχήμα 36 : «Ενσωματωμένη ενέργεια δομικών υλικών»

4.2.1 Αξιολόγηση Ενσωματωμένης Ενέργειας Σκυροδέματος

Το σκυρόδεμα αποτελεί ένα θεμελιώδες υλικό για την κατασκευαστική βιομηχανία καθώς χρησιμοποιείται στην πλειονότητα των κατασκευών λόγω των μοναδικών ιδιοτήτων και χαρακτηριστικών που προσδίδει στις κατασκευές. Στην σύσταση του κυριαρχούν τα αδρανή και το τσιμέντο, τα πρώτα αποτελούν φιλικά υλικά προς το περιβάλλον και παρουσιάζουν χαμηλή ενσωματωμένη ενέργεια ενώ το τσιμέντο παρουσιάζει υψηλότερες τιμές. Η ενσωματωμένη ενέργεια των αδρανών υπολογίστηκε στα 0.083 MJ/kg ενώ του τσιμέντου στα 5.5 MJ/kg όταν πρόκειται για τσιμέντο Portland CEM I (κλίνκερ 94%, γύψος 5%).



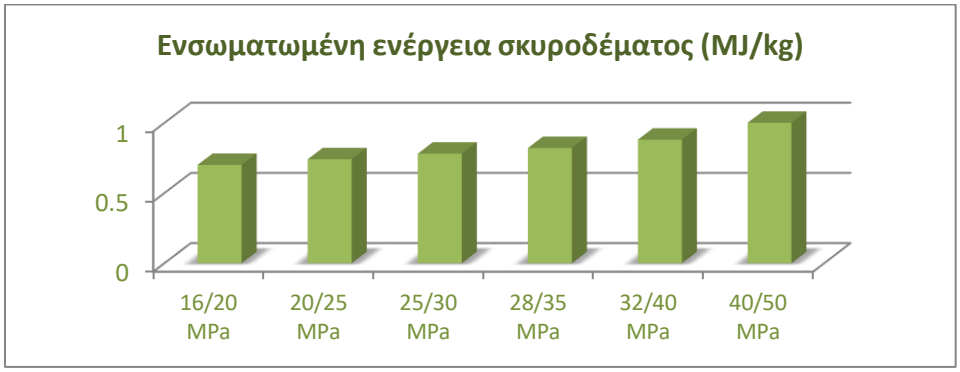
Σχήμα 37 : «Ποσοστό ενσωματωμένης ενέργειας τσιμέντου ανάλογα με την πηγή»

Το τσιμέντο Portland αντιπροσωπεύει ένα από τα κύρια υλικά που καταναλώνονται σε μεγάλες ποσότητες για την κατασκευή κτιρίων. Σύμφωνα με το παραπάνω γράφημα η ενέργεια του τσιμέντου προέρχεται κυρίως από τη χρήση άνθρακα στους περιστροφικούς κλιβάνους και στην ενέργεια που απαιτείται για τη σύνθλιψη και άλεση του κλίνκερ που βασίζεται κυρίως σε ηλεκτρισμό. Η υγρή διεργασία που χρησιμοποιείται σε παλαιότερες τσιμεντοβιομηχανίες οδηγεί σε κατανάλωση ενέργειας 6.8 MJ/kg τσιμέντου, ενώ οι σύγχρονες μονάδες που χρησιμοποιούν προασβεστοποίηση και ξηρή διαδικασία καταναλώνουν 4.2 MJ/kg τσιμέντου. Η τιμή των 5.5 MJ/kg τσιμέντου αντιπροσωπεύει τη μέση τιμή των 6.8 MJ/kg και 4.2 MJ/kg.

Το τσιμέντο δύναται να μειώσει την ενσωματωμένη ενέργεια του αν αντικατασταθεί ποσότητα κλίνκερ με ιπτάμενη τέφρα ή σκωρία υψικαμίνου σε ποσά κάτω των 4 MJ/kg, ενώ το ασβεστοκονίαμα που προκύπτει από την ανάμειξη τσιμέντου και αδρανών παρουσιάζει τιμές κοντά στην μονάδα, οι οποίες μειώνονται όσο μικραίνει η περιεκτικότητα του σε τσιμέντο. Μια

ακόμη αποτελεσματική λύση για δευτερεύουσες εφαρμογές όπως το κονίαμα τοιχοποιίας, το σοβάντισμα και η βάση για δάπεδα αποτελούν τα τσιμέντα LP που αποτελούνται από 30% ασβέστη, 60% ποζολάνη και 10% γύψο με ενεργειακό περιεχόμενο στα 2.33 MJ/kg.

Το σκυρόδεμα που προκύπτει από τα παραπάνω υλικά παρουσιάζει διαφορετικές τιμές ανάλογα με την τιμή της αντοχής του. Σκυροδέματα μεγαλύτερων αντοχών παρουσιάζουν υψηλότερες τιμές ενσωματωμένης ενέργειας, όπως φαίνεται στο ακόλουθο διάγραμμα.



Σχήμα 38 : «Ενσωματωμένη ενέργεια σκυροδέματος»

Οι παραπάνω τιμές προκύπτουν από την ICE v2 και μπορούν να μειωθούν ακόμη περισσότερο αν μειωθεί η περιεκτικότητα του σκυροδέματος σε τσιμέντο και αναπληρωθεί από ιπτάμενη τέφρα ή σκωρία υψικαμίνου, όπως δίνεται από τους ακόλουθους πίνακες.

% Αντικατάστασης τσιμέντου με ιπτάμενη τέφρα	0% 15% 30%	0% 15% 30%	0% 15% 30%	Σημείωση : 0% είναι το σκυρόδεμα που χρησιμοποιεί τσιμέντο CEM I (μη τυπικό)
GEN 0 (6/8 MPa)	0.55 0.52 0.47	0.071 0.065 0.057	0.076 0.069 0.061	Ονομαστική θλιπτική αντοχή C 6/8 MPa. Αντοχή σε θλίψη 28 ημερών με τη μέθοδο British cube 8 MPa, με τη μέθοδο του Ευρωπαϊκού κυλίνδρου 6 MPa.
GEN 1 (8/10 MPa)	0.70 0.65 0.59	0.097 0.088 0.077	0.104 0.094 0.082	Πιθανές χρήσεις: σκυρόδεμα απλής χρήσης, μαζική πλήρωση, θεμελιώσεις, θεμέλια τάφρων
GEN 2 (12/15 MPa)	0.76 0.71 0.64	0.106 0.098 0.087	0.114 0.105 0.093	-
GEN 3 (16/20 MPa)	0.81 0.75 0.68	0.115 0.105 0.093	0.123 0.112 0.100	Πιθανές χρήσεις: δάπεδα γκαράζ.
RC 20/25 (20/25 MPa)	0.86 0.81 0.73	0.124 0.114 0.101	0.132 0.122 0.108	-
RC 25/30 (25/30 MPa)	0.91 0.85 0.77	0.131 0.121 0.107	0.140 0.130 0.115	Πιθανές χρήσεις: ενισχυμένα θεμέλια.
RC 28/35 (28/35 MPa)	0.95 0.90 0.82	0.139 0.129 0.116	0.148 0.138 0.124	Πιθανές χρήσεις: ενισχυμένα θεμέλια, ισόγεια.
RC 32/40 (32/40 MPa)	1.03 0.97 0.89	0.153 0.143 0.128	0.163 0.152 0.136	Πιθανές χρήσεις: δομικές χρήσεις, δάπεδα, τοίχοι.
RC 40/50 (40/50 MPa)	1.17 1.10 0.99	0.176 0.164 0.146	0.188 0.174 0.155	Πιθανές χρήσεις: εφαρμογές υψηλής αντοχής, προκατασκευή.
PAV1	0.95 0.89 0.81	0.139 0.129 0.115	0.148 0.138 0.123	Πιθανές χρήσεις: οικιακός χώρος στάθμευσης και υπαίθρια πλακόστρωση.
PAV2	1.03 0.97 0.89	0.153 0.143 0.128	0.163 0.152 0.137	Πιθανές χρήσεις: βαρέως τύπου υπαίθρια πλακόστρωση.

Πίνακας 21 : «Ενσωματωμένη ενέργεια τσιμέντου και άνθρακα με αντικατάσταση τσιμέντου με ιπτάμενη τέφρα» (circularecology.com/embodied-carbon-footprint-database.html)

% Αντικατάστασης τσιμέντου με σκωρία υψικαμίνου	0% 25% 50%	0% 25% 50%	0% 25% 50%	Σημείωση : 0% είναι το σκυρόδεμα που χρησιμοποιεί τσιμέντο CEM I (μη τυπικό)
GEN 0 (6/8 MPa)	0.55 0.48 0.41	0.071 0.056 0.042	0.076 0.060 0.046	-
GEN 1 (8/10 MPa)	0.70 0.60 0.50	0.097 0.075 0.054	0.104 0.080 0.058	-
GEN 2 (12/15 MPa)	0.76 0.62 0.55	0.106 0.082 0.061	0.114 0.088 0.065	-
GEN 3 (16/20 MPa)	0.81 0.69 0.57	0.115 0.090 0.065	0.123 0.096 0.070	-
RC 20/25 (20/25 MPa)	0.86 0.74 0.62	0.124 0.097 0.072	0.132 0.104 0.077	-
RC 25/30 (25/30 MPa)	0.91 0.78 0.65	0.131 0.104 0.076	0.140 0.111 0.081	-
RC 28/35 (28/35 MPa)	0.95 0.83 0.69	0.139 0.111 0.082	0.148 0.119 0.088	-
RC 32/40 (32/40 MPa)	1.03 0.91 0.78	0.153 0.125 0.094	0.163 0.133 0.100	-
RC 40/50 (40/50 MPa)	1.17 1.03 0.87	0.176 0.144 0.108	0.188 0.153 0.115	-
PAV1	0.95 0.82 0.70	0.139 0.111 0.083	0.148 0.118 0.088	-
PAV2	1.03 0.91 0.77	0.153 0.125 0.094	0.163 0.133 0.100	-

Πίνακας 22 : «Ενσωματωμένη ενέργεια και άνθρακας τσιμέντου με αντικατάσταση τσιμέντου με σκωρία υψικαμίνου» (circularecology.com/embodied-carbon-footprint-database.html)

Εξάλλου, το οπλισμένο και το προκατασκευασμένο σκυρόδεμα βασίζονται στις παραπάνω τιμές αλλά υπολογίζονται με διαφορετικό τρόπο. Συγκεκριμένα, λαμβάνεται από το σχήμα 10 μια τιμή ανάλογα με την αντοχή του σκυροδέματος και προστίθεται το βάρος του χάλυβα πολλαπλασιασμένο με μια τυπική τιμή. Για παράδειγμα, οπλισμένο σκυρόδεμα RC 25/30 με 110 kg/m^3 σκυροδέματος λαμβάνει την τιμή 1.92 MJ/kg, η οποία προκύπτει από την τιμή του άοπλου σκυροδέματος (0.78) όπου προστίθεται το βάρος του χάλυβα πολλαπλασιασμένο με την τιμή 1.04 για να προκύψει η τελική τιμή της ενσωματωμένης ενέργειας του υλικού (0.78 + 1.04 *1.1=1.92 MJ/kg).

ΥΛΙΚΑ	ΕΝΣΩΜΑΤΩΜΕΝΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ & ΑΝΘΡΑΚΑΣ			ΣΧΟΛΙΑ
	ΕΕ - MJ/kg	EC - $kgCO_2/kg$	EC – (GHG) $kgCO_2e/kg$	EE = Embodied Energy, EC = Embodied Carbon
ΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ				
	Για οπλισμό προσθέστε αυτή την τιμή στον κατάλληλο συντελεστή σκυροδέματος για κάθε 100 kg οπλισμού ανά m3 σκυροδέματος			
	1.04	0.072	0.077	Προσθέστε για κάθε 100 kg χαλύβδινου οπλισμού ανά m3 σκυροδέματος. Χρησιμοποιήστε πολλαπλάσιο αυτής της τιμής, δηλαδή για 150 κιλά χάλυβα χρησιμοποιήστε συντελεστή 1.5 φορές αυτές τις τιμές.
EXAMPLE:				Με οπλισμό 110 kg/m3 σκυροδέματος. Για σταθμισμένο μέσο τσιμέντο Ηνωμένου Βασιλείου με τυπικό σενάριο χάλυβα του (59% ανακυκλωμένο περιεχόμενο). Έλεγχος εάν είναι σύμφωνο με την υπόλοιπη μελέτη ή με τις απαιτήσεις μιας προκαθορισμένης μεθόδου.
Ενισχυμένο RC 25/30 MPa (με 110 kg/m3 σκυρόδεμα)	1.92 MJ/kg (0.78 + 1.04 *1.1)	0.185 $kgCO_2/kg$ (0.106 + 0.072 * 1.1)	0.198 $kgCO_2e/kg$ (0.113 + 0.077 * 1.1)	

Πίνακας 23 : «Υπολογισμός ενσωματωμένης ενέργειας και άνθρακα οπλισμένου σκυροδέματος» (circularecology.com/embodied-carbon-footprint-database.html)

Με τον ίδιο τρόπο υπολογίζεται και η τιμή του προκατασκευασμένου σκυροδέματος, όπου λαμβάνεται μια τιμή (MJ/kg) ανάλογα με την αντοχή του υλικού στην οποία προστίθεται μια τυπική τιμή που ορίζεται στο 0.5 MJ/kg για την ενσωματωμένη ενέργεια. Έτσι για precast RC 40/50 MPa λαμβάνουμε την τιμή 1.00 MJ/kg + 0.50 MJ/kg = 1.50 MJ/kg.

ΥΛΙΚΑ	ΕΝΣΩΜΑΤΩΜΕΝΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ & ΑΝΘΡΑΚΑΣ			ΣΧΟΛΙΑ
	EE - MJ/kg	EC - $kgCO_2/kg$	EC – (GHG) $kgCO_2e/kg$	EE = Embodied Energy, EC = Embodied Carbon
ΠΡΟΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ				
	Για προκατασκευή προσθέστε αυτή την τιμή στον επιλεγμένο συντελεστή του κατάλληλου μίγματος σκυροδέματος			
	0.5	0.027	0.029	
EXAMPLE: ΠΡΟΚΑΤ RC 40/50 MPa	1.50 MJ/kg (1.00 + 0.50)	0.168 $kgCO_2/kg$ (0.141 + 0.027)	0.180 $kgCO_2/kg$ (0.151 + 0.029)	Για κάθε 1 kg προκατασκευασμένο σκυρόδεμα. Περιλαμβάνει τις καταγεγραμμένες εργασίες του εργοστασίου στο HB και την εκτιμώμενη μεταφορά των συστατικών στην πύλη του εργοστασίου (38km αδρανή, εκτιμώμενο 100km τσιμέντο). Τα δεδομένα είναι μόνο από την πύλη του εργοστασίου.
EXAMPLE:				
ΠΡΟΚΑΤ RC 40/50 με οπλισμό (80kg/m^3)	2·33 MJ/kg (1.50 + 1.04 * 0.8)	0·229 $kgCO_2/kg$ (0.171 + 0.072 * 0.8)	0·242 $kgCO_2/kg$ (0.180 + 0.077 * 0.8)	

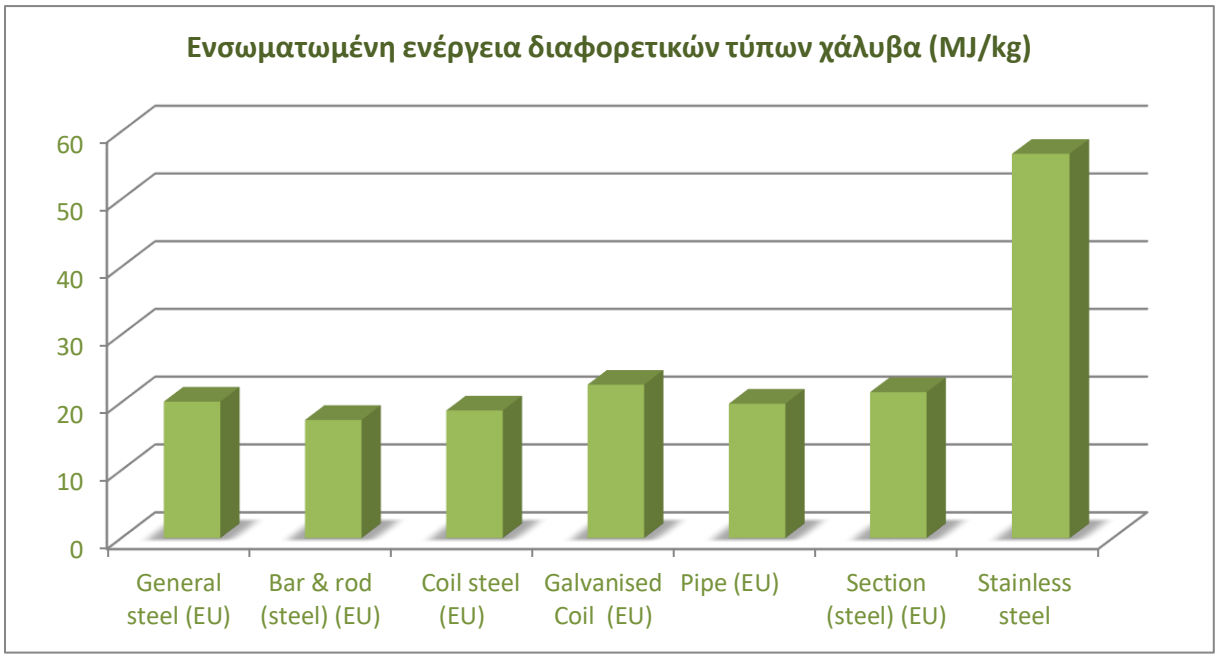
Πίνακας 24 : «Υπολογισμός ενσωματωμένης ενέργειας και άνθρακα προκατασκευασμένου σκυροδέματος» (circularecology.com/embodied-carbon-footprint-database.html)

4.2.2 Αξιολόγηση Ενσωματωμένης Ενέργειας Χάλυβα

Ο χάλυβας αποτελεί ένα αξιόλογο δομικό υλικό που βρίσκει ποικίλες εφαρμογές στην κατασκευαστική βιομηχανία, ωστόσο παρουσιάζει σημαντική ενσωματωμένη ενέργεια καθώς καταναλώνονται μεγάλα ποσά ενέργειας για την παραγωγή και επεξεργασία του. Σύμφωνα με το ακόλουθο γράφημα η τιμή του ενεργειακού περιεχομένου του χάλυβα κυμαίνεται περίπου στα 20MJ/kg, μιας τιμής αρκετά υψηλότερης από εκείνης του σκυροδέματος και λοιπών υλικών. Οι τιμές αυτές βασίζονται σε δεδομένα που έχουν ανακτηθεί από ευρωπαϊκές βιομηχανίες.

Παρατηρείται, ότι ο χάλυβας διατίθεται στην αγορά με πολλές μορφές (χάλυβας οπλισμού, κουλούρα, σωλήνας) και η ενσωματωμένη ενέργεια του βρίσκεται κοντά στα 20 MJ/kg σε κάθε περίπτωση με εξαίρεση τον ανοξείδωτο χάλυβα με τριπλάσια σχεδόν τιμή (56.7 MJ/kg). Ο χάλυβας αποτελεί ένα ενεργοβόρο υλικό που όμως όταν ανακυκλωθεί και επαναχρησιμοποιηθεί σε άλλα έργα παρουσιάζει μικρότερο ενεργειακό περιεχόμενο, κάτι που

είναι εμφανές από τον παρακάτω πίνακα. Συνεπώς, έχουμε τιμές περίπου στα 35 MJ/kg για πρωτογενή χάλυβα και 9.4 MJ/kg για ανακυκλωμένο χάλυβα.



Σχήμα 39 : ««Ενσωματωμένης ενέργεια διαφορετικών τύπων χάλυβα»

ΥΛΙΚΑ	ΕΝΣΩΜΑΤΩΜΕΝΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ & ΑΝΘΡΑΚΑΣ			ΣΧΟΛΙΑ
	ΕΕ - MJ/kg	ΕC - $kgCO_2/kg$	ΕC – (GHG) $kgCO_2e/kg$	EE = Embodied Energy, EC = Embodied Carbon
Steel				
Γενικό Μέσο Ανακυκλωμένο Περιεχόμενο (ΕΕ)	**20.1**	**1.37**	**1.46**	**Μέσος όρος ανακυκλωμένου περιεχομένου της ΕΕ 59%. Υπολογίζεται από το μείγμα κατανάλωσης τύπων χάλυβα στο Ηνωμένο Βασίλειο (εκτός ανοξείδωτου). Όλα τα δεδομένα δεν περιλαμβάνουν την τελική κοπή των προϊόντων χάλυβα στις καθορισμένες διαστάσεις ή περαιτέρω δραστηριότητες κατασκευής. Εκτιμάται από τα δεδομένα LCA της Παγκόσμιας Ένωσης Χάλυβα (Worldsteel).**
Πρωτογενής	35.4	2.71	2.89	
Ανακυκλωμένος	9.4	0.44	0.47	
Μπάρες & ράβδοι (ΕΕ) Μέσο ανακυκλωμένο περιεχόμενο	**17.4**	**1.31**	**1.4**	**Μέσος όρος ανακυκλωμένου περιεχομένου της ΕΕ 59%.**
Πρωτογενής	29.2	2.59	2.77	
Ανακυκλωμένος	8.8	0.42	0.45	
Κουλούρα (πηνίο) (ΕΕ) Μέσο ανακυκλωμένο περιεχόμενο	**18.8**	**1.3**	**1.38**	**Αποτελεσματικό ανακυκλωμένο περιεχόμενο επειδή η διαδρομή ανακύκλωσης δεν είναι τυπική. Μέσος όρος ανακυκλωμένου περιεχομένου της ΕΕ 59%.**
Πρωτογενής	32.8	2.58	2.74	
Κουλούρα (πηνίο)-Γαλβανισμένο (ΕΕ) Μέσο ανακυκλωμένο περιεχόμενο	**22.6**	**1.45**	**1.54**	**Αποτελεσματικό ανακυκλωμένο περιεχόμενο επειδή η διαδρομή ανακύκλωσης δεν είναι τυπική. Μέσος όρος ανακυκλωμένου περιεχομένου της ΕΕ 59%.**
Πρωτογενής	40	2.84	3.01	
Μηχανικός χάλυβας-ανακυκλωμένος	13.1	0.68	0.72	

Σωλήνας (ΕΕ) Μέσο ανακυκλωμένο περιεχόμενο	**19.8**	**1.37**	**1.45**	**Αποτελεσματικό ανακυκλωμένο περιεχόμενο επειδή η διαδρομή ανακύκλωσης δεν είναι τυπική. Μέσος όρος ανακυκλωμένου περιεχομένου της ΕΕ 59%.**
Πρωτογενής	34.7	2.71	2.87	
Πλάκα (ΕΕ) Μέσο ανακυκλωμένο περιεχόμενο	**25.1**	**1.55**	**1.66**	**Αποτελεσματικό ανακυκλωμένο περιεχόμενο επειδή η διαδρομή ανακύκλωσης δεν είναι τυπική. Μέσος όρος ανακυκλωμένου περιεχομένου της ΕΕ 59%.**
Πρωτογενής	45.4	3.05	3.27	
Διατομή (ΕΕ) Μέσο ανακυκλωμένο περιεχόμενο	**21.5**	**1.42**	**1.53**	
Πρωτογενής	38	2.82	3.03	
Ανακυκλωμένος	10	0.44	0.47	
Ανοξείδωτος χάλυβας	**56.7**	**6.15**	-	**Δεδομένα παγκόσμιου μέσου όρου από δεδομένα απογραφής κύκλου ζωής του Ινστιτούτου Ανοξείδωτου Χάλυβα (ISSF).**

Πίνακας 25 : «Ενσωματωμένη ενέργεια και άνθρακα διαφορετικών τύπων χάλυβα» (circularecology.com/embodied-carbon-footprint-database.html)

Η ενσωματωμένη ενέργεια του χάλυβα προέρχεται κυρίως από τις διάφορες πηγές ενέργειας που χρησιμοποιούνται κατά τις φάσεις εξόρυξης, επεξεργασίας και κατασκευής. Η παραγωγή χάλυβα είναι ενεργοβόρα και η ενσωματωμένη ενέργειά του ποικίλλει ανάλογα με τη μέθοδο παραγωγής που χρησιμοποιείται, όπως η διαδρομή υψικαμίνου-βασικού κλιβάνου οξυγόνου (BF-BOF, Blast Furnace-Basic Oxygen Furnace) και η διαδρομή ηλεκτρικού τόξου (EAF, Electric Arc Furnace route).

Για την πρώτη περίπτωση ο άνθρακας χρησιμοποιείται κυρίως με τη μορφή οπτάνθρακα (κωκ) ως καύσιμο και αναγωγικός παράγοντας καθώς είναι απαραίτητος για τη μετατροπή του σιδηρομεταλλεύματος σε λιωμένο σίδηρο και στη συνέχεια σε χάλυβα. Αυτή η μέθοδος εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τον άνθρακα, γεγονός που την καθιστά σημαντική πηγή ενσωματωμένης ενέργειας και εκπομπών CO_2. Ο υγρός σίδηρος είναι πολύ ζεστός και εύθραυστος όταν βγαίνει από τον κλίβανο και δεν διαμορφώνεται εύκολα, για αυτό εισάγεται σε έναν βασικό κλίβανο οξυγόνου, που ονομάζεται μετατροπέας, όπου διοχετεύεται οξυγόνο στον υγρό σίδηρο για να κάψει ανεπιθύμητα στοιχεία και μετατρέποντας το σίδερο σε χάλυβα. Ακολούθως, ο υγρός χάλυβας χυτεύεται σε συμπαγείς πλάκες και υποβάλλεται σε επιμήκη προϊόντα όπως ράβδοι, σύρμα ή επίπεδες λωρίδες χάλυβα. Στην Ευρωπαϊκή Ένωση περίπου το 60% του συνολικού παραγόμενου χάλυβα προέρχεται από τη διαδικασία παραγωγής BF-BOF (www.eurofer.eu).

Τουναντίον, η μέθοδος ηλεκτρικού τόξου εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ηλεκτρική ενέργεια και ως πρώτη ύλη χρησιμοποιούνται παλιά σίδερα (σκραπ). Το EAF είναι ενεργειακά

αποδοτικότερο από τη διαδρομή BF-BOF και έχει χαμηλότερο αποτύπωμα άνθρακα καθώς η ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να προέρχεται από διάφορες πηγές, όπως οι ΑΠΕ. Το αποτύπωμα άνθρακα της διαδρομής EAF εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το ενεργειακό μείγμα του δικτύου που παρέχει την ηλεκτρική ενέργεια. Σύμφωνα με το European Steel Association περίπου το 40% του παραγόμενου χάλυβα στην ΕΕ προέρχεται μέσω της διαδικασίας EAF.

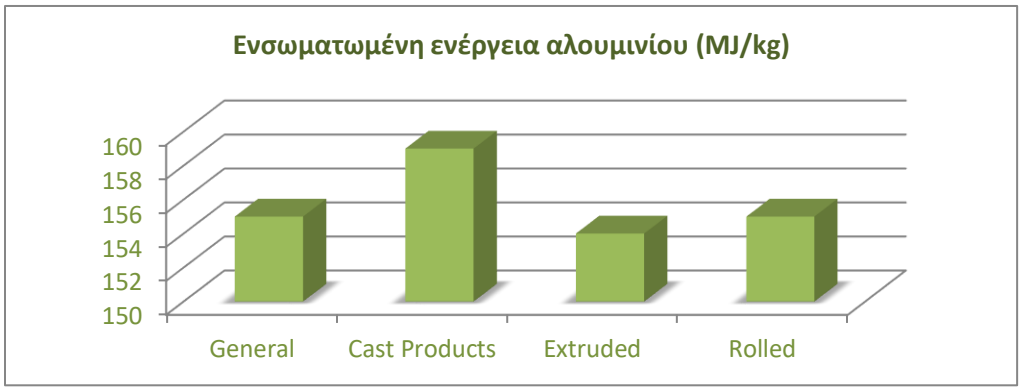
Ο χάλυβας αποτελεί το πιο διαδεδομένο μέταλλο στις κατασκευές και για αυτό είναι σκόπιμο να εξεταστεί η διαφορά που παρουσιάζει με τα υπόλοιπα μέταλλα όσον αφορά το ενεργειακό του περιεχόμενο. Από το παρακάτω διάγραμμα διακρίνεται ότι το αλουμίνιο και ο άργυρος παρουσιάζουν από τις υψηλότερες τιμές ενσωματωμένης ενέργειας (άνω των 100 MJ/kg) μεταξύ των μετάλλων ενώ από τις μικρότερες τιμές παρουσιάζει ο χάλυβας και ο σίδηρος (περίπου 20 MJ/kg). Μέταλλα όπως ο χαλκός, ο ορείχαλκος και ο μπρούντζος αν και παρουσιάζουν λιγότερες εφαρμογές στις κατασκευές, έχουν ενσωματωμένη ενέργεια που κυμαίνεται από 42 MJ/kg έως 69 MJ/kg. Σε γενικά πλαίσια, όλα τα μέταλλα έχουν υψηλή ενσωματωμένη ενέργεια που οφείλεται στις διαδικασίες εξόρυξης μεταλλευμάτων, στις μεταφορές από τα λατομεία στα εργοστάσια και κυρίως στην βιομηχανική τους επεξεργασία.

Σχήμα 40 : «Ενσωματωμένη ενέργεια μετάλλων»

4.2.3 Αξιολόγηση Ενσωματωμένης Ενέργειας Αλουμινίου

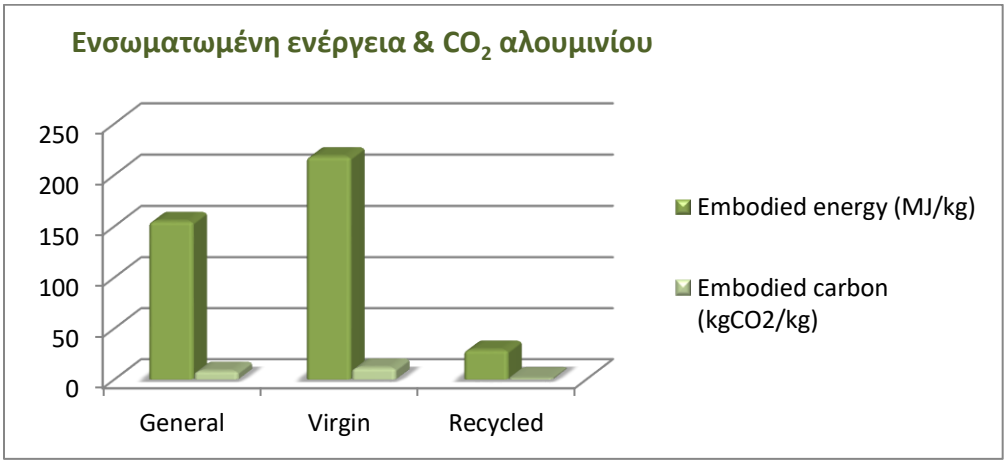
Το αλουμίνιο αποτελεί ένα υλικό που χρησιμοποιείται ευρέως στις κατασκευές, ωστόσο παρά τα πολλαπλά πλεονεκτήματα του, παρουσιάζει μεγάλα ποσά καταναλισκόμενης ενέργειας για την παραγωγή του. Η ενσωματωμένη ενέργεια του αλουμινίου είναι πολύ μεγαλύτερη από τα

υπόλοιπα δομικά υλικά και για αυτό τον λόγο κατατάσσεται στις υψηλότερες θέσεις των ενεργοβόρων υλικών. Σύμφωνα με τη βάση δεδομένων ICE v2 η γενική του τιμή προσδιορίζεται περίπου στα 155 MJ/kg ενώ παρουσιάζει ποικίλα προϊόντα όπως χυτά προϊόντα, εξωθημένα και προϊόντα έλασης, τα οποία παρουσιάζουν διαφορετικές τιμές ενσωματωμένης ενέργειας λόγω των διαφορετικών ποσών ενέργειας που απαιτούνται για τη διαμόρφωση τους.



Σχήμα 41 : «Ενσωματωμένη ενέργεια διαφορετικών τύπων αλουμινίου

Ωστόσο, είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι η τιμή του αλουμινίου μπορεί να μειωθεί αισθητά όταν το υλικό ανακυκλωθεί και επαναχρησιμοποιηθεί. Σύμφωνα με πίνακες από την ICE v2 παρατηρούμε ότι η τιμή του ανακυκλωμένου αλουμινίου μειώθηκε στα 29 MJ/kg, ποσό σημαντικά χαμηλότερο από το αρχικό. Η μείωση γίνεται περισσότερο αντιληπτή παραθέτοντας το σχήμα 14 όπου παρουσιάζονται οι τιμές του πρωτογενούς αλουμινίου (virgin), του ανακυκλωμένου καθώς και μια γενική τιμή που χρησιμοποιείται όταν δεν είναι γνωστή η προέλευση του υλικού. Για λόγους πληρότητας παρατίθενται και οι αντίστοιχοι πίνακες που έχουν ανακτηθεί από την ICE v2, όπου παρουσιάζονται αναλυτικά οι τιμές για κάθε προϊόν.



Σχήμα 42 : «Ενσωματωμένη ενέργεια πρωτογενούς και ανακυκλωμένου αλουμινίου»

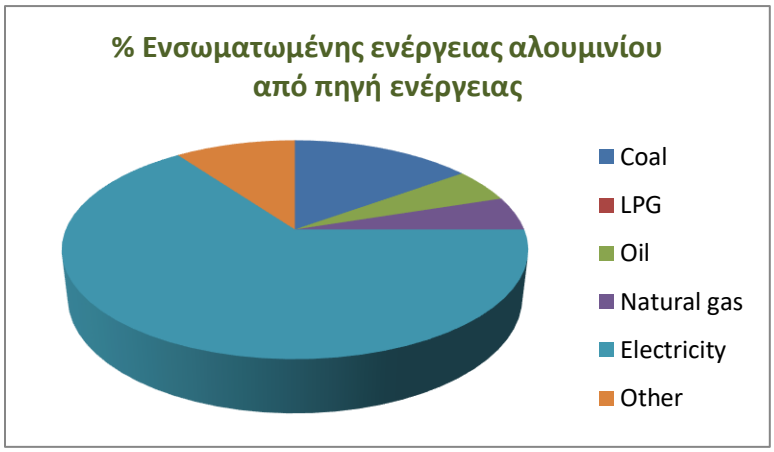
ΥΛΙΚΑ	ΕΝΣΩΜΑΤΩΜΕΝΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΚΑΙ ΑΝΘΡΑΚΑΣ			ΣΧΟΛΙΑ
	ΕΕ MJ/kg	EC $kgCO_2/kg$	EC – (GHG) $kgCO_2e/kg$	EE = Embodied Energy, EC = Embodied Carbon
ΑΔΡΑΝΗ				
Γενικά (χαλίκι ή θρυμματισμένος βράχος)	0.083	0.0048	0.0052	Εκτιμάται από μετρημένα δεδομένα βιομηχανικής κατανάλωσης καυσίμου στο Ηνωμένο Βασίλειο.
ΑΛΟΥΜΙΝΙΟ				
Γενικό	**155**	**8.24**	**9.16**	**Αναλογία Ηνωμένου Βασιλείου: 25,6% εξωθήσεων, 55,7% έλασης και 18,7% χυτών. Παγκοσμίως μέσος όρος ανακυκλωμένου περιεχομένου 33%.**
Πρωτογενές	218	11.46	12.79	
Ανακυκλωμένο	29	1.69	1.81	
Χυτά προϊόντα	**159**	**8.28**	**9.22**	**Παγκοσμίως μέσος όρος ανακυκλωμένου περιεχομένου 33%.**
Πρωτογενές	226	11.7	13.1	
Ανακυκλωμένο	25	1.35	1.45	
Εξωθημένο	**154**	**8.16**	**9.08**	**Παγκοσμίως μέσος όρος ανακυκλωμένου περιεχομένου 33%.**
Πρωτογενές	214	11.2	12.5	
Ανακυκλωμένο	34	1.98	2.12	
Προϊόν έλασης	**155**	**8.26**	**9.18**	**Παγκοσμίως μέσος όρος ανακυκλωμένου περιεχομένου 33%.**
Πρωτογενές	217	11.5	12.8	
Ανακυκλωμένο	28	1.67	1.79	

Πίνακας 26 : «Ενσωματωμένη ενέργεια και άνθρακας αδρανών και αλουμινίου» (circularecology.com/embodied-carbon-footprint-database.html)

Οι πηγές ενέργειας για την παραγωγή αλουμινίου είναι κρίσιμες για τον προσδιορισμό των ενσωματωμένων ενεργειακών και περιβαλλοντικών επιπτώσεών, καθώς η παραγωγή του αποτελεί μια αρκετά ενεργοβόρα διαδικασία. Η ηλεκτρική ενέργεια είναι η κυρίαρχη πηγή ενέργειας στη διαδικασία τήξης αλουμινίου, ειδικά στην ηλεκτρολυτική αναγωγή της αλουμίνας σε αλουμίνιο. Η ενεργειακή ένταση αυτής της διαδικασίας είναι πολύ υψηλή και το περιβαλλοντικό της αποτύπωμα εξαρτάται σημαντικά από την πηγή ηλεκτρικής ενέργειας (άνθρακας, φυσικό αέριο, ΑΠΕ).

Η μετάβαση σε καθαρότερες πηγές ενέργειας, όπως η υδροηλεκτρική ενέργεια και άλλες ΑΠΕ, η βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης και η αύξηση των ποσοστών ανακύκλωσης μπορούν να μειώσουν σημαντικά τις ενσωματωμένες ενεργειακές και περιβαλλοντικές επιπτώσεις της παραγωγής αλουμινίου. Η κύρια μέθοδος παραγωγής αλουμινίου είναι η ηλεκτρολυτική διαδικασία, η οποία αποτελεί μια ενεργοβόρα διαδικασία. Ωστόσο η

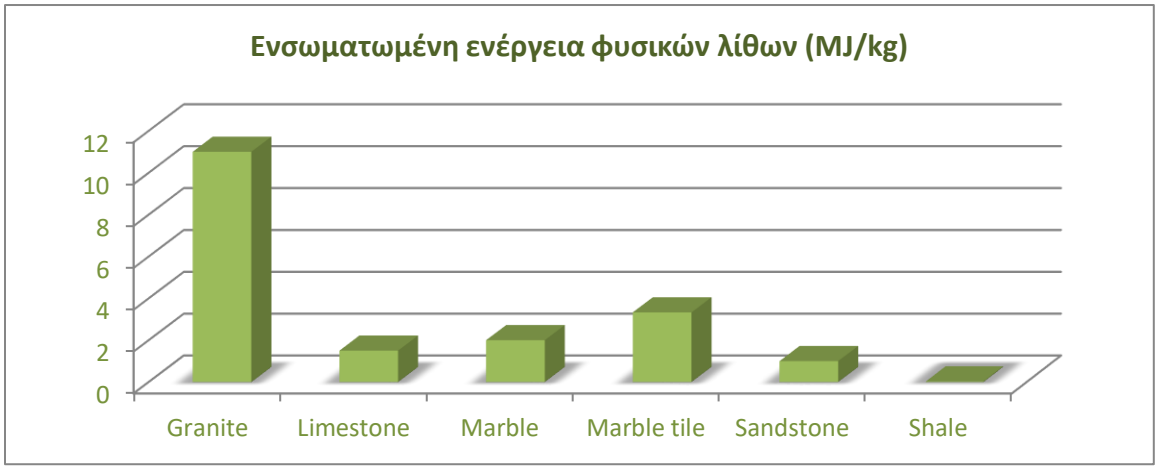
δευτερογενής παραγωγή (ανακύκλωση αλουμινίου) απαιτεί σημαντικά λιγότερη ενέργεια, κυρίως από ηλεκτρική ενέργεια, προσφέροντας μια βιώσιμη επιλογή που στηρίζεται σε ΑΠΕ.



Σχήμα 43 : «Ποσοστό ενσωματωμένης ενέργειας αλουμινίου ανάλογα με την πηγή»

4.2.4 Αξιολόγηση Ενσωματωμένης Ενέργειας Φυσικών Λίθων

Οι φυσικοί λίθοι παρουσιάζουν υψηλή θλιπτική αντοχή και μεγάλη ανθεκτικότητα στον χρόνο και στις καιρικές συνθήκες, αποτελώντας ένα από τα παλαιότερα οικοδομικά υλικά. Λίθοι όπως το μάρμαρο, ο γρανίτης και ο ασβεστόλιθος χρησιμοποιούνται ακόμη στις κατασκευές καθώς πέρα από τα παραπάνω χαρακτηριστικά, προσδίδουν επίσης ιδιαίτερη αισθητική στα κατασκευαστικά έργα.

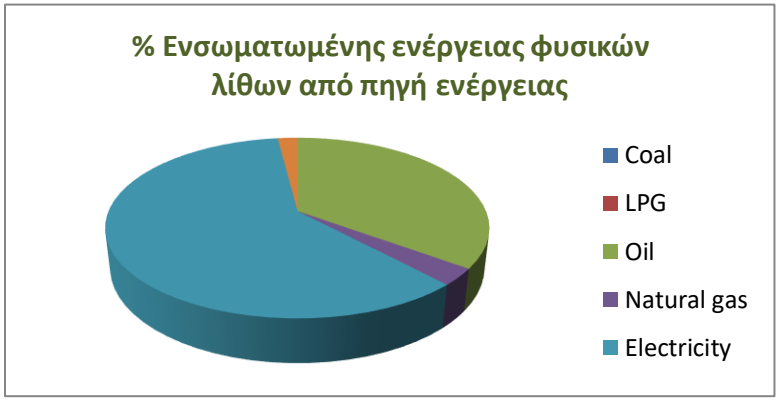


Σχήμα 44 : «Ενσωματωμένη ενέργεια φυσικών λίθων»

Το ενεργειακό περιεχόμενο τους ποικίλλει ανάλογα με το είδος του πετρώματος, με αποτέλεσμα να υπάρχουν λίθοι όπως ο γρανίτης με ενσωματωμένη ενέργεια άνω των 10 MJ/kg

και άλλοι όπως ο ασβεστόλιθος και ο σχιστόλιθος με τιμές λίγο πάνω από την μονάδα. Αυτή η διαφοροποίηση των τιμών οφείλεται κατά κύριο λόγο στην διαδικασία εξόρυξης και επεξεργασίας που ακολουθείται για το κάθε πέτρωμα ξεχωριστά.

Σύμφωνα με το παρακάτω γράφημα το μεγαλύτερο ποσοστό της τιμής της ενσωματωμένης ενέργειας των φυσικών λίθων προέρχεται κυρίως από την χρήση μηχανημάτων που χρησιμοποιούνται για κοπή, διαμόρφωση και στίλβωση των λίθων, τα οποία τροφοδοτούνται με ηλεκτρική ενέργεια, η οποία παράγεται είτε από καύση άνθρακα ή από ΑΠΕ. Επιπρόσθετα, ένα μεγάλο ποσοστό της ενσωματωμένης ενέργειας οφείλεται σε καύσιμα ντίζελ που χρησιμοποιούνται σε βαρέα μηχανήματα (εκσκαφείς, φορτηγά) για την εξόρυξη και τη μεταφορά των λίθων από τα λατομεία στις εργοστασιακές μονάδες. Τέλος, σε μικρότερα ποσοστά συνεισφοράς συναντάται το φυσικό αέριο το οποίο χρησιμοποιείται ενίοτε στα στάδια ξήρανσης και θερμικής επεξεργασίας ορισμένων τύπων πετρωμάτων, ενώ τα τελευταία χρόνια παρατηρείται αύξηση της ένταξης των ΑΠΕ (αιολική και υδροηλεκτρική ενέργεια) που χρησιμοποιούνται για την λειτουργία του βιομηχανικού εξοπλισμού μειώνοντας κατά αυτό τον τρόπο το συνολικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα.

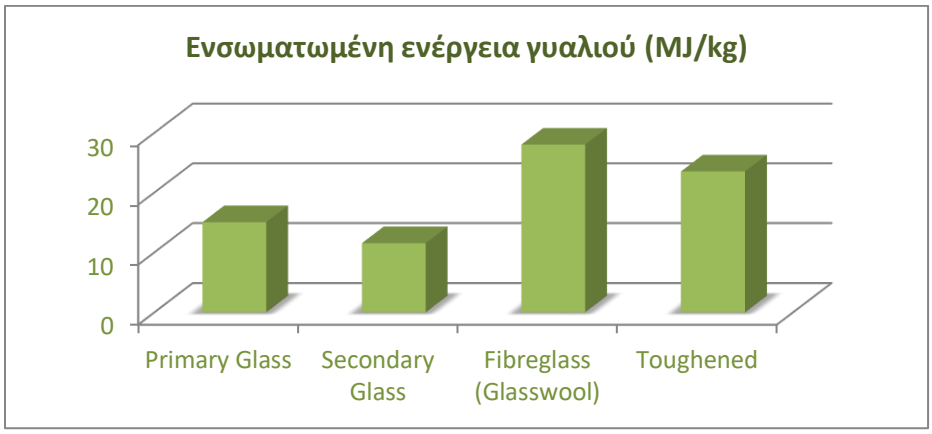


Σχήμα 45 : «Ποσοστό ενσωματωμένης ενέργειας φυσικών λίθων ανάλογα με την πηγή»

4.2.5 Αξιολόγηση Ενσωματωμένης Ενέργειας Γυαλιού

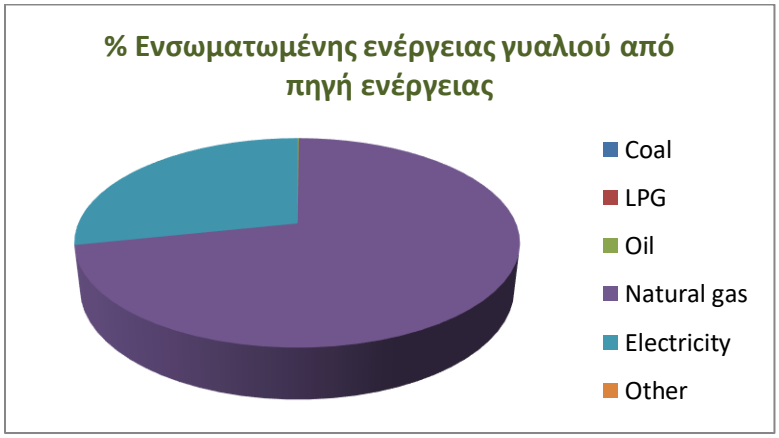
Το γυαλί αποτελεί ένα δομικό υλικό που χρησιμοποιείται κυρίως σε παράθυρα, προσόψεις και πόρτες προσδίδοντας στις κατασκευές υψηλή αισθητική. Η χρήση γυαλιού ενισχύει τον φυσικό φωτισμό στα κτίρια και συμβάλλει στην ενεργειακή απόδοση του κτιρίου, μειώνοντας την ανάγκη για θέρμανση και τεχνητό φωτισμό.

Σύμφωνα με την ICE v2 διακρίνονται τέσσερεις κύριοι τύποι γυαλιού: το πρωτεύων, το δευτερεύων, ο υαλοβάμβακας και το σκληρυμένο γυαλί. Η ενσωματωμένη ενέργεια για το πρωτεύων γυαλί κυμαίνεται περίπου στα 15 MJ/kg, ενώ για το δευτερεύων γυαλί η τιμή είναι μικρότερη (11 MJ/kg). Όσον αφορά τα σκληρυμένα γυαλιά και τους υαλοβάμβακες, μπορεί να διακριθεί εύκολα από το παρακάτω ιστόγραμμα ότι το ενεργειακό τους περιεχόμενο είναι σχεδόν διπλάσιο, κάτι που οφείλεται κυρίως στην βιομηχανική επεξεργασία που υπόκεινται.



Σχήμα 46 : «Ενσωματωμένη ενέργεια διαφορετικών τύπου γυαλιού»

Γενικά, το γυαλί αποτελεί ένα ενεργοβόρο υλικό, το οποίο ωστόσο δύναται να ανακυκλωθεί και να μειώσει σημαντικά την ενσωματωμένη ενέργεια του. Σύμφωνα με το παρακάτω γράφημα η ενέργεια του γυαλιού προέρχεται κυρίως από τη χρήση φυσικού αερίου και ηλεκτρισμού που χρησιμοποιούνται για την επεξεργασία των πρώτων υλών και την τελική διαμόρφωση του υλικού σε εμπορικά προϊόντα.



Σχήμα 47 : «Ποσοστό ενσωματωμένης ενέργειας γυαλιού ανάλογα με την πηγή»

4.2.6 Αξιολόγηση Ενσωματωμένης Ενέργειας Πολυμερών

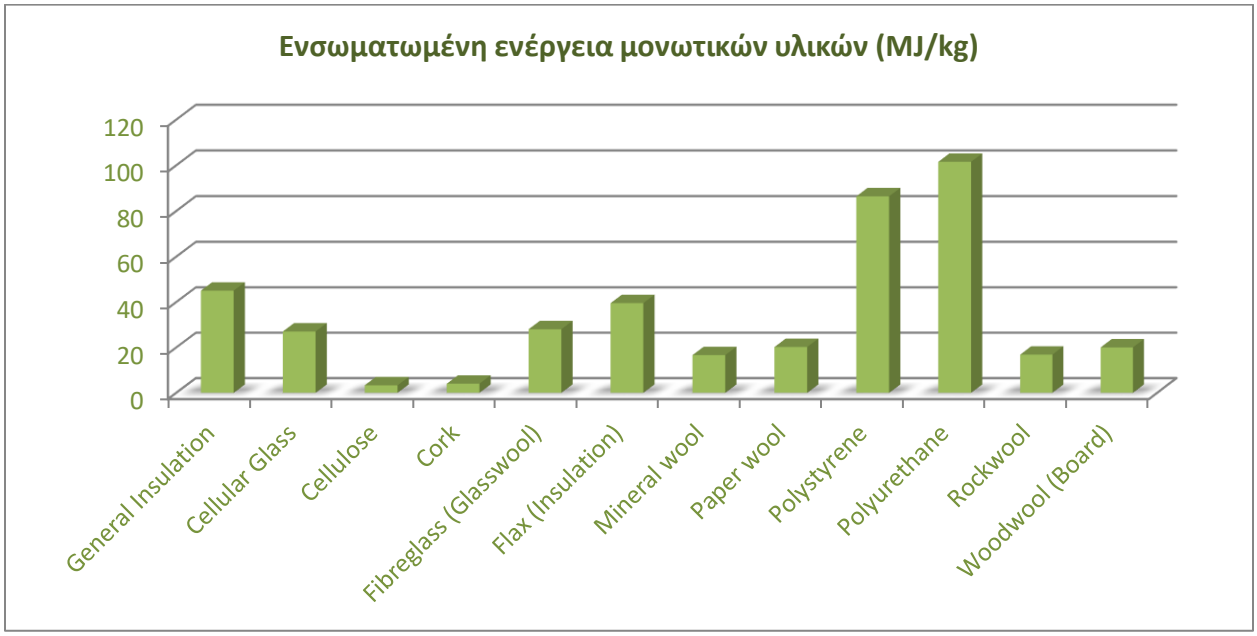
Τα πολυμερή, που συνήθως αναφέρονται στη βιβλιογραφία και ως πλαστικά, είναι συνθετικά υλικά που παράγονται κυρίως από πετροχημικές πρώτες ύλες, οι οποίες προέρχονται από ορυκτά καύσιμα. Η ενσωματωμένη ενέργεια στα πολυμερή αναφέρεται στη συνολική ποσότητα ενέργειας που απαιτείται για την εξαγωγή πρώτων υλών, την επεξεργασία τους σε πολυμερή και την παραγωγή των τελικών πλαστικών προϊόντων. Αυτή η ενέργεια περιλαμβάνει τόσο το ενεργειακό περιεχόμενο των πρώτων υλών (feedstock energy) όσο και την ενέργεια που καταναλώνεται κατά τις διαδικασίες παραγωγής.

ΥΛΙΚΑ	ΕΝΣΩΜΑΤΩΜΕΝΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΚΑΙ ΑΝΘΡΑΚΑΣ			ΣΧΟΛΙΑ
	ΕΕ - MJ/kg	EC - $kgCO_2/kg$	EC – (GHG) $kgCO_2e/kg$	EE = Embodied Energy, EC = Embodied Carbon
ΠΟΛΥΜΕΡΗ				
General	80.5	2.73	3.31	35.6 MJ/kg ενεργειακό περιεχόμενο πρώτων υλών. Καθορίζεται από τη μέση χρήση κάθε τύπου πλαστικού που χρησιμοποιείται στην ευρωπαϊκή κατασκευαστική βιομηχανία.
ABS	95.3	3.05	3.76	48.6 MJ/kg ενεργειακό περιεχόμενο πρώτων υλών.
Γενικό πολυαιθυλένιο	83.1	2.04	2.54	54.4 MJ/kg ενεργειακό περιεχόμενο πρώτων υλών. Με βάση τη μέση κατανάλωση τύπων πολυαιθυλενίου στην ευρωπαϊκή κατασκευή
Ρητίνη πολυαιθυλενίου υψηλής πυκνότητας (HDPE).	76.7	1.57	1.93	54.3 MJ/kg ενεργειακό περιεχόμενο πρώτων υλών. Δεν περιλαμβάνει την τελική κατασκευή.
Σωλήνας HDPE	84.4	2.02	2.52	55.1 MJ/kg ενεργειακό περιεχόμενο πρώτων υλών.
Ρητίνη πολυαιθυλενίου χαμηλής πυκνότητας (HDPE).	78.1	1.69	2.08	51.6 MJ/kg ενεργειακό περιεχόμενο πρώτων υλών. Δεν περιλαμβάνει την τελική κατασκευή.
Μεμβράνη LDPE	89.3	2.13	2.6	55.2 MJ/kg ενεργειακό περιεχόμενο πρώτων υλών.
Nylon (Πολυαμίδιο) 6 Πολυμερές	120.5	5.47	9.14	38,6 MJ/kg ενεργειακό περιεχόμενο πρώτων υλών. Δεν περιλαμβάνει την τελική κατασκευή. Η Plastics Europe αναφέρει ότι τα δύο τρίτα του νάιλον χρησιμοποιούνται ως ίνες στην Ευρώπη και ότι το μεγαλύτερο μέρος του υπόλοιπου ως καλούπια έγχυσης.
Nylon (Πολυαμίδιο) 6 Πολυμερές	138.6	6.54	7.92	50.7 MJ/kg ενεργειακό περιεχόμενο πρώτων υλών. Δεν περιλαμβάνει την τελική κατασκευή.
Πολυανθρακικό	112.9	6.03	7.62	36.7 MJ/kg ενεργειακό περιεχόμενο πρώτων υλών. Δεν περιλαμβάνει την τελική κατασκευή.
Πολυπροπυλένιο, προσανατολισμένη μεμβράνη	99.2	2.97	3.43	55.7 MJ/kg ενεργειακό περιεχόμενο πρώτων υλών.
Πολυπροπυλένιο, καλούπια έγχυσης	115.1	2.55	4.49	54 MJ/kg ενεργειακό περιεχόμενο πρώτων υλών. Εάν συμπεριληφθούν τα οφέλη από τη βιομάζα, το CO2 μπορεί να μειωθεί στα 3.85 kg CO2/kg και το GWP σε 4.41 kg CO2e/kg.
Διογκωμένη πολυστερίνη	88.6	2.55	3.29	46.2 MJ/kg ενεργειακό περιεχόμενο πρώτων υλών.
Πολυστερίνη γενικής χρήσης	86.4	2.71	3.43	46.3 MJ/kg ενεργειακό περιεχόμενο πρώτων υλών.
Πολυστερίνη υψηλής πρόσκρουσης	87.4	2.76	3.42	46.4 MJ/kg ενεργειακό περιεχόμενο πρώτων υλών.
Θερμική διογκωμένη Πολυστερίνη	109.2	3.45	4.39	49.7 MJ/kg ενεργειακό περιεχόμενο πρώτων υλών.
Εύκαμπτος αφρός πολυουρεθάνης	102.1	4.06	4.84	33.47 MJ/kg ενεργειακό περιεχόμενο πρώτων υλών. Φτωχή διαθεσιμότητα δεδομένων για την ενέργεια πρώτης ύλης.
Άκαμπτος αφρός πολυουρεθάνης	101.5	3.48	4.26	37.07 MJ/kg ενεργειακό περιεχόμενο πρώτων υλών. Φτωχή διαθεσιμότητα δεδομένων για την ενέργεια πρώτης ύλης.
Γενικό PVC	77.2	2.61	3.1	28.1 MJ/kg ενεργειακό περιεχόμενο πρώτων υλών. Με βάση τη μέση κατανάλωση της αγοράς τύπων PVC στην ευρωπαϊκή κατασκευαστική βιομηχανία.

Σωλήνας PVC	67.5	2.56	3.23	24.4 MJ/kg ενεργειακό περιεχόμενο πρώτων υλών.
Φύλλο PVC	68.6	2.61	3.19	24.4 MJ/kg ενεργειακό περιεχόμενο πρώτων υλών. Εάν συμπεριληφθούν τα οφέλη από τη βιομάζα, το CO2 μπορεί να μειωθεί σε 2.56 kgCO2/kg και το GWP σε 3.15 kg CO2e/kg.
Καλούπια έγχυσης PVC	95.1	2.69	3.3	35.1 MJ/kg ενεργειακό περιεχόμενο πρώτων υλών. Εάν συμπεριληφθούν τα οφέλη από τη βιομάζα, το CO2 μπορεί να μειωθεί σε 2.23 kgCO2/kg και το GWP σε 2.84 kg CO2e/kg.
Μεμβράνη UPVC	69.4	2.57	3.16	25.3 MJ/kg ενεργειακό περιεχόμενο πρώτων υλών.

Πίνακας 27 : «Ενσωματωμένη ενέργεια και άνθρακας διάφορων τύπων πολυμερών» (circularecology.com/embodied-carbon-footprint-database.html)

Η παραγωγή πολυμερών είναι ενεργοβόρα λόγω των υψηλών θερμοκρασιών και πιέσεων που απαιτούνται σε διαδικασίες όπως η πυρόλυση και ο πολυμερισμός. Το μεγαλύτερο μέρος της ενσωματωμένης τους ενέργειας προέρχεται από πηγές ορυκτών καυσίμων (πετρέλαιο, φυσικό αέριο) καθιστώντας τη βιομηχανία παραγωγής πλαστικών σε σημαντικό καταναλωτή ορυκτών πόρων που συμβάλλει στις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου. Σύμφωνα με τον παραπάνω πίνακα γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι τα πολυμερή αποτελούν ενεργοβόρα υλικά, όπου σε αρκετές περιπτώσεις εμφανίζουν τιμές υψηλότερες και από τα μέταλλα.



Σχήμα 48 : «Ενσωματωμένη ενέργεια μονωτικών υλικών»

Στην παρούσα έκθεση γίνεται αναφορά κυρίως στα δομικά υλικά που χρησιμοποιούνται στις κατασκευές και συνεπώς κρίνεται σκόπιμο να παρουσιαστεί το ενεργειακό περιεχόμενο των θερμομονωτικών υλικών που τοποθετούνται στα κτίρια, όπως αυτό φαίνεται στο ακόλουθο γράφημα. Γίνεται εύκολα διακριτό από τον άνωθεν διάγραμμα ότι υλικά που δεν βασίζονται

κατά κύριο λόγο σε πολυμερή εμφανίζουν μικρότερες τιμές ενσωματωμένης ενέργειας, σε αντίθεση με υλικά που έχουν πολυμερή όπως η πολυστερίνη και η πολυουρεθάνη. Για παράδειγμα, ο πετροβάμβακας και ο υαλοβάμβακας διαθέτουν 17 MJ/kg και 28 MJ/kg αντίστοιχα, ποσά αρκετά μικρότερα από εκείνα της πολυστερίνης (86 MJ/kg) και της πολυουρεθάνης (101 MJ/kg).

Βέβαια, αξίζει να σημειωθεί ότι τα συγκεκριμένα υλικά έχουν εξαιρετικές θερμομονωτικές ιδιότητες καθώς βελτιώνουν την ενεργειακή απόδοση του κτιρίου και τοποθετούνται σε μικρές ποσότητες σε μια κατασκευή συγκριτικά με τα υπόλοιπα δομικά υλικά. Η στροφή προς τη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην παραγωγή πολυμερών, μαζί με τα αυξημένα ποσοστά ανακύκλωσης, είναι ζωτικής σημασίας για τη μείωση του συνολικού ενεργειακού αποτυπώματος και των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των πολυμερών. Η βέλτιστη κατανομή των πηγών ενέργειας στην παραγωγή πολυμερών είναι το κλειδί για τον εντοπισμό ευκαιριών βελτίωσης της ενεργειακής απόδοσης και μείωσης των συνολικών εκπομπών.

4.2.7 Αξιολόγηση Ενσωματωμένης Ενέργειας Κεραμικών

Η ενσωματωμένη ενέργεια στα κεραμικά αναφέρεται στη συνολική ενέργεια που χρησιμοποιείται σε όλο τον κύκλο ζωής των κεραμικών προϊόντων, από την εξόρυξη πρώτων υλών έως την παραγωγή και το φινίρισμα. Αυτή η κατανάλωση ενέργειας οφείλεται κυρίως σε ενεργειακά δαπανηρές διαδικασίες έκλυσης υψηλών θερμοκρασιών που απαιτούνται για τη διαμόρφωση των κεραμικών προϊόντων. Η παραγωγή κεραμικών περιλαμβάνει ψήσιμο σε υψηλή θερμοκρασία (συχνά πάνω από 1000°C), η οποία είναι απαραίτητη για τη σκλήρυνση και την υαλοποίηση του πηλού και άλλων πρώτων υλών. Αυτή η διαδικασία απαιτεί σημαντική εισροή ενέργειας, η οποία συμβάλλει σημαντικά στην ενσωματωμένη ενέργεια.

Η πηγή ενέργειας και η αναλογία της στο ενσωματωμένο ενεργειακό μείγμα μπορεί να ποικίλλει σημαντικά ανάλογα με τη γεωγραφική θέση, τη διαθεσιμότητα των φυσικών πόρων και τις τοπικές ενεργειακές πολιτικές. Για παράδειγμα, περιοχές πλούσιες σε φυσικό αέριο τείνουν να χρησιμοποιούν περισσότερους κλιβάνους αερίου, ενώ άλλες μπορεί να βασίζονται περισσότερο στην καύση άνθρακα ή στην κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας. Στον ακόλουθο πίνακα διακρίνονται οι τυπικές τιμές ενσωματωμένης ενέργειας των κεραμικών προϊόντων σύμφωνα με την βάση δεδομένων ICE v2. Παρατηρείται ότι τα τούβλα παρουσιάζουν μια τιμή

της τάξης των 3 MJ/kg (διπλάσια από εκείνη των τούβλων από σκυρόδεμα) ενώ άλλα προϊόντα όπως τα πλακίδια και τα προϊόντα υγιεινής εμφανίζουν υψηλότερες τιμές (6.5-12 MJ/kg και 29 MJ/kg αντίστοιχα).

ΥΛΙΚΑ	ΕΝΣΩΜΑΤΩΜΕΝΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΚΑΙ ΑΝΘΡΑΚΑΣ			ΣΧΟΛΙΑ
	EE - MJ/kg	EC - $kgCO_2/kg$	EC – (GHG) $kgCO_2e/kg$	EE = Embodied Energy, EC = Embodied Carbon
ΚΕΡΑΜΙΚΑ				
Γενικά	10	0.66	0.7	Πολύ μεγάλο εύρος δεδομένων, δύσκολο να επιλεγούν τιμές για γενικά κεραμικά.
Εξαρτήματα	20	1.07	1.14	
Είδη Υγιεινής	29	1.51	1.61	Περιορισμένα δεδομένα.
Πλακάκια και Πάνελ Επένδυσης	12	0.74	0.78	Δύσκολη επιλογή, μεγάλο εύρος, περιορισμένα δεδομένα.
ΠΗΛΟΣ				
Γενικά	3	0.23	0.24	Γενικά προϊόντα από απλό ψημένο πηλό (τερακότα και τούβλα).
Πλακάκια	6.5	0.45	0.48	
Υαλοποιημένος πήλινος σωλήνας DN 100 & DN 150	6.2	0.44	0.46	
Υαλοποιημένος πήλινος σωλήνας DN 200 & DN 300	7	0.48	0.5	
Υαλοποιημένος πήλινος σωλήνας DN 500	7.9	0.52	0.55	

Πίνακας 28 : «Ενσωματωμένη ενέργεια και άνθρακας διάφορων τύπων κεραμικών» (circularecology.com/embodied-carbon-footprint-database.html)

4.2.8 Αξιολόγηση Ενσωματωμένης Ενέργειας Ξυλείας

Η ενσωματωμένη ενέργεια σε ξυλεία αναφέρεται στη συνολική ενέργεια που απαιτείται για τη συγκομιδή, την επεξεργασία, τη μεταφορά και την κατασκευή προϊόντων ξύλου. Το ξύλο αποτελεί ένα υλικό χαμηλής ενσωματωμένης ενέργειας σε σύγκριση με άλλα δομικά υλικά όπως ο χάλυβας, το σκυρόδεμα και τα κεραμικά. Ωστόσο, η ενσωματωμένη ενέργεια της ξυλείας δεν είναι μηδενική, καθώς περιλαμβάνει κάποια στάδια επεξεργασίας πριν αποκτήσει την τελική του μορφή. Σύμφωνα με την βιβλιογραφία, η ενσωματωμένη ενέργεια για την ξυλεία κυμαίνεται γενικά μεταξύ 0.5 MJ/kg και 11 MJ/kg, και η διακύμανση στην τιμή εξαρτάται από παράγοντες όπως το είδος του ξύλου και τις μεθόδους ξήρανσης κι επεξεργασίας που χρησιμοποιούνται.

Μια σημαντική πτυχή της ξυλείας είναι η ικανότητά της να δεσμεύει άνθρακα, καθώς τα δέντρα απορροφούν CO_2 από την ατμόσφαιρα και ο άνθρακας αποθηκεύεται στο ξύλο ακόμα και μετά τη συγκομιδή του και τη χρήση του στην κατασκευή. Αυτό καθιστά την ξυλεία μια

ιδιαίτερα βιώσιμη επιλογή, ιδιαίτερα εάν προέρχεται από δάση με βιώσιμες πρακτικές συγκομιδής. Η κύρια πηγή ενέργειας της ξυλείας προέρχεται από την ηλεκτρική ενέργεια και το φυσικό αέριο, που χρησιμοποιούνται στις διαδικασίες άλεσης και ξήρανσης. Το ντίζελ και άλλα ορυκτά καύσιμα συμβάλλουν επίσης λόγω του ρόλου τους στη συγκομιδή και τη μεταφορά.

Στον ακόλουθο πίνακα δίνονται οι τιμές της ενσωματωμένης ενέργειας και άνθρακα της δομικής ξυλείας σύμφωνα με τη ICE v2, όπου παρατηρούνται σχετικά μεγάλες τιμές. Αυτό συμβαίνει γιατί δεν συμπεριλαμβάνεται η Calorific value (η ποσότητα θερμικής ενέργειας που υπάρχει στα καύσιμα και καθορίζεται από την πλήρη καύση καθορισμένης ποσότητας σε σταθερή πίεση και σε κανονικές συνθήκες) και η αποθήκευση άνθρακα. Συνεπώς, για πιο ασφαλή συμπεράσματα σχετικά με το ενεργειακό περιεχόμενο της ξυλείας, πρέπει να μελετηθεί ο ενσωματωμένος άνθρακας των υλικών, κάτι το οποίο θα γίνει στην ακόλουθη ενότητα όπου θα γίνει αξιολόγηση της πιο πρόσφατης βάσης δεδομένων ICE v3.

ΥΛΙΚΑ	ΕΝΣΩΜΑΤΩΜΕΝΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΚΑΙ ΑΝΘΡΑΚΑΣ			ΣΧΟΛΙΑ
	EE - MJ/kg	EC - $kgCO_2/kg$	EC – (GHG) $kgCO_2e/kg$	EE = Embodied Energy, EC = Embodied Carbon
ΞΥΛΕΙΑ				
Γενικό	10	$0.30_{fos}+0.41_{bio}$	$0.31_{fos}+0.41_{bio}$	Εκτιμάται από το μείγμα κατανάλωσης προϊόντων ξυλείας στο Ηνωμένο Βασίλειο το 2007 (Στατιστικά στοιχεία της Ομοσπονδίας Εμπορίου ξυλείας). Περιλαμβάνει βιοενέργεια 4.3 MJ. Όλες οι τιμές δεν περιλαμβάνουν τη θερμιδική αξία της ξυλείας και αποκλείουν την αποθήκευση άνθρακα.
Πλαστικοποιημένη ξυλεία	12	$0.39_{fos}+0.45_{bio}$	$0.42_{fos}+0.45_{bio}$	Περιλαμβάνει βιοενέργεια 4.9 MJ
Χαρτοσανίδα	16	$0.54_{fos}+0.51_{bio}$	$0.58_{fos}+0.51_{bio}$	Η σκληρή σανίδα είναι ένας τύπος ινοσανίδας με πυκνότητα άνω των 800 kg/m3. Περιλαμβάνει βιοενέργεια 5.6 MJ.
Ξυλεία από πλαστικοποιημένο καπλαμά	9.5	$0.31_{fos}+0.32_{bio}$	$0.33_{fos}+0.32_{bio}$	Περιλαμβάνει βιοενέργεια 3.5 MJ
MDF	11	$0.37_{fos}+0.35_{bio}$	$0.39_{fos}+0.35_{bio}$	Ευρύ φάσμα πυκνότητας (350-800 kg/m3). Περιλαμβάνει βιοενέργεια 3.8 MJ.
Oriented Strand Board (OSB)	15	$0.42_{fos}+0.54_{bio}$	$0.45_{fos}+0.54_{bio}$	Περιλαμβάνει 5.9 MJ βιοενέργεια.
Μοριοσανίδα	14.5	$0.52_{fos}+0.32_{bio}$	$0.54_{fos}+0.32_{bio}$	Πολύ μεγάλο εύρος δεδομένων, δύσκολη η επιλογή κατάλληλων τιμών. Περιλαμβάνει βιοενέργεια 3.2 MJ.
Κόντρα πλακέ	15	$0.42_{fos}+0.65_{bio}$	$0.45_{fos}+0.65_{bio}$	Περιλαμβάνει 7.1 MJ βιοενέργεια.
Πριστή σκληρή ξυλεία	10.4	$0.23_{fos} + 0.63_{bio}$	$0.24_{fos} + 0.63_{bio}$	Ήταν δύσκολο να επιλεγούν τιμές για σκληρό ξύλο. Περιλαμβάνει βιοενέργεια 6.3 MJ.
Πριστή μαλακή ξυλεία	7.4	$0.19_{fos} + 0.39_{bio}$	$0.20_{fos} + 0.39_{bio}$	Περιλαμβάνει 4.2 MJ βιοενέργεια.

Πίνακας 29 : «Ενσωματωμένη ενέργεια και άνθρακας διάφορων τύπων δομικής ξυλείας» (circularecology.com/embodied-carbon-footprint-database.html)

Συνολικά, η σχετικά χαμηλή ενσωματωμένη ενέργεια του ξύλου, σε συνδυασμό με την ικανότητά του να αποθηκεύει άνθρακα, το καθιστά προτιμώμενο υλικό στις βιώσιμες πρακτικές δόμησης, ειδικά όταν προέρχεται από υπεύθυνη πηγή.

4.3 Αξιολόγηση Ενσωματωμένου Άνθρακα (ICE v3)

Σύμφωνα με έκθεση του World Green Building Council, η παραγωγή οικοδομικών υλικών και οι κατασκευαστικές δραστηριότητες ευθύνονται για το ένα τέταρτο των παγκόσμιων GHGs, προκαλώντας σημαντικές περιβαλλοντικές προκλήσεις σε παγκόσμια κλίμακα. Τα αποτελέσματα της έρευνας έδειξαν ότι η ενσωματωμένη ενέργεια των δομικών υλικών αντιπροσώπευε το 50-60% της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας του κτιρίου κατά τη διάρκεια ζωής του. Ως συνέπεια των παραπάνω, η μείωση των ενσωματωμένων ενεργειακών μεγεθών των δομικών υλικών καθώς και ο περιορισμός των εκπομπών άνθρακα των κατασκευαστικών δραστηριοτήτων είναι επιτακτικά για την επίτευξη βιωσιμότητας στον κατασκευαστικό τομέα.

Στην παρούσα ενότητα θα μελετηθούν και θα αξιολογηθούν οι τιμές του ενσωματωμένου άνθρακα των δομικών υλικών σύμφωνα με τα δοθείσα δεδομένα από την ICE v3 database (www.circularecology.com/embodied-energy-and-carbon-footprint-database.html). Η τελευταία έκδοση της βάσης δεδομένων ICE, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, εστιάζει στις συνολικές εκπομπές άνθρακα των υλικών λόγω της άμεσης σχέσης του άνθρακα με τον μετριασμό της κλιματικής αλλαγής, της καλύτερης διαθεσιμότητας δεδομένων και της στροφής των αναγκών των χρηστών προς μετρήσεις που σχετίζονται με το αποτύπωμα του άνθρακα. Επομένως, για μια πληρέστερη και πιο σφαιρική εικόνα του ενεργειακού περιεχομένου των δομικών υλικών θα χρησιμοποιηθούν πίνακες και διαγράμματα ενσωματωμένου άνθρακα σύμφωνα με την τελευταία έκδοση δεδομένων ICE που ακολουθεί τη διαδρομή cradle to gate.

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι η διαδρομή cradle to gate δεν περιλαμβάνει σημαντικό μέρος της ζωής ενός δομικού υλικού. Σε μια πλήρη ανάλυση θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψιν τόσο η χρήση των υλικών μετά το τέλος ζωής τους όσο και η ποσότητα των οικοδομικών απορριμμάτων, καθώς οι δυο αυτοί παράγοντες επηρεάζουν σημαντικά τις τιμές της ενσωματωμένης ενέργειας και άνθρακα. Το τέλος του κύκλου ζωής βασίζεται σε υποθέσεις σχετικά με τη διαδρομή διάθεσης, όπως η υγειονομική ταφή, η επαναχρησιμοποίηση ή η ανακύκλωση. Ωστόσο, είναι δύσκολο να αποσαφηνιστεί εκ των προτέρων τι θα συμβεί στο τέλος της ζωής ενός υλικού και για αυτό θα πρέπει να χρησιμοποιούνται σενάρια με ανάλυση ευαισθησίας. Τέλος, είναι ωφέλιμο να παρέχονται οι κατάλληλες πληροφορίες μέσω EPDs για τις επιπτώσεις εγκατάστασης, χρήσης και του τέλους ζωής των υλικών από διαπιστευμένους φορείς.

4.3.1 Αξιολόγηση Ενσωματωμένου Άνθρακα Αδρανών

Τα αδρανή αναφέρονται σε υλικά όπως η άμμος, το χαλίκι και η θρυμματισμένη πέτρα, που χρησιμοποιούνται ιδιαίτερα για την παραγωγή σύνθετων υλικών όπως το σκυρόδεμα, η βάση και η υπόβαση οδών και τα ασφαλτικά. Η περιβαλλοντική τους επίπτωση θεωρείται χαμηλότερη σε σύγκριση με άλλα υλικά, κυρίως λόγω της υψηλής διαθεσιμότητάς τους και των χαμηλότερων απαιτήσεων βιομηχανικής επεξεργασίας. Οι σημαντικότεροι παράγοντες που επηρεάζουν τον ενσωματωμένο άνθρακα των αδρανών είναι η πηγή των υλικών, η απόσταση μεταφοράς, οι απαιτήσεις επεξεργασίας και το περιεχόμενο ποσοστό ανακύκλωσης. Συνεπώς, αδρανή που ανακτώνται από τοπικές πηγές και δεν διανύουν σημαντικές αποστάσεις εμφανίζουν μικρότερες τιμές ενσωματωμένου άνθρακα. Τουναντίον, τα αδρανή που απαιτούν εκτεταμένες μορφές επεξεργασίας και παρουσιάζουν μεγάλες αποστάσεις μεταφοράς έχουν υψηλότερα επίπεδα ενσωματωμένου άνθρακα.

Στους παρακάτω πίνακες γίνεται διαχωρισμός των αδρανών ανάλογα με την σύσταση τους, την ενσωμάτωση ή μη ανακυκλωμένων αδρανών και με τις μεθόδους επεξεργασίας που ακολουθήθηκαν. Η τιμή του μείγματος αδρανών και άμμου, όπου χρησιμοποιούνται τόσο χερσαία (64.2%) όσο και θαλάσσια αδρανή (8.3%) αλλά και ανακυκλώσιμα – δευτερεύοντα (27.5%), κυμαίνεται περίπου στα 0.0075 kg CO2e/kg. Η συγκεκριμένη τιμή του ενσωματωμένου άνθρακα των αδρανών είναι αρκετά χαμηλή αλλά δύναται να μειωθεί επιπλέον αν δεν συμπεριληφθούν δευτερεύοντα ή ανακυκλωμένα αδρανή στο μείγμα καθώς εκείνα έχουν υποστεί επεξεργασία για να επαναχρησιμοποιηθούν. Σε αυτήν την περίπτωση όπου χρησιμοποιούνται μόνο αδρανή που δεν έχουν υποστεί επεξεργασία, ο ενσωματωμένος άνθρακας δύναται να λάβει τιμές κοντά στα 0.0045 kg CO2e/kg. Επομένως, τα φυσικά αδρανή παρουσιάζουν ενσωματωμένο άνθρακα που κυμαίνεται από 0.004 έως και 0.01 kg CO2e/kg

Σε αντίθετη περίπτωση όπου χρησιμοποιούνται φυσικά αδρανή θρυμματισμένης πέτρας (π.χ. γρανίτης, ασβεστόλιθος) η τιμή του ενσωματωμένου άνθρακα λαμβάνει ελαφρώς μεγαλύτερες τιμές που κυμαίνονται από 0.008 έως και 0.013 kg CO2e/kg. Αυτό συμβαίνει γιατί τα συγκεκριμένα αδρανή χρειάζονται επιπλέον επεξεργασία λόγω σύνθλιψης και κοσκινίσματος. Παράλληλα, τα ανακυκλωμένα αδρανή αν και παρουσιάζουν ελαφρώς μεγαλύτερη ενσωματωμένη ενέργεια από τα φυσικά αδρανή, αποτελούν συνολικά μια πιο βιώσιμη επιλογή καθώς εκτρέπουν τα απόβλητα από τους χώρους υγειονομικής ταφής και μειώνουν την ανάγκη

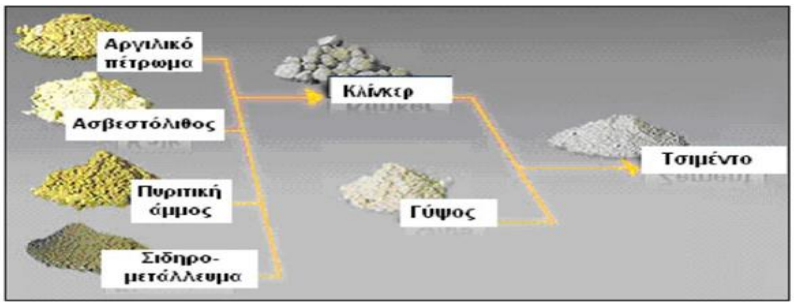
για εξόρυξη παρθένων υλικών. Ο ενσωματωμένος άνθρακας αυτής της κατηγορίας αδρανών προσδιορίζεται μεταξύ 0.006 – 0.014 kg CO2e/kg. Σημαντικό είναι δε να σημειωθεί ότι η θερμική επεξεργασία των ανακυκλωμένων αδρανών από απόβλητα κατασκευών και κατεδαφίσεων συμβάλλει σημαντικά στην αύξηση των εκπομπών άνθρακα του υλικού. Τέλος, μια ακόμη κατηγόρια αδρανών που παρουσιάζουν υψηλότερες τιμές από τα φυσικά αδρανή αποτελούν τα ελαφριά αδρανή (π.χ. διογκωμένη άργιλος, σχιστόλιθος) που κυμαίνεται από 0.1 έως 0.4 kg CO2e/kg λόγω των ενεργοβόρων διεργασιών που απαιτούνται για τη δημιουργία ελαφριάς δομής.

ΥΛΙΚΑ	Ενσωματωμένο CO_2 - kgCO2e/kg	ΣΧΟΛΙΑ
Αδρανή και άμμος, γενικό μείγμα χερσαίων και θαλάσσιων αδρανών, δευτερευόντων και ανακυκλωμένων, χύμα, χαλαρά	**0.00747**	*Αυτή είναι μια εκτίμηση του μέσου όρου της αγοράς. Μοντελοποιεί ένα μείγμα 64,2% γαιών, 27,5% ανακυκλωμένων και δευτερογενών και 8,3% θαλάσσιων αδρανών. Αυτά τα αποτελέσματα είναι ευαίσθητα στον ενσωματωμένο άνθρακα των δευτερογενών αδρανών, που είναι ένα υλικό όπου τα δεδομένα θα ωφεληθούν από τη βελτίωση.*
Αδρανή και άμμος, γενικό παρθένο μείγμα χερσαία και θαλάσσιων αδρανών, χύμα, χαλαρά	**0.00493**	*Εξαιρούνται τα ανακυκλωμένα και δευτερογενή αδρανή. Αυτό έχει μοντελοποιηθεί με 89% χερσαία και 11% θαλάσσιο αδρανή. Από το σύνολο, το 68% καταναλώνεται στην αγορά της Αγγλίας, το 11% αποστέλλεται στην αγορά της ΕΕ και το 21% χρησιμοποιείται ως αναπλήρωση.*
Αδρανή και άμμος, από παρθένα χερσαία γη, χύμα, χαλαρά	**0.00438**	*Με βάση τον στατιστικό μέσο όρο όλων των δεδομένων που συλλέχθηκαν για παρθένα συγκεντρωτικά στοιχεία στη βάση δεδομένων ICE.*
Αδρανή και άμμος, από παρθένα θαλάσσια γη, χύμα, χαλαρά	**0.00904**	*Η κατανάλωση θαλάσσιων αδρανών θεωρήθηκε ότι είναι η συνολική παραγωγή θαλάσσιων αδρανών. Τα δεδομένα έχουν μοντελοποιηθεί με τη μέση κατανάλωση ενέργειας για την εξόρυξη θαλάσσιων αδρανών.*
Αδρανή και άμμος, από ανακυκλωμένους πόρους, χωρίς θερμική επεξεργασία, χύμα, χαλαρά	**0.00610**	*Με βάση τον στατιστικό μέσο όρο όλων των δεδομένων που συλλέγονται για ανακυκλωμένα αδρανή χωρίς θερμική επεξεργασία στη βάση δεδομένων ICE. Τα ανακυκλωμένα αδρανή περιλαμβάνουν αδρανή από απόβλητα κατασκευών και κατεδαφίσεων. Δεν καλύπτει δευτερεύοντα αδρανή, όπως σκωρία υψικαμίνου ή τέφρα.*
Αδρανή και άμμος, από ανακυκλωμένους πόρους, με θερμική επεξεργασία, χύμα, χαλαρά	**0.119**	*Με βάση τον στατιστικό μέσο όρο όλων των δεδομένων που συλλέγονται για ανακυκλωμένα αδρανή με θερμική επεξεργασία στη βάση δεδομένων ICE. Τα ανακυκλωμένα αδρανή περιλαμβάνουν αδρανή από απόβλητα κατασκευών και κατεδαφίσεων. Δεν καλύπτει δευτερεύοντα αδρανή όπως σκωρία υψικαμίνου ή τέφρα.*
Αδρανή και άμμος, διογκωμένη άργιλος, χύμα, χαλαρή	**0.393**	*Βάσει του στατιστικού μέσου όρου όλων των δεδομένων που συλλέχθηκαν για αδρανή διογκωμένης αργίλου στη βάση δεδομένων ICE.*
Αδρανή, διογκωμένο αφρώδες γυαλί, χύμα, χαλαρά	**0.278**	*Βάσει του στατιστικού μέσου όρου όλων των δεδομένων που συλλέχθηκαν για αδρανή διογκωμένου αφρώδους γυαλιού στη βάση δεδομένων ICE.*
Αδρανή και άμμος, από δευτερογενείς πόρους, χύμα, χαλαρά	**0.0633**	*Συμπεριλαμβανομένης της σκωρίας υψικαμίνου, της τέφρας και άλλων αδρανών που παράγονται από δευτερεύοντες πόρους.*
Αδρανή και άμμος, μείγμα ανακυκλωμένων και δευτερογενών πόρων, χύμα, χαλαρά	**0.0142**	*Το μείγμα διαμορφώθηκε με 33% δευτερογενή και 67% ανακυκλωμένα αδρανή.*

Πίνακας 30 : «Ενσωματωμένη άνθρακας αδρανών»
(circularecology.com/embodied-carbon-footprint-database.html)

4.3.2 Αξιολόγηση Ενσωματωμένου Άνθρακα Τσιμέντου

Μαζί με τα αδρανή, το τσιμέντο αποτελεί ένα πολύ σημαντικό υλικό στην σύσταση του σκυροδέματος. Το ενεργειακό περιεχόμενο καθώς και οι εκπομπές άνθρακα του υλικού εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την σύσταση του ίδιου του μείγματος του τσιμεντοπολτού. Η τιμή του ενσωματωμένου άνθρακα κυμαίνεται από 0.4 έως και 0.9 kg CO2e/kg ανάλογα με τον τύπο του τσιμέντου και την περιεκτικότητα του μείγματος σε ιπτάμενη τέφρα ή σε σκωρία υψικαμίνου (GGBS).



Εικόνα 12 : «Πρώτες ύλες για την παραγωγή τσιμέντου» (Κ. Τσακαλάκης, 2010)

Στον ακόλουθο πίνακα διακρίνουμε ότι το τσιμέντο τύπου CEM I παρουσιάζει την μέγιστη τιμή ενσωματωμένου άνθρακα (0.912 kg CO2e/kg) καθώς η σύσταση του σε κλίνκερ είναι ιδιαίτερα υψηλή. Αντίθετα, παρατηρείται ότι τα τσιμέντα κατηγορίας CEM II και CEM III με μεγαλύτερη συγκέντρωση σε ιπτάμενη τέφρα ή GGBS έναντι κλίνκερ δίνουν μικρότερες τιμές. Γίνεται εμφανές λοιπόν ότι ο ενσωματωμένος άνθρακας του τσιμέντου και κατ'επέκταση του σκυροδέματος που χρησιμοποιείται στις κατασκευές οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στο τσιμέντο που χρησιμοποιείται. Η υψηλή περιεκτικότητα του τσιμέντου σε ιπτάμενη τέφρα ή GGBS το καθιστά περισσότερο φιλικό προς το περιβάλλον καθώς χρησιμοποιούνται πρώτες ύλες που ανακτώνται με λιγότερο ενεργειακά απαιτητικές διεργασίες.

ΥΛΙΚΑ	Ενσωματωμένος άνθρακας kgCO2e/kg	ΣΧΟΛΙΑ
Γενικά (μέσος όρος Ηνωμένου Βασιλείου)	**0.832**	*Μείγμα που λαμβάνεται από τη μέση τιμή τσιμέντου του Ηνωμένου Βασιλείου. 86,1% κλίνκερ, 0,04% ggbs, 3,4% ιπτάμενη τέφρα, 4,8% γύψος, 5,1% ασβεστόλιθος, 0,56% MACs. Όλα τα παρακάτω τσιμέντα υπολογίζονται από το μοντέλο ICE Cement, Mortar, Concrete.*
CEM I, Συνηθισμένο τσιμέντο Portland (OPC)	**0.912**	*Το CEM I είναι ένα «καθαρό» τσιμέντο, το συνηθισμένο τσιμέντο Portland (OPC).*
CEM II – (Portland-σκωρία) τσιμέντο		
CEM II-A-S - 13% GGBs	**0.803**	*Αυτό το τσιμέντο επιτρέπει μεταξύ 6-20% ggbs.*
CEM II/B-S - 28% GGBs	**0.672**	*Αυτό το τσιμέντο επιτρέπει μεταξύ 21-35% ggbs.*

CEM II – (Portland – ποζολάνη) τσιμέντο		
CEM II/A-P - 13% φυσική ποζολανική τέφρα	**0.798**	*Αυτό το τσιμέντο επιτρέπει μεταξύ 6-20% φυσική ποζολανική τέφρα*
CEM II/B-P 28% φυσική ποζολανική τέφρα	**0.661**	*Αυτό το τσιμέντο επιτρέπει μεταξύ 21-35% φυσική ποζολανική τέφρα*
CEM II – (Portland - ιπτάμενη τέφρα) τσιμέντο		
CEM II/A-V - 13% πυριτική ιπτάμενη τέφρα	**0.798**	*Αυτό το τσιμέντο επιτρέπει μεταξύ 6-20% πυριτική ιπτάμενη τέφρα*
CEM II/B-V - 28% πυριτική ιπτάμενη τέφρα	**0.661**	*Αυτό το τσιμέντο επιτρέπει μεταξύ 21-35% πυριτική ιπτάμενη τέφρα*
CEM II/A-W - 13% ασβεστολιθική ιπτάμενη τέφρα	**0.798**	*Αυτό το τσιμέντο επιτρέπει μεταξύ 6-20% ασβεστολιθική ιπτάμενη τέφρα*
CEM II/B-W - 28% ασβεστολιθική ιπτάμενη τέφρα	**0.661**	*Αυτό το τσιμέντο επιτρέπει μεταξύ 21-35% ασβεστολιθική ιπτάμενη τέφρα*
CEM II – (Portland – ασβεστόλιθος) τσιμέντο		
CEM II/A-L - 13% ασβεστόλιθος	**0.799**	*Αυτό το τσιμέντο επιτρέπει μεταξύ 6-20% ασβεστόλιθο.*
CEM II/B-L- 28% ασβεστόλιθος	**0.664**	*Αυτό το τσιμέντο επιτρέπει μεταξύ 21-35% ασβεστόλιθο.*
CEM II/A-L - 13% ασβεστόλιθος	**0.799**	*Αυτό το τσιμέντο επιτρέπει μεταξύ 6-20% ασβεστόλιθο.*
CEM II/B-L - 28% ασβεστόλιθος	**0.664**	*Αυτό το τσιμέντο επιτρέπει μεταξύ 21-35% ασβεστόλιθο.*
CEM II – (Portland – σύνθετο) τσιμέντο		
CEM II/A-M - 16% αντικατάσταση τσιμέντου	**0.774**	*Αυτό το τσιμέντο επιτρέπει μεταξύ 12-20% αντικαταστάσεις τσιμέντου.*
CEM II/B-M - 28% αντικατάσταση τσιμέντου	**0.666**	*Αυτό το τσιμέντο επιτρέπει μεταξύ 21-35% αντικαταστάσεις τσιμέντου*
CEM III – Τσιμέντο υψικαμίνου		
CEM III/A - 50.5% GGBS	**0.475**	*Αυτό το τσιμέντο επιτρέπει μεταξύ 36-65% ggbs*
CEM III/B - 73% GGBS	**0.278**	*Αυτό το τσιμέντο επιτρέπει μεταξύ 66-80% ggbs*
CEM III/C - 88% GGBS	**0.147**	*Αυτό το τσιμέντο επιτρέπει μεταξύ 81-95% ggbs*
CEM IV - Ποζολανικό τσιμέντο		
CEM IV/A - 23% αντικατάσταση τσιμέντου	**0.707**	*Αυτό το τσιμέντο επιτρέπει μεταξύ 11-35% ποζολανικά υλικά*
CEM IV/B - 46% αντικατάσταση τσιμέντου	**0.501**	*Αυτό το τσιμέντο επιτρέπει μεταξύ 38-55% ποζολανικά υλικά*
CEM V – Σύνθετο τσιμέντο		
CEM V/A - 24% GGBS & 24% αντικατάσταση τσιμέντου	**0.489**	*Αυτό το τσιμέντο επιτρέπει μεταξύ 18-30% ggbs και 18-30% ποζολανικών υλικών.*
CEM V/B - 36% GGBS & 36% αντικατάσταση τσιμέντου	**0.284**	*Αυτό το τσιμέντο επιτρέπει μεταξύ 31-49% ggbs και 31-49% ποζολανικών υλικών.*

Πίνακας 31 : «Ενσωματωμένος άνθρακας διάφορων τύπων τσιμέντου» (circularecology.com/embodied-carbon-footprint-database.html)

Μάλιστα, η βάση δεδομένων ICE v3 μας δίνει τη δυνατότητα προσδιορισμού του ενσωματωμένου άνθρακα του τσιμέντου, όταν είναι γνωστή η σύσταση του υλικού σε καθαρό τσιμέντο (OPC), γύψο, τέφρα και GBBS. Για παράδειγμα, ένα τσιμέντο με περιεκτικότητα 65% σε OPC και 10% σε ιπτάμενη τέφρα και GBBS δίνει ενσωματωμένο άνθρακα 0.599 kg CO2e/kg. Αυτό που γίνεται εύκολα αντιληπτό και από τον παρακάτω πίνακα είναι πως όσο μειώνεται η ποσότητα σε καθαρό τσιμέντο τόσο μειώνεται και η συνεισφορά σε άνθρακα.

Συστατικό	Σύνθεση τσιμέντου - % βάρους	Ενσωματωμένη συνεισφορά άνθρακα - kgCO2/kg
Τσιμέντο, OPC	65.00%	0.593
GGBS	10.00%	0.004
Ιπτάμενη τέφρα	10.00%	0.001
Φυσική ποζολανική τέφρα	0.00%	-
Γύψος	7.50%	0.000
Ασβεστόλιθος	7.50%	0.001
MAC	0.00%	-
ΣΥΝΟΛΙΚΑ	100.00%	0.598
ΕΛΕΓΧΟΣ ΣΥΝΟΛΟΥ ΜΑΖΑΣ	OK	
συν Απόβλητα & πρόσθετη ενέργεια	0.00%	-
	ΕΝΣΩΜΑΤΩΜΕΝΟΣ ΑΝΘΡΑΚΑΣ - Kg CO2/kg	0.599

Πίνακας 32 : «Προσδιορισμός ενσωματωμένου άνθρακα τσιμέντου» (circularecology.com/embodied-carbon-footprint-database.html)

4.3.3 Αξιολόγηση Ενσωματωμένου Άνθρακα Σκυροδέματος

Το σκυρόδεμα, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, αποτελεί ένα μείγμα κυρίως αδρανών και τσιμέντου που χρησιμοποιείται ευρέως στα σύγχρονα κατασκευαστικά έργα. Στην ενότητα 4.2, όπου πραγματοποιήθηκε αξιολόγηση της ενσωματωμένης ενέργειας των δομικών υλικών, διαπιστώθηκε ότι το σκυρόδεμα παρουσιάζει μια από τις χαμηλότερες τιμές ενσωματωμένης ενέργειας ανάμεσα στα πιο κοινά υλικά δόμησης. Στο ίδιο μήκος κύματος με την ενσωματωμένη ενέργεια κυμαίνονται τόσο οι εκπομπές όσο και ο ενσωματωμένος άνθρακας του υλικού. Ωστόσο, είναι σκόπιμο να αναφέρουμε ότι οι τελικές εκπομπές άνθρακα του σκυροδέματος εμφανίζουν ποικιλομορφία κι εξαρτώνται από την προσδιδόμενη αντοχή του σκυροδέματος, την απόσταση μεταφοράς, την ποσότητα και το είδος των αδρανών, την περιεκτικότητα του

τσιμέντου σε κλίνκερ καθώς και από το αν πρόκειται για οπλισμένο ή μη σκυρόδεμα. Στον ακόλουθο πίνακα συγκεντρώνονται όλα τα συστατικά που ενδέχεται να έχει το σκυρόδεμα στο μείγμα του φανερώνοντας ποια εξ αυτών συνεισφέρουν περισσότερο στις εκπομπές άνθρακα.

ΥΛΙΚΑ	Ενσωματωμένος άνθρακας - KgCO2/Kg
Κλίνκερ	0.97
Γύψος	0.002536
Ασβεστόλιθος	0.01577
Αδρανή	0.00747
GGBS	0.0416
Ιπτάμενη τέφρα	0.004
Νερό	0.00034400
Πρόσθετα	1.67
MAC	0.002536
Τσιμέντο, OPC	0.912
Πρόσμικτα ασβεστόλιθου	0.01577
Φυσική ποζολανική τέφρα	0.00747
Ασβέστης, ένυδρος	0.891
Ασβέστης, Quicklime	1.136

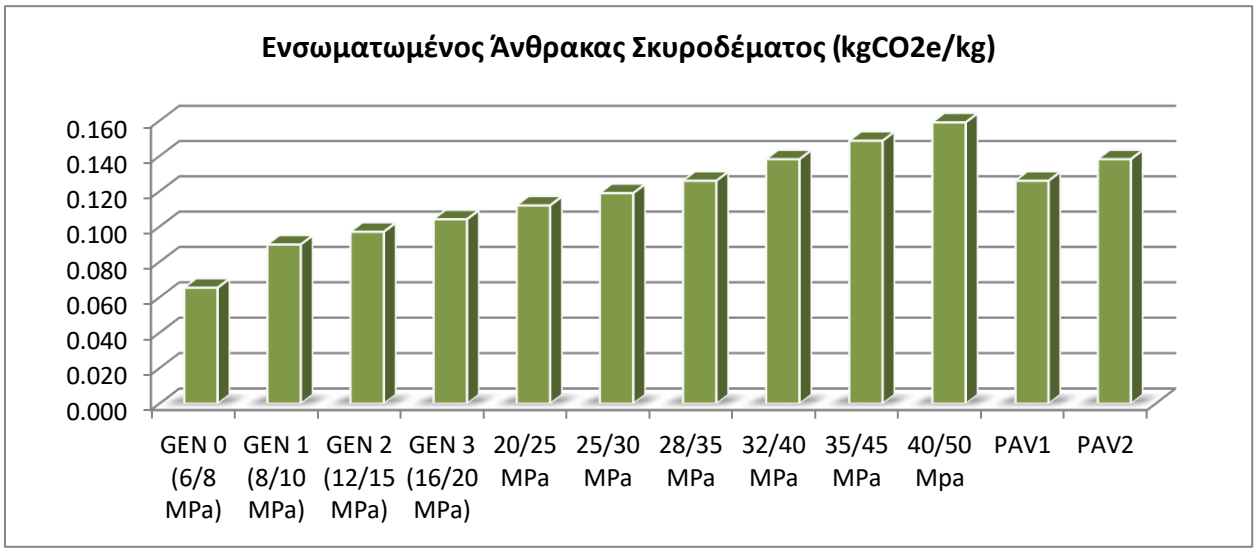
Πίνακας 33 : «Ενσωματωμένος άνθρακας συστατικών σκυροδέματος» (circularecology.com/embodied-carbon-footprint-database.html)

Παρατηρούμε ότι τα κλίνκερ και τα πρόσθετα πρόσμικτα παρουσιάζουν τις υψηλότερες τιμές ενσωματωμένου άνθρακα συνεισφέροντας σε μεγάλο βαθμό στις εκπομπές CO_2 του σκυροδέματος, παρόλο που βελτιώνουν σημαντικά τις ιδιότητες του. Παράλληλα, γίνεται αντιληπτό ότι τα υπόλοιπα στοιχεία δεν συμβάλλουν ιδιαίτερα στις εκπομπές CO_2 του υλικού.

Μεταφορά	
Προϊόν	**Άνθρακας - kgCO2e**
Μεταφορές, 33t αρθρωτές ανά τόνο.χλμ	0.1033
Μεταφορά, ανά διαδρομή 30 μιλίων	0.0050
Ανάκτηση	
Προϊόν	**Άνθρακας - kgCO2e**
Ενέργεια παρτίδας σκυροδέματος, ανά κιλό σκυροδέματος	0.0007
Προκατασκευή σκυροδέματος ανά kg προκατασκευής	0.0142
Χάλυβας	
Προϊόν	**Άνθρακας - kgCO2e**
Παγκόσμιος μέσος όρος	1.5500
Ανακυκλωμένο περιεχόμενο (Ευρώπη)	0.7300

Πίνακας 34 : «Ενσωματωμένος άνθρακας εργασιών παραγωγής σκυροδέματος» (circularecology.com/embodied-carbon-footprint-database.html)

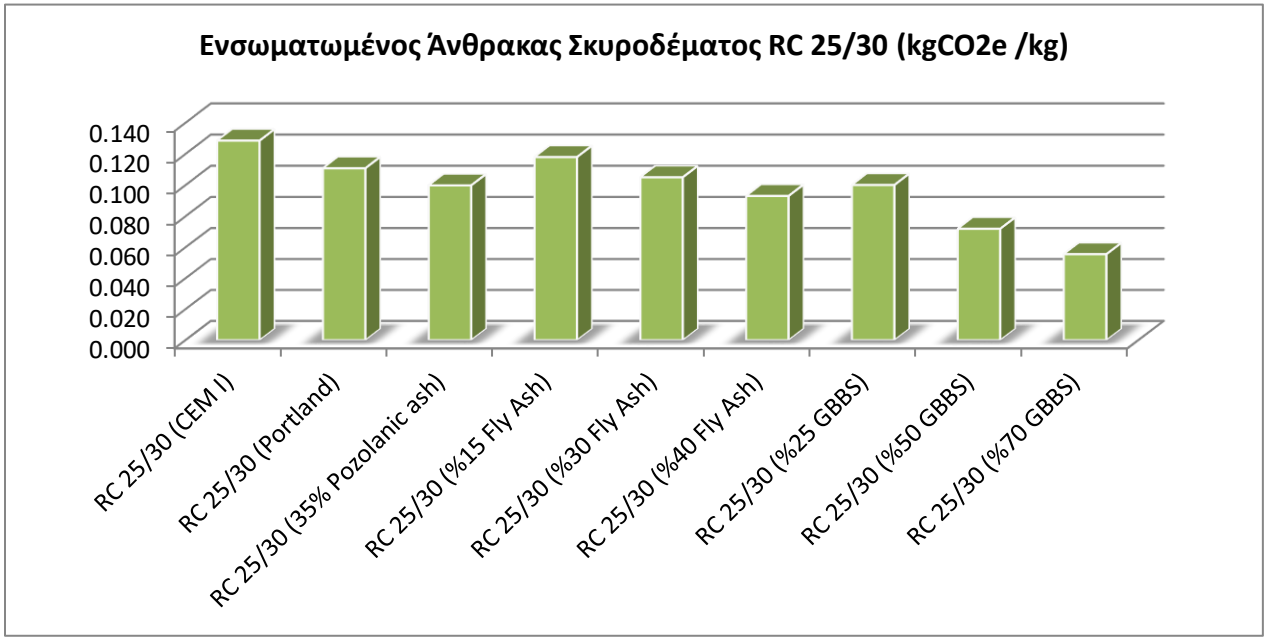
Επιπρόσθετα, πέρα από την σύσταση του σκυροδέματος, είναι σημαντικό να αναφερθούμε στο βαθμό που επηρεάζει η απόσταση μεταφοράς και η μέθοδος παρασκευής τις συνολικές εκπομπές άνθρακα. Από τον παραπάνω πίνακα διαφαίνεται ότι η μεταφορά σκυροδέματος συμβάλει με 0.005 kg CO2e/kg ανά 30 μίλια, συνεπώς η μεταφορά σε κοντινά εργοτάξια είναι επιτακτική, έτσι ώστε να μειωθούν οι συνολικές εκπομπές. Όμως, αυτό που πραγματικά συνεισφέρει σημαντικά στο ενεργειακό περιεχόμενο του σκυροδέματος, αποτελεί η ενσωμάτωση οπλισμού στο υλικό. Το οπλισμένο σκυρόδεμα έχει μοναδικές ιδιότητες που έχουν αναλυθεί εκτενώς σε προηγούμενα κεφάλαια, ωστόσο δεν πρέπει να παραληφθεί να αναφερθεί ότι ο χάλυβας αυξάνει σημαντικά τον ενσωματωμένο άνθρακα του σκυροδέματος. Η χρήση ανακυκλωμένου χάλυβα θα αποτελούσε μια ενδεχόμενη λύση στην μείωση αυτής της τιμής καθώς ο ενσωματωμένος άνθρακας θα παρουσιάζει πτώση από 1.55 σε 0.73 kg CO2e/kg.



Σχήμα 49 : «Ενσωματωμένος άνθρακας διάφορων τύπων σκυροδέματος»

Στο παραπάνω γράφημα εμφανίζονται οι τιμές ενσωματωμένου άνθρακα για διαφορετικής αντοχής σκυροδέματα, όπου διακρίνεται εύκολα ότι όσο μεγαλώνει η αντοχή του σκυροδέματος τόσο αυξάνεται και ο εκπεμπόμενος άνθρακας που συνοδεύει τις διεργασίες διαμόρφωσης του εν λόγω σκυροδέματος. Παράλληλα, ενδιαφέρον παρουσιάζει και το ακόλουθο γράφημα όπου παρουσιάζεται ένα σκυρόδεμα δεδομένης αντοχής αλλά διαφορετικής σύστασης και περιεχομένων, για να μας δείξει τις αλλαγές στην τιμή του ενσωματωμένου άνθρακα του υλικού. Συγκεκριμένα, διακρίνεται ότι το σκυρόδεμα αντοχής 25/30 MPa που εμπεριέχει τσιμέντο τύπου CEM I εμφανίζει ενσωματωμένο άνθρακα ίσο περίπου με 0.13 kg

CO2e/kg ενώ το σκυρόδεμα όπου χρησιμοποιείται τσιμέντο Portland παρουσιάζει τιμή 0.11 kg CO2e/kg. Σκυροδέματα με μικρότερες εκπομπές είναι εκείνα που έχουν στη σύσταση τους μια αξιόλογη ποσότητα τέφρας ή GBBS έναντι καθαρού τσιμέντου. Σε αυτήν την περίπτωση, οι τιμές του ενσωματωμένου άνθρακα κυμαίνονται αναλόγως με το περιεχόμενο ποσοστό από 0.056 έως και 0.09 kg CO2e/kg, ποσά σημαντικά μικρότερα από τις πρώτες δυο κατηγορίες. Βέβαια, πρέπει πάντα να εξετάζεται η δυνατότητα και ο βαθμός αλλαγής της σύστασης του σκυροδέματος καθώς επηρεάζονται άμεσα οι ιδιότητες του. Συνεπώς σε κάποια έργα ενδείκνυται η αντικατάσταση του κλίνκερ με GBBS και σε άλλα όχι.



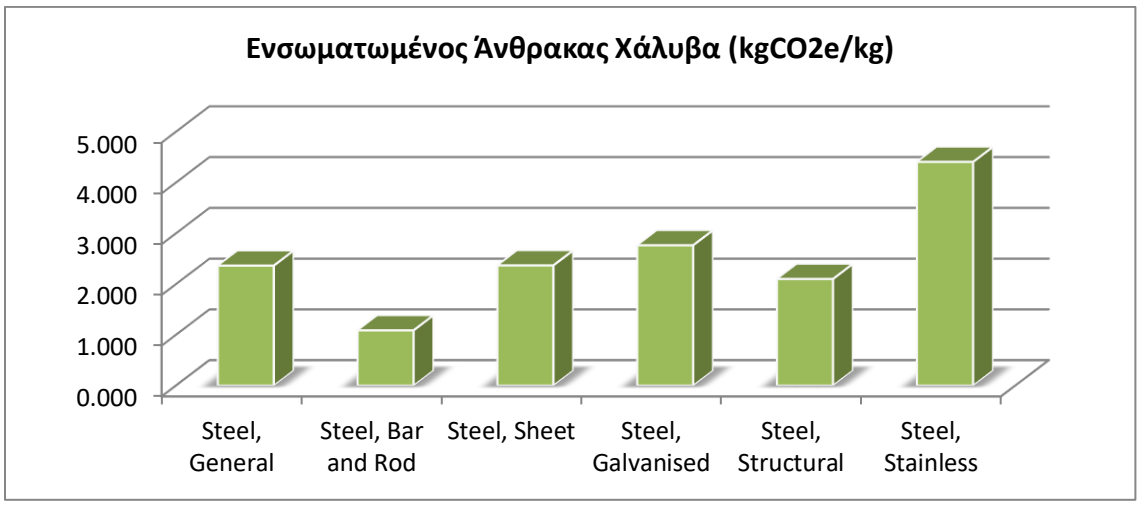
Σχήμα 50 : «Ενσωματωμένος άνθρακας σκυροδέματος RC 25/30 με διαφορετικές συστάσεις υλικών»

4.3.4 Αξιολόγηση Ενσωματωμένου Άνθρακα Χάλυβα

Ο χάλυβας είναι ένα από τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα υλικά κατασκευής λόγω της υψηλής αντοχής, ανθεκτικότητας και ευελιξίας του. Ωστόσο, όπως και τα περισσότερα μέταλλα, η παραγωγή του είναι ιδιαίτερα ενεργοβόρα και έχει σημαντικές ενσωματωμένες επιπτώσεις στον άνθρακα. Η παραγωγή πρωτογενούς χάλυβα με πρώτη ύλη τα σιδηρομετάλλευμα παρουσιάζει έντονες εκπομπές CO_2 λόγω των υψηλών θερμοκρασιών που απαιτούνται και της χρήσης οπτάνθρακα στην υψικάμινο για τη μετατροπή του σιδηρομεταλλεύματος σε σίδηρο. Τουναντίον, η δευτερογενής παραγωγή χάλυβα μέσω της μεθόδου Electric Arc Furnace (EAF) χρησιμοποιεί κυρίως σκραπ χάλυβα ως πρώτη ύλη. Η διαδικασία αυτή είναι λιγότερο

ενεργοβόρα σε σύγκριση με την πρωτογενή παραγωγή επειδή χρησιμοποιείται ηλεκτρική ενέργεια για να λιώσει τα σκραπ και ο ενσωματωμένος άνθρακας είναι σημαντικά χαμηλότερος. Το αποτύπωμα άνθρακα του χάλυβα EAF εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την πηγή ηλεκτρικής ενέργειας (ανανεώσιμες πηγές ενέργειας έναντι ενέργειας ορυκτών καυσίμων). Λαμβάνοντας υπόψιν τα παραπάνω είναι δόκιμο να ισχυριστούμε ότι ο χάλυβας που παράγεται με ηλεκτρική ενέργεια από ανανεώσιμες πηγές θα έχει χαμηλότερο ενσωματωμένο άνθρακα σε σύγκριση με τον χάλυβα που παράγεται με βάση τον άνθρακα.

Παράλληλα, άλλες μορφές δομικού χάλυβα όπως ο γαλβανισμένος και ανοξείδωτος χάλυβας παρουσιάζουν υψηλότερες εκπομπές άνθρακα καθώς ο πρώτος επικαλύπτεται με στρώμα ψευδαργύρου για την αποφυγή σκουριάς, ενώ ο δεύτερος περιέχει υψηλότερο ποσοστό στοιχείων κράματος όπως το χρώμιο και το νικέλιο, τα οποία ενισχύουν την αντοχή στη διάβρωση και την ανθεκτικότητα του. Η παραγωγή αυτών των στοιχείων κράματος συμβάλλει σε υψηλότερες ενσωματωμένες τιμές άνθρακα και ενέργειας.



Σχήμα 51 : «Ενσωματωμένος άνθρακας διάφορων τύπων χάλυβα»

Η βάση δεδομένων ICE βασίζει τα αποτελέσματα της έρευνας της σε δεδομένα απογραφής LCA της World Steel Association, η οποία παρέχει τα πληρέστερα και πιο λεπτομερή ενσωματωμένα ενεργειακά μεγέθη χάλυβα, στηριζόμενη στην ανάλυση κύκλου ζωής πολλών και διαφορετικών δειγμάτων (www.worldsteel.org). Σύμφωνα με αυτή την ανάλυση έχουν προσδιοριστεί οι μέσες τιμές διαφορετικών τύπων χάλυβα, όπως αυτές παρουσιάζονται παραπάνω.

Στο σχήμα 23 διακρίνουμε ότι ο ενσωματωμένος άνθρακας του χάλυβα παρουσιάζεται ιδιαίτερα υψηλός σε σύγκριση με άλλα δομικά υλικά, γεγονός που επιβεβαιώνει ότι οι διεργασίες παραγωγής (ιδιαίτερα οι πρωτογενείς) εκπέμπουν υψηλές συγκεντρώσεις άνθρακα. Συγκεκριμένα, παρατηρούμε ότι μια μέση τιμή του απλού δομικού χάλυβα κυμαίνεται σε επίπεδα άνω των 2 kg CO2e/kg, ενώ οι τιμές του γαλβανισμένου και ανοξείδωτου χάλυβα είναι ακόμα υψηλότερες, με 2.8 kg CO2e/kg και 4.4 kg CO2e/kg αντίστοιχα. Όπως γίνεται αντιληπτό οι τιμές αυτές είναι ιδιαίτερα υψηλές και η λήψη μέτρων για τον περιορισμό τους κρίνεται επιτακτική. Μια ενδεχόμενη λύση στην μείωση των εκπομπών παραγωγής χάλυβα θα μπορούσε να είναι η ανακύκλωση από προϊόντα σκραπ. Η χρήση ανακυκλωμένου χάλυβα μπορεί να μειώσει σημαντικά τον ενσωματωμένο άνθρακα, καθώς ο ανακυκλωμένος χάλυβας απαιτεί λιγότερη ενέργεια για την επεξεργασία από την παραγωγή χάλυβα από παρθένες πρώτες ύλες. Όσο υψηλότερη είναι η αναλογία του ανακυκλωμένου περιεχομένου, τόσο χαμηλότερο είναι το αποτύπωμα άνθρακα. Ο χάλυβας και γενικότερα όλα τα μέταλλα αλλάζουν σημαντικά τα ενσωματωμένα τους μεγέθη ανάλογα με την δυνατότητα ανακύκλωσης και το ποσοστό του ανακυκλωμένου περιεχόμενου.

Η ICE database παρέχει μια προσέγγιση του προτύπου EN 15804, με βάση το οποίο θεωρείται ότι ο χάλυβας δύναται να περιέχει στη σύσταση του έως και 85% ανακυκλωμένου προϊόντος. Το πρότυπο βασίζεται σε 4 διαφορετικά στάδια ζωής, όπου το A στάδιο είναι το στάδιο cradle to gate, το B η περίοδος χρήσης, το C το τέλος ζωής και το D το στάδιο όπου συγκεντρώνονται τα οφέλη ή οι επιβαρύνσεις πέρα από τον κύκλο ζωής. Στον παρακάτω πίνακα διακρίνεται ο ενσωματωμένος άνθρακας του χάλυβα στην διαδρομή cradle to gate και στην συνέχεια τα οφέλη από την ανακυκλωσιμότητα του, ως συνέπεια των δυο, υπολογίζεται το άθροισμα τους που δίνει τον πραγματικό ενσωματωμένο άνθρακα του υλικού, εφόσον εκείνο ανακυκλωθεί και επαναχρησιμοποιηθεί.

Material	Μοντέλο A, Ενσωματωμένος άνθρακας - kgCO2e/kg	Μοντέλο D, Άνθρακας - kgCO2e/kg	Μοντέλο A-D, Ενσωματωμένος άνθρακας - kgCO2e/kg
Χάλυβας, UO Σωλήνας	3.02	-1.3502	1.6698
Ηλεκτρολυτικό φύλλο χάλυβα με επικάλυψη χρωμίου χωρίς κασσίτερο	2.89	-1.3275	1.5624
Ηλεκτρογαλβανισμένος χάλυβας	3.03	-1.4072	1.6227
Χάλυβας, συγκολλημένος σωλήνας	2.78	-1.3065	1.4734

Χάλυβας, φύλλο οργανικής επικάλυψης	3.06	-1.2701	1.7898
Χάλυβας, Λευκοσίδηρος	2.85	-1.3588	1.4912
Χάλυβας, ψυχρής έλασης	2.73	-1.3396	1.3904
Γαλβανισμένος εν θερμώ χάλυβας	2.76	-1.3200	1.4400
Χάλυβας, Πλάκα	2.46	-1.1608	1.2992
Χάλυβας, Πηνίο ψυχρής έλασης	2.53	-1.2676	1.2623
Χάλυβας, Πηνίο θερμής έλασης	2.42	-1.2605	1.1595
Χάλυβας, Συρμάτινη ράβδος	2.27	-1.1471	1.1229
Χάλυβας, Πηνίο θερμής έλασης	2.28	-1.2054	1.0745
Χάλυβας, Ράβδος	1.99	-0.7876	1.2023
Χάλυβας, Διατομή	1.55	-0.3445	1.2054
Χάλυβας, Μηχανικός χάλυβας	1.27	0.3067	1.5767
Χάλυβας, Σωλήνας χωρίς ραφή	2.13	-0.8379	1.2921

Πίνακας 35 : «Ενσωματωμένος άνθρακας πρωτογενούς και ανακυκλωμένου χάλυβα» (circularecology.com/embodied-carbon-footprint-database.html)

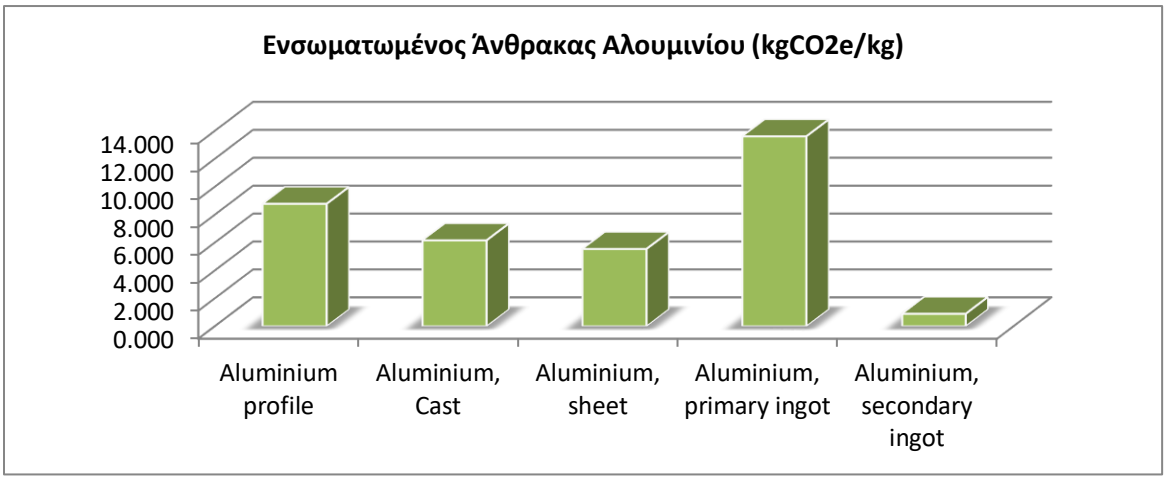
4.3.5 Αξιολόγηση Ενσωματωμένου Άνθρακα Αλουμινίου

Το αλουμίνιο, όπως αναφέρθηκε και στην ενότητα της ενσωματωμένης ενέργειας, αποτελεί ένα ιδιαίτερα ενεργοβόρο υλικό που απαιτεί πολλές διεργασίες για να αποκτήσει την τελική του μορφή. Τα οφέλη του στις κατασκευές είναι πολλαπλά ωστόσο δεν πρέπει να παραλείπεται το περιβαλλοντικό αποτύπωμα και οι υψηλές εκπομπές άνθρακα που απελευθερώνει στην ατμόσφαιρα.

Η βάση δεδομένων ICE v3 βασίζει τα δεδομένα της σε λεπτομερείς LCA από το Παγκόσμιο Ινστιτούτο Αλουμινίου τα οποία μοντελοποιούνται με βάση τον παγκόσμιο μέσο όρο εισαγωγής σκραπ και προέρχονται από το «Global Aluminum Flow Model» (www.world-aluminium.org). Τα δεδομένα για ανακυκλωμένο και παρθένο αλουμίνιο, τα οποία παρέχονταν στην προηγούμενη έκδοση, δεν είναι πλέον διαθέσιμα καθώς διάφοροι μελετητές έκαναν υποθέσεις για το ανακυκλωμένο περιεχόμενο, αντί να το βασίζουν σε πραγματικά πρωτογενή δεδομένα. Επομένως, για να αποφευχθεί αυτή η μεταβλητότητα, παρέχονται τώρα τα δεδομένα που χρησιμοποιούν τον παγκόσμιο μέσο όρο ανακυκλωμένου περιεχομένου.

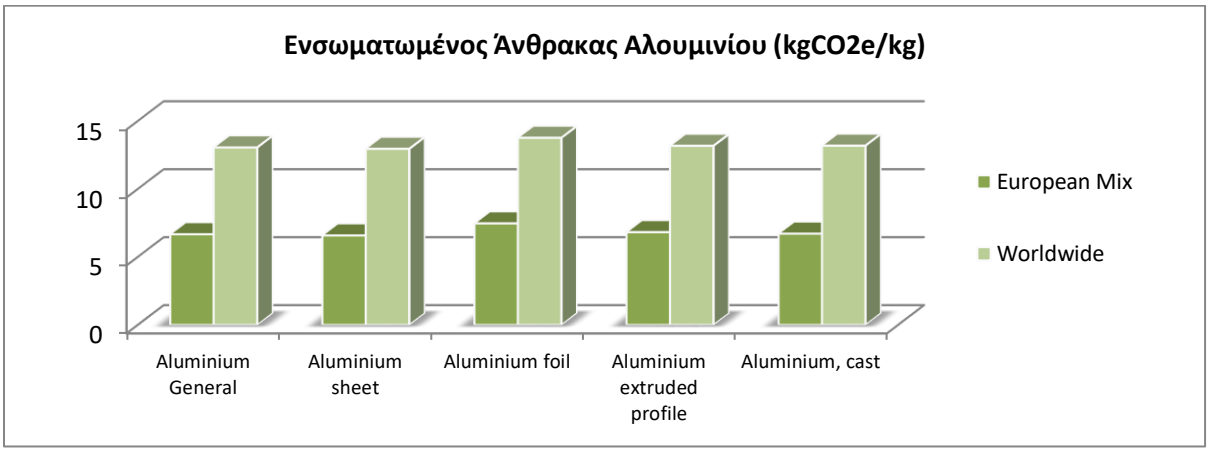
Σύμφωνα με τα παραπάνω δεδομένα και με χρήση των πινάκων της ICE v3, συγκεντρώθηκαν οι παγκόσμιοι μέσοι όροι του αλουμινίου στις διάφορες μορφές του. Όπως

διακρίνεται στο παρακάτω γράφημα, οι τιμές του ενσωματωμένου άνθρακα κυμαίνονται μεταξύ 6 kg CO2e/kg έως και 13.5 kg CO2e/kg, με εξαίρεση τις δευτερογενείς ράβδους αλουμινίου, οι οποίες επαναχρησιμοποιούνται και επομένως δεν χρειάζεται νέα παραγωγή. Αντιθέτως, οι ράβδοι αλουμινίου που παράγονται απευθείας από το εργοστάσιο εμφανίζουν τεράστια τιμή ενσωματωμένου άνθρακα. Άλλες μορφές αλουμινίου, όπως τα φύλλα αλουμινίου και το χυτό αλουμίνιο, εμφανίζουν μεν μικρότερες τιμές από τις πρωτογενείς ράβδους αλλά πολύ υψηλές σε γενική κλίμακα δε τιμές ενσωματωμένου άνθρακα.



Σχήμα 52 : «Ενσωματωμένος άνθρακας διάφορων τύπων αλουμινίου»

Αξιοσημείωτο είναι ακόμη το γεγονός ότι ο ενσωματωμένος άνθρακας του αλουμινίου παρουσιάζει σημαντικές διαφορές όσον αφορά την ευρωπαϊκή και την παγκόσμια αγορά. Σύμφωνα, με το παρακάτω διάγραμμα, διακρίνεται εύκολα ότι η παγκόσμια παραγωγή είναι σχεδόν διπλάσια για κάθε τύπο αλουμινίου συγκριτικά με την ευρωπαϊκή παραγωγή.



Σχήμα 53 : «Ενσωματωμένος άνθρακας διάφορων τύπων αλουμινίου σε παγκόσμια και ευρωπαϊκή κλίμακα»

Η διαφοροποίηση των τιμών προκύπτει λόγω μια σειράς παραγόντων που επηρεάζουν το αποτύπωμα άνθρακα της παραγωγής αλουμινίου σε διάφορες περιοχές, οι οποίες περιλαμβάνουν διακυμάνσεις στις πηγές ενέργειας, τις διαδικασίες παραγωγής, τους ρυθμούς ανακύκλωσης και τις μεταφορές. Η ευρωπαϊκή αγορά έχει γενικά υψηλότερο ποσοστό ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από ΑΠΕ (αιολική, ηλιακή) σε σύγκριση με άλλες περιοχές. Αυτό το καθαρότερο ενεργειακό μείγμα έχει ως αποτέλεσμα χαμηλότερες εκπομπές άνθρακα που σχετίζονται με την παραγωγή αλουμινίου. Αντιθέτως, σε πολλά άλλα μέρη του κόσμου, ιδιαίτερα σε χώρες όπου ο άνθρακας είναι η κυρία πηγή ενέργειας, η ηλεκτρική ενέργεια που χρησιμοποιείται στην παραγωγή αλουμινίου παράγει περισσότερες εκπομπές άνθρακα. Αυτό ισχύει ιδιαίτερα σε περιοχές όπως η Κίνα, η οποία έχει σημαντική ικανότητα παραγωγής αλουμινίου, αλλά βασίζεται σε μεγάλο βαθμό σε σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής με καύση άνθρακα.

Παράλληλα, η ευρωπαϊκή αγορά παρουσιάζει σχετικά υψηλό ποσοστό ανακύκλωσης αλουμινίου, το οποίο μειώνει σημαντικά τον ενσωματωμένο άνθρακα του υλικού. Η ανακύκλωση του αλουμινίου απαιτεί μόνο περίπου το 5% της ενέργειας που απαιτείται για την παραγωγή παρθένου αλουμινίου και έχει ως αποτέλεσμα πολύ χαμηλότερες εκπομπές άνθρακα. Τέλος, η Ευρώπη συγκριτικά με άλλες ηπείρους έχει θεσπίσει αυστηρότερους περιβαλλοντικούς κανονισμούς που ενθαρρύνουν ή επιβάλλουν χαμηλότερες εκπομπές άνθρακα σε βιομηχανικές διαδικασίες, συμπεριλαμβανομένης της παραγωγής αλουμινίου.

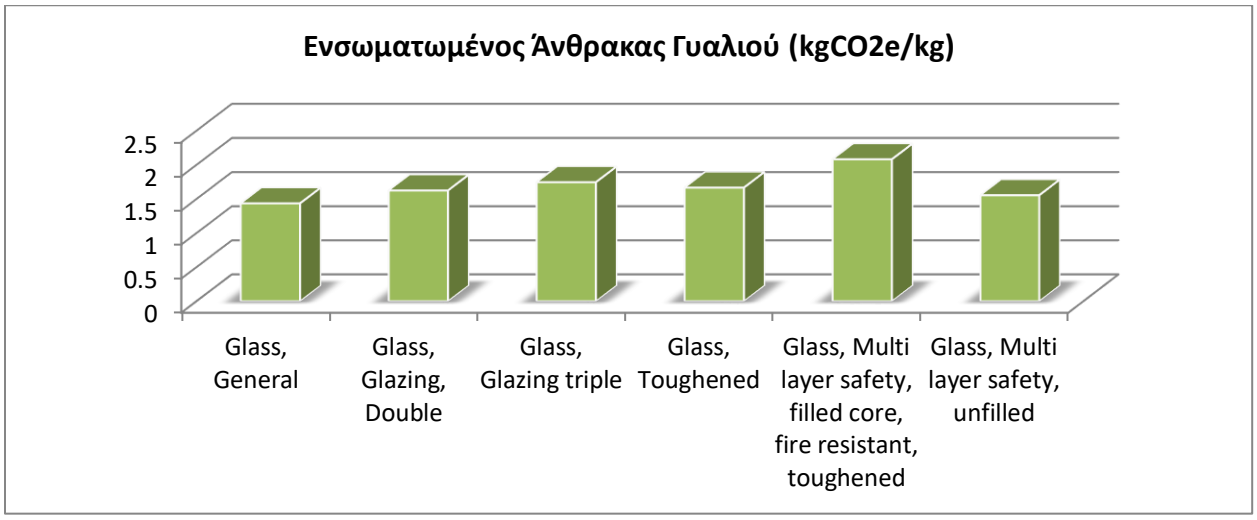
4.3.6 Αξιολόγηση Ενσωματωμένου Άνθρακα Γυαλιού

Το γυαλί αποτελεί ένα κοινό δομικό υλικό που χρησιμοποιείται ευρέως στην κατασκευαστική βιομηχανία και είναι γνωστό για την ευελιξία, τη διαφάνεια και την ανακυκλωσιμότητα του. Ωστόσο, η παραγωγή αυτού του υλικού θεωρείται ενεργοβόρα, γεγονός που επηρεάζει τα ενσωματωμένα ενεργειακά του μεγέθη. Ο ενσωματωμένος άνθρακας του γυαλιού ποικίλλει ανάλογα με τον τύπο του γυαλιού, τη διαδικασία κατασκευής, τη χρήση ανακυκλωμένου περιεχόμενου και την πηγή ενέργειας που χρησιμοποιείται. Στις κατασκευές συναντώνται διαφορετικοί τύποι γυαλιού, ο καθένας με διαφορετικά επίπεδα ενσωματωμένου άνθρακα λόγω των διαφορών στις διαδικασίες παραγωγής και στη σύνθεση του υλικού.

Ο πιο κοινός τύπος γυαλιού είναι το γυαλί επίπλευσης που χρησιμοποιείται κυρίως σε παράθυρα, προσόψεις και τζάμια. Η κατασκευή του γίνεται από τετηγμένο γυαλί που επιπλέει σε

ένα στρώμα λιωμένου κασσίτερου για να δημιουργηθεί μια λεία κι ομοιόμορφη επιφάνεια. Ο ενσωματωμένος άνθρακας του συγκεκριμένου υλικού εξαρτάται από την πηγή ενέργειας για την διαδικασία διαμόρφωσης του γυαλιού και από τις πρώτες ύλες (πυρίτιο) που τήκονται σε κλίβανο υψηλής θερμοκρασίας. Επιπρόσθετα, το σκληρυμένο γυαλί αποτελεί ένα γυαλί ασφαλείας το οποίο υποβάλλεται σε θερμική επεξεργασία για να αυξήσει την αντοχή του. Η πρόσθετη ενέργεια που απαιτείται για τη διαδικασία θερμικής επεξεργασίας οδηγεί σε ελαφρώς υψηλότερο ενσωματωμένο άνθρακα και ενέργεια σε σύγκριση με το γυαλί επίπλευσης.

Παράλληλα, το πολυστρωματικό γυαλί αποτελείται από δύο ή περισσότερα στρώματα γυαλιού που συνδέονται μεταξύ τους με ένα ενδιάμεσο στρώμα (ρητίνη) για πρόσθετη ασφάλεια και ηχομόνωση. Η παραγωγή αυτού του τύπου γυαλιού περιλαμβάνει πρόσθετες εισροές υλικού και ενέργεια για συγκόλληση, οδηγώντας σε υψηλότερη ενσωματωμένη τιμή άνθρακα. Στα ίδια επίπεδα ενσωματωμένου άνθρακα κυμαίνονται και τα τζάμια που αποτελούνται από δύο ή περισσότερα στρώματα γυαλιού που χωρίζονται από ένα διαχωριστικό γεμάτο με αέρα ή αέριο για να παρέχουν καλύτερη θερμομόνωση. Τα πρόσθετα υλικά και τα στάδια επεξεργασίας, όπως η σφράγιση των μονάδων και η πλήρωσή τους με αέριο, οδηγούν σε υψηλότερες τιμές



Σχήμα 54 : «Ενσωματωμένος άνθρακας διάφορων τύπων γυαλιού»

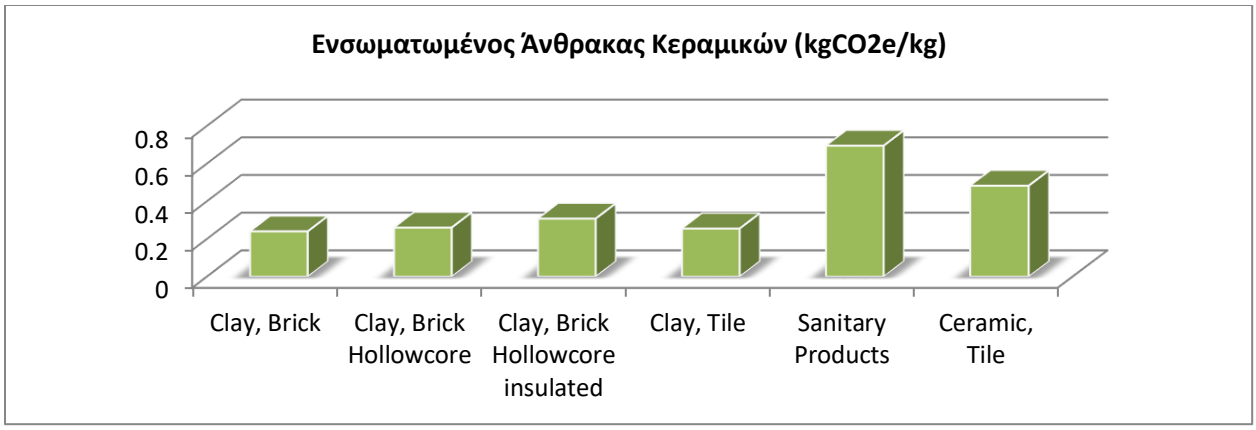
Σύμφωνα με το παραπάνω διάγραμμα που βασίζεται στη βάση δεδομένων ICE v3, το τυπικό γυαλί επίπλευσης έχει ενσωματωμένο άνθρακα περίπου 1.4 kg CO2e/kg, ενώ πιο σύνθετοι τύποι όπως το πολυστρωματικό ή σκληρυμένο γυαλί παρουσιάζουν υψηλότερες τιμές, (1.7-2.05 kg CO2e/kg). Αυτή η διακύμανση στις τιμές οφείλεται στην βιομηχανική επεξεργασία και στους πρόσθετους πόρους που χρησιμοποιούνται στους πιο σύνθετους τύπους γυαλιού.

Σε αυτό το σημείο είναι σημαντικό να επισημανθεί ότι η βελτίωση των μεθόδων της βιομηχανικής παραγωγής και η αύξηση της χρήσης ανακυκλωμένου γυαλιού είναι επιτακτικές για τη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των προϊόντων γυαλιού. Τα τζάμια έχουν ισχυρή επίδραση τόσο στο φωτισμό όσο και στη θερμική απόδοση ενός κτιρίου. Επομένως, είναι σημαντικό να ληφθούν υπόψιν οι επιπτώσεις για τον άνθρακα ολόκληρου του κύκλου ζωής του γυαλιού, συμπεριλαμβανομένης της ποσότητας τεχνητού έναντι φυσικού φωτισμού που απαιτείται για ένα κτίριο, και της επιρροής του στα φορτία θέρμανσης και ψύξης του κτιρίου.

4.3.7 Αξιολόγηση Ενσωματωμένου Άνθρακα Κεραμικών

Τα κεραμικά αποτελούν άλλη μια ομάδα δομικών υλικών που χρησιμοποιούνται αρκετά στις κατασκευές, υλικά όπως τα τούβλα, τα πλακάκια και τα είδη υγιεινής τοποθετούνται σχεδόν σε κάθε κτίριο. Όμως, η παραγωγή αυτών των υλικών περιλαμβάνει το ψήσιμο πρώτων υλών (άργιλος) σε υψηλές θερμοκρασίες, καθιστώντας την διαδικασία ενεργειακά δαπανηρή. Ο ενσωματωμένος άνθρακας των κεραμικών ποικίλλει ανάλογα με τον τύπο του προϊόντος, τις πρώτες ύλες, τη θερμοκρασία ψησίματος και τη διαδικασία παραγωγής.

Οι οπτόπλινθοι παράγονται με τη διαμόρφωση του πηλού σε καλούπια και ακολούθως με ψήσιμο σε κλίβανο σε θερμοκρασίες που κυμαίνονται από 900°C έως 1.200°C. Η ενέργεια που απαιτείται για το ψήσιμο των τούβλων καθώς και ο τύπος του κλιβάνου και του καυσίμου που χρησιμοποιείται, επηρεάζουν σημαντικά τον ενσωματωμένο άνθρακα του υλικού. Τα τούβλα λειτουργούν ευεργετικά για το περιβάλλον μακροπρόθεσμα καθώς οι ιδιότητες θερμικής μάζας που διαθέτουν, οδηγούν σε καλύτερη ενεργειακή απόδοση των κτιρίων ρυθμίζοντας τις εσωτερικές θερμοκρασίες ενώ αποτελούν ένα ανθεκτικό υλικό που αντέχει στο χρόνο. Ομοίως, τα πλακίδια κατασκευάζονται συνήθως από μείγμα αργίλου που ακολούθως συμπιέζεται στο επιθυμητό σχήμα και ψήνεται σε υψηλές θερμοκρασίες. Αντιθέτως, τα κεραμικά υγιεινής και η πορσελάνη κατασκευάζονται συνήθως από λεπτότερο τύπο πηλού και υφίστανται πιο εντατική επεξεργασία και ψήσιμο. Ο ενσωματωμένος άνθρακας και η ενέργεια είναι υψηλότερες λόγω της πρόσθετης διαμόρφωσης και της καύσης σε υψηλή θερμοκρασία.



Σχήμα 55 : «Ενσωματωμένος άνθρακας διάφορων τύπων κεραμικών προϊόντων»

Σύμφωνα με το άνωθεν διάγραμμα που βασίζεται σε δεδομένα της ICE v3, τα κεραμικά παρουσιάζουν ποικίλα επίπεδα ενσωματωμένου άνθρακα, με τις τιμές για τα τούβλα να βρίσκονται σε εύρος από 0.24 έως 0.30 kgCO2e/kg. Αντιθέτως, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, τα κεραμικά πλακίδια και τα κεραμικά υγιεινής παρουσιάζουν υψηλότερες τιμές. λόγω περισσότερων ενεργοβόρων διαδικασιών και υψηλότερων θερμοκρασιών καύσης στον κλίβανο, αφού παρουσιάζουν περίπου 0.48 και 0.69 kgCO2e/kg. Συγκριτικά με άλλα δομικά υλικά, οι τιμές ενσωματωμένου άνθρακα είναι χαμηλές, ωστόσο για τη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των κεραμικών θα πρέπει να βελτιωθεί η απόδοση του κλιβάνου, να ενθαρρυνθεί η χρήση ΑΠΕ στην παραγωγή και να προτιμηθεί η τοπική προμήθεια υλικών.

4.3.8 Αξιολόγηση Ενσωματωμένου Άνθρακα Ξυλείας

Σύμφωνα με τη βάση δεδομένων ICE v3, το ξύλο είναι ένα υλικό που παρουσιάζει σχετικά χαμηλό ενσωματωμένο άνθρακα, συγκριτικά με άλλα δομικά υλικά όπως το σκυρόδεμα, ο χάλυβας ή το αλουμίνιο. Ο ενσωματωμένος άνθρακας της ξυλείας μπορεί να προσδιοριστεί είτε χωρίς να λαμβάνεται υπόψιν η αποθήκευση άνθρακα του ξύλου ή με το να συμπεριλαμβάνεται η δέσμευση άνθρακα καθ'όλη τη διάρκεια της ζωής του προϊόντος ξυλείας.

Η ανάλυση που δεν λαμβάνει υπόψιν την αποθήκευση άνθρακα της ξυλείας, εστιάζει αποκλειστικά στις εκπομπές άνθρακα που σχετίζονται με τη συγκομιδή, επεξεργασία και μεταφορά της ξυλείας. Ο ενσωματωμένος άνθρακας σε αυτή την περίπτωση αφορά μόνο την πλευρά παραγωγής της ξυλείας (πριονιστήρια, ξήρανση, εκπομπές μεταφοράς), αγνοώντας το CO_2 που απορροφά το δέντρο κατά τη διάρκεια της ζωής του. Η ξυλεία εξακολουθεί να έχει

σχετικά χαμηλό αποτύπωμα άνθρακα σε σύγκριση με άλλα υλικά, αλλά χάνει τα πιθανά κλιματικά οφέλη της δέσμευσης άνθρακα κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής της.

Αντιθέτως, η ανάλυση που συμπεριλαμβάνει στα δεδομένα της την αποθήκευση άνθρακα της ξυλείας είναι περισσότερο ευθυγραμμισμένη με τον τρόπο με τον οποίο τα περισσότερα EPD παρουσιάζουν το αποτύπωμα άνθρακα. Τα δέντρα απορροφούν CO_2 κατά τη φωτοσύνθεση και το αποθηκεύουν καθ'όλη τη διάρκεια της ζωής τους, γεγονός που αντισταθμίζει ορισμένες από τις εκπομπές κατά τη διαδικασία παραγωγής ενός προϊόντος ξυλείας. Η ποσότητα του αποθηκευμένου άνθρακα επιστρέφεται στην ατμόσφαιρα μετά το τέλος ζωής του υλικού ξυλείας και το ακριβές ποσό εξαρτάται από τον τρόπο τέλους ζωής του υλικού. Σύμφωνα με έρευνες, περίπου το 50% της ξηρής μάζας του ξύλου είναι άνθρακας, ενώ είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι το ξύλο απορροφά και αποθηκεύει τον άνθρακα για όσο καιρό η δομή στέκεται.

Παράλληλα, σημειώνεται ότι ο καθαρός ενσωματωμένος άνθρακας της ξυλείας, ο οποίος προσδιορίζεται από την διαφορά του ενσωματωμένου με τον αποθηκευμένο άνθρακα, μπορεί να παρουσιάσει αρνητικές τιμές. Σε αυτήν την περίπτωση, το προϊόν ξυλείας δεν θεωρείται απλώς ένα δομικό υλικό, αλλά και μια αποθήκη άνθρακα, συμβάλλοντας στη μείωση του καθαρού αποτυπώματος άνθρακα της κατασκευής. Ως εκ τούτου, η ξυλεία γίνεται υλικό αρνητικό σε άνθρακα, πράγμα που σημαίνει ότι αποθηκεύει περισσότερο άνθρακα από ότι εκπέμπει κατά την παραγωγή της. Αυτό την καθιστά μια εξαιρετικά βιώσιμη επιλογή για τη μείωση του συνολικού αποτυπώματος άνθρακα των κτιρίων, ειδικά όταν πρόκειται για κατασκευές μεγάλης διάρκειας.

Η ICE v3 αποτελεί μια μελέτη ενσωματωμένων ενεργειακών μεγεθών με προσέγγιση cradle to gate που δεν συμπεριλαμβάνει τον κύκλο ζωής του υλικού μετά την εργοστασιακή του επεξεργασία. Για την ξυλεία η συμπερίληψη των πλεονεκτημάτων αποθήκευσης άνθρακα εντός αυτών των ορίων θα είχε ως αποτέλεσμα αρνητικές ενσωματωμένες τιμές άνθρακα. Αυτό ενδεχομένως να αποτελεί πρόβλημα κατά τους υπολογισμούς του συνολικού ενσωματωμένου άνθρακα καθώς πρέπει να εξεταστούν από την αρχή σενάρια τέλους ζωής του υλικού. Για το ξύλο υπάρχουν πολλές επιλογές για το τέλος ζωής, όπως η αποτέφρωση, η υγειονομική ταφή, η ανακύκλωση και επαναχρησιμοποίηση, δίνοντας διαφορετικές τιμές ενσωματωμένου άνθρακα για κάθε διαφορετικό σενάριο. Παράλληλα, οι αρνητικοί συντελεστές που προκύπτουν όταν λαμβάνεται υπόψιν η αποθήκευση άνθρακα μπορούν να οδηγήσουν σε λάθος συμπεράσματα όπως ότι η αύξηση της ποσότητας ξυλείας θα δώσει χαμηλότερο αποτύπωμα άνθρακα στο

προϊόν. Αυτή η λανθασμένη θεώρηση θα μπορούσε να οδηγήσει σε μια υπερβολική χρήση του υλικού η οποία έρχεται σε αντίθεση με τις γενικές αρχές της βιωσιμότητας. Ωστόσο, για λόγους πληρότητας και καλύτερης κατανόησης θα παρουσιαστούν και οι δυο τιμές ενσωματωμένου άνθρακα αγνοώντας και λαμβάνοντας υπόψιν την αποθήκευση άνθρακα του ξύλου, όπως αυτές φαίνονται στον ακόλουθο πίνακα.

Υλικά	Ενσωματωμένος άνθρακας - kgCO2e/kg (Χωρίς αποθήκευση άνθρακα)	Αποθήκευση άνθρακα - kg CO2e/kg	Ενσωματωμένος άνθρακας - kgCO2e/kg (με αποθήκευση άνθρακα)
Ξυλεία-Μέσος όρος δεδομένων	0.4928	-1.5237	-1.0309
Ξυλεία, Μοριοσανίδα	0.4002	-1.5208	-1.1207
Σύστημα ξύλινου πλαισίου κλειστού πάνελ	0.4525	-1.5541	-1.1016
Ξυλεία, CLT	0.4373	-1.6414	-1.2041
Ξυλεία, Ινοσανίδες	0.7153	-1.5785	-0.8632
Ξυλεία, Glulam	0.5121	-1.4079	-0.8957
Ξυλεία, σκληρό χαρτόνι	0.8152	-1.6392	-0.8240
Ξυλεία, σκληρό χαρτόνι	0.3056	-1.5915	-1.2860
Ξυλεία, πλαστικοποιημένη	0.6978	-1.2782	-0.5804
Ξυλεία, Πολυστρωματική ξυλεία	0.5041	-1.5882	-1.0841
Ξυλεία από πλαστικοποιημένο καπλαμά	0.3898	-1.6364	-1.2466
Ξυλεία, MDF	0.8565	-1.5002	-0.6437
Σύστημα ξύλινου πλαισίου ανοιχτού πίνακα	0.3452	-1.6142	-1.2690
Ξυλεία, OSB	0.4551	-1.5023	-1.0473
Ξυλεία, παρκέ	0.8112	-1.6242	-0.8130
Ξυλεία, Μοριοσανίδα	0.6643	-1.4793	-0.8150
Ξυλεία, κόντρα πλακέ	0.6815	-1.6145	-0.9331
Ξυλεία, μαλακό ξύλο	0.2626	-1.5545	-1.2919
Ξυλεία, ξύλινο δοκάρι	0.4833	-1.5332	-1.0499

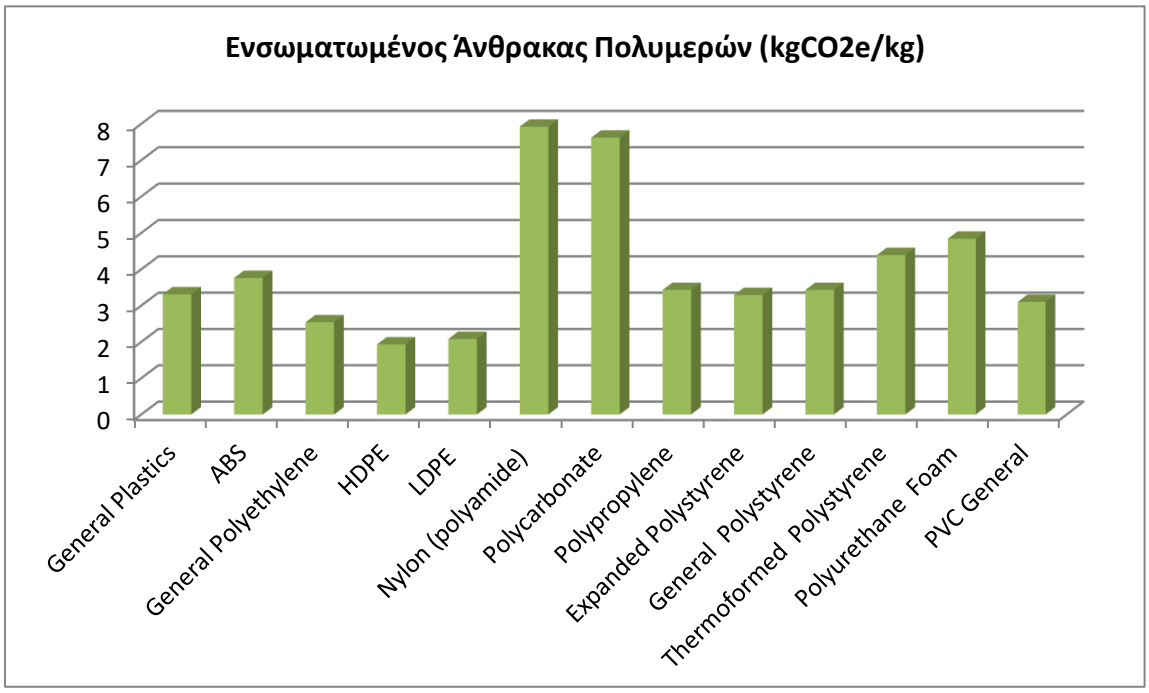
Πίνακας 36 : «Ενσωματωμένος άνθρακας και δέσμευση άνθρακα διάφορων τύπων ξυλείας» (circularecology.com/embodied-carbon-footprint-database.html)

Στον άνωθεν πίνακα παρατηρείται ότι τα προϊόντα ξυλείας παρουσιάζουν ενσωματωμένο άνθρακα μεταξύ 0.35 έως 0.8 kgCO2e/kg, ανάλογα με τον τύπο του ξύλου, καθώς κάθε προϊόν ξυλείας απαιτεί διαφορετικές διεργασίες παραγωγής. Οι τιμές αυτές είναι ικανοποιητικές συγκριτικά με τον ενσωματωμένο άνθρακα που παρουσιάζουν άλλα δομικά υλικά. Ωστόσο, σε μια πλήρη ανάλυση κύκλου ζωής των υλικών δεν πρέπει να παραλείπεται η ικανότητα δέσμευσης άνθρακα από τα προϊόντα ξυλείας. Όπως φαίνεται στον παραπάνω πίνακα, η

αποθήκευση άνθρακα για κάθε τύπου ξύλου είναι περίπου ίση με -1.5 kgCO2e/kg, οδηγώντας τις τιμές καθαρού ενσωματωμένου άνθρακα να παίρνουν αρνητικές τιμές.

4.3.9 Αξιολόγηση Ενσωματωμένου Άνθρακα Πολυμερών

Τα πολυμερή προσδίδουν στις κατασκευές εξαιρετικές θερμομονωτικές και ηχομονωτικές ιδιότητες, ωστόσο παρουσιάζουν υψηλές εκπομπές άνθρακα για την παραγωγή τους ενώ ο βαθμός ανακύκλωσης τους είναι ιδιαίτερα μικρός. Τα δεδομένα για τον ενσωματωμένο άνθρακα των πολυμερών συγκεντρώνονται από την βάση δεδομένων ICE v2 καθώς στην νέα έκδοση δεν συμπεριλήφθηκαν νέες τιμές από μετρήσεις.



Σχήμα 56 : «Ενσωματωμένος άνθρακας διάφορων τύπων πολυμερών»

Σύμφωνα, με το παραπάνω γράφημα τα πολυμερή εμφανίζουν μεγάλη διακύμανση ανάλογα με τον τύπο του υλικού, καθώς κάθε προϊόν ακολουθεί διαφορετικές διαδικασίες επεξεργασίας και παραγωγής. Συνολικά, λαμβάνουμε υψηλές τιμές που κυμαίνονται από 2 kgCO2e/kg για το πολυαιθυλένιο έως 8 kgCO2e/kg για το νάιλον (πολυαμίδιο). Τα ενσωματωμένα μεγέθη ποσά είναι υψηλά, ωστόσο πρέπει να επισημανθεί ότι στις κατασκευές χρησιμοποιούνται μικρές ποσότητες σε βάρος συγκριτικά με άλλα στοιχεία.

4.4 Επίδραση Πυκνότητας στον Ενσωματωμένο Άνθρακα

Ο ενσωματωμένος άνθρακας, όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενες ενότητες μετριέται σε kgCO2e/kg, ωστόσο όταν γίνεται σύγκριση του ενεργειακού περιεχομένου των υλικών δεν πρέπει να παραλείπεται κι η ενσωμάτωση της πυκνότητας των υλικών στη συνολική ενεργειακή τους αξιολόγηση. Πολλές κατασκευές απαιτούν μια πληθώρα διαφορετικών υλικών σε ξεχωριστές ποσότητες που καθορίζονται κατά βάση από την πυκνότητα του υλικού. Τα περισσότερα υλικά μπορούν να μετρηθούν σε μονάδες βάρους, συνεπώς η σύγκριση τους σε μονάδες μάζας είναι δίκαια και κατανοητή. Τουναντίον, κάποια άλλα υλικά, όπως το σκυρόδεμα και το τσιμέντο, μπορούν να μετρηθούν με μεγαλύτερη ακρίβεια σε μονάδες όγκου καθώς έχουν μια ρευστή μορφή κατά την ενσωμάτωσή τους στην κατασκευή. Ο ακόλουθος πίνακας δίνει τον ενσωματωμένο άνθρακα των πιο κοινών υλικών δόμησης μετά την επίδραση της πυκνότητας, όπου οι εκπομπές άνθρακα παρουσιάζονται σε kg $CO2e/m^3$.

Υλικό	Ενσωματωμένος άνθρακας (kg CO2e/kg)	Πυκνότητα (kg/m^3)	Ενσωματωμένος άνθρακας ($kg\ CO2e/m^3$)
Αδρανή	0.0075	1600	12.000
Αλουμίνιο	6.6687	2750	18338.925
Τσιμέντο	0.8321	1440	1198.224
Κεραμικά	0.213	1487	316.731
Σκυρόδεμα	0.1034	2380	246.092
Γυαλί	1.437	2500	3592.500
Χάλυβας	3.02	7850	23707.000
Ξυλεία	0.4928	624	307.507

Πίνακας 19 : «Ενσωματωμένος άνθρακας υλικών μετά την επίδραση πυκνότητας» (circularecology.com/embodied-carbon-footprint-database.html)

Όπως διαφαίνεται παραπάνω, τα αδρανή εξακολουθούν να διαθέτουν την μικρότερη τιμή ενσωματωμένου άνθρακα σε μονάδες όγκου με περίπου 12 $kgCO2e/m^3$. Χαμηλές τιμές παρουσιάζουν ακόμη το σκυρόδεμα, τα κεραμικά και το ξύλο ενώ αυξημένες τιμές εμφανίζουν το γυαλί και το τσιμέντο. Τέλος, παρατηρούμε ότι την μεγαλύτερη τιμή ενσωματωμένου άνθρακα παρουσιάζει ο χάλυβας, υπερισχύοντας του αλουμινίου που εμφανιζόταν ως πρωτίστως ως το πιο ενεργοβόρο δομικό υλικό. Αυτό οφείλεται κατά κύριο λόγο στην αυξημένη πυκνότητα του χάλυβα έναντι των υπολοίπων δομικών υλικών.

5. Συμπεράσματα

Ανακεφαλαιώνοντας, στις παραπάνω ενότητες παρουσιάστηκαν διαγράμματα και πίνακες τιμών ενσωματωμένης ενέργειας και άνθρακα των πιο κοινών υλικών δόμησης ενώ παράλληλα έγινε η αξιολόγηση τους ως προς το ενεργειακό τους περιεχόμενο. Ωστόσο, είναι σημαντικό να τονιστεί ότι τα δεδομένα στην ICE database βρίσκονται σε μονάδες MJ/kg ή $kgCO_2e/kg$, γεγονός που δεν καθιστά απόλυτα λειτουργική τη σύγκριση διαφορετικών υλικών, καθώς τα υλικά παρουσιάζουν διαφορετικές πυκνότητες και συνεπώς το βάρος των υλικών που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή δεν είναι το ίδιο. Για παράδειγμα, μια κατασκευή με επένδυση αλουμινίου θα απαιτούσε μικρότερη μάζα υλικού συγκριτικά με το αν η επένδυση ήταν κατασκευασμένη από χάλυβα, διότι το αλουμίνιο έχει χαμηλότερη πυκνότητα. Ωστόσο, όπως φάνηκε από τα παραπάνω γραφήματα η ενσωματωμένη ενέργεια του αλουμινίου είναι πολλαπλάσια του χάλυβα. Ένα ακόμη χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι τα θερμομονωτικά υλικά που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή. Προηγουμένως, διακρίναμε ότι το ενεργειακό περιεχόμενο τους ήταν υψηλό σε μονάδες MJ/kg, ωστόσο σε ένα κατασκευαστικό έργο τα συγκεκριμένα υλικά χρησιμοποιούνται σε μικρές ποσότητες ανά μονάδα βάρος συγκριτικά με άλλα δομικά υλικά ενώ ενισχύουν την ενεργειακή απόδοση των κτιρίων.

Η ενσωματωμένη ενέργεια αποτελεί ένα δείκτη των περιβαλλοντικών παραμέτρων των δομικών υλικών ενός κτιρίου, ο οποίος πρέπει να εξετάζεται προσεκτικά σε συνδυασμό με τις ιδιότητες των υλικών για τον προσδιορισμό του οικολογικού αποτυπώματος του κτιρίου. Οι ιδιότητες των υλικών μπορούν να αμβλύνουν ή να περιορίσουν τις αρχικές εκτιμήσεις περιβαλλοντικών επιπτώσεων, επομένως πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν σε μια πλήρη ανάλυση. Σε κάθε περίπτωση πάντως, η ενσωματωμένη ενέργεια παραμένει μια παράμετρος εκτίμησης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων του κτιρίου, που σχετίζεται κυρίως με την ενέργεια και δευτερευόντως με τις επιπτώσεις της (Σαργέντης, 2014). Απλώς επειδή ένα υλικό έχει χαμηλότερη ενσωματωμένη τιμή ενέργειας ή άνθρακα ανά κιλό δεν σημαίνει ότι θα είναι η καλύτερη επιλογή για την ενεργειακή απόδοση του προϊόντος και κατ'επέκταση της κατασκευής. Υπάρχει μια ολόκληρη σειρά άλλων ζητημάτων που πρέπει να ληφθούν υπόψιν, όπως για παράδειγμα η διάρκεια ζωής, οι απαιτήσεις συντήρησης, η πυκνότητα του υλικού και η ανθεκτικότητα του. Μια αντικειμενική σύγκριση μεταξύ διαφορετικών δομικών υλικών προϋποθέτει να ληφθούν υπόψιν όλοι οι παράμετροι.

Συνεπώς, κατά τον σχεδιασμό ενός κτιρίου δεν πρέπει να αποτελεί μοναδικό προβληματισμό η επιλογή υλικών χαμηλής ενσωματωμένης ενέργειας, καθώς ένα τέτοιο κτίριο θα μπορούσε να απαιτήσει περισσότερη ενέργεια κατά τη φάση λειτουργίας του για ανάγκες όπως η θέρμανση, η ψύξη κι ο αερισμός. Επομένως, κύριος στόχος είναι η εξισορρόπηση μεταξύ της ενσωματωμένης και λειτουργικής ενέργεια του κτιρίου. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της επιλογής τοπικών προϊόντων που περιορίζουν την ενέργεια των μεταφορών και την επιλογή υλικών μικρής ενσωματωμένης ενέργειας εκτός αν πρόκειται για υλικά που έχουν σημαντικό ρόλο στη μείωση της λειτουργικής ενέργειας του κτιρίου. Σημαντικό είναι δε, να επαναχρησιμοποιούνται υπάρχοντα υλικά ή να χρησιμοποιούνται νέα, που παρουσιάζουν υψηλό ποσοστό ανακυκλωμένου περιεχομένου ενώ πρέπει πάντα να ζητούνται σχετικές προδιαγραφές από προμηθευτές για όλα τα προϊόντα. Παράλληλα, ο σχεδιασμός πρέπει να εστιάζει σε βιώσιμα κτίρια τα οποία θα έχουν διάρκεια στον χρόνο και θα υπάρχει η δυνατότητα ανάκτησης και επαναχρησιμοποίησης της πλειονότητας των δομικών υλικών των κτιρίων. Επίσης, οι κατασκευές είναι θεμιτό να μην είναι μεγαλύτερες από τις ανάγκες των χρηστών, ελαχιστοποιώντας κατά αυτόν τον τρόπο τη χρήση των υλικών, αποφεύγοντας την σπατάλη.

Μια ολοκληρωμένη και πλήρης αξιολόγηση του ενεργειακού περιεχομένου ενός κτιρίου ενδέχεται να είναι χρονοβόρα καθώς πρέπει να καταγραφούν όλα τα υλικά που θα χρησιμοποιηθούν και να δοθούν προσεγγιστικά οι ποσότητές τους. Αυτό το εγχείρημα απαιτεί μεγάλο αριθμό δεδομένων και δεν είναι πιθανό τα στοιχεία για όλα τα υλικά να είναι άμεσα διαθέσιμα προς χρήση. Συνεπώς, η διαδικασία αξιολόγησης θα απαιτήσει επιπλέον χρόνο και για τον λόγο αυτό είναι δόκιμο να γίνει συμβιβασμός μεταξύ της απαιτούμενης ακρίβειας και της διαθεσιμότητας των πόρων. Τουναντίον, για απλοποίηση των διαδικασιών ακολουθείται όπως και σε πολλές άλλες μελέτες, η γενική αρχή του Pareto, η οποία δηλώνει στην περίπτωση μας ότι το 80% της ενσωματωμένης ενέργειας και άνθρακα θα προέρχεται από περίπου το 20% των προϊόντων. Επομένως, τα προϊόντα που θεωρούνται πιο σημαντικά και χρησιμοποιούνται σε μεγαλύτερες ποσότητες πρέπει να εντοπιστούν και να καταγραφούν πρώτα. Πολλά από τα υπόλοιπα στοιχεία μπορεί να έχουν αμελητέα επίδραση και θα μπορούσαν ενδεχομένως να παραληφθούν από την αξιολόγηση, ειδικά εάν η προηγούμενη εμπειρία δικαιολογεί την παράλειψή τους (Hammond & Jones, 2011).

Επιπρόσθετα, ένας ακόμη παράγοντας που πρέπει να εξεταστεί είναι η μετέπειτα χρήση των υλικών μετά από την εργοστασιακή τους επεξεργασία. Η βάση δεδομένων ICE λαμβάνει υπόψιν την cradle to gate διαδρομή και δεν συμπεριλαμβάνει στις μετρήσεις της, τις εκπομπές CO_2 και την ενέργεια που δαπανάται για την μεταφορά, εγκατάσταση και συντήρηση των δομικών υλικών. Με αυτόν τον τρόπο διαχωρίζει την μεταφορά των υλικών για να διαπιστωθεί εάν οι μεταφορές μεγάλων αποστάσεων δεν καταναλώνουν περισσότερη ενέργεια και δεν απελευθερώνουν περισσότερες εκπομπές άνθρακα από μια τοπική εναλλακτική λύση. Μολονότι η μεταφορά των υλικών αποτελεί συχνά ένα μικρό παράγοντα για την αύξηση της τιμής του ενσωματωμένου άνθρακα ενίοτε χρήζει μεγάλης προσοχής. Για παράδειγμα, υλικά όπως τα αδρανή απαιτούν μικρή ποσότητα ενέργειας για την επεξεργασία τους και συνεπώς η συνολική τους ενσωματωμένη ενέργεια οφείλεται στην μεταφορά τους.

Οι επιπτώσεις των μεταφορών αντιπροσωπεύονται τυπικά από τις μονάδες τονοχιλιόμετρων (tkm), όπου 1 tkm ορίζεται από τη μεταφορά ενός τόνου του προϊόντος σε απόσταση ενός χιλιομέτρου. Συνεπώς, για να συμπεριληφθεί η επίδραση της μεταφοράς στον υπολογισμό, η συνολική μάζα (tn) του μεταφερόμενου υλικού πολλαπλασιάζεται με την απόσταση μεταφοράς σε χιλιόμετρα (km) και πολλαπλασιάζεται περαιτέρω με την επίπτωση ανά tkm, δίνοντας τον αντίκτυπο των μεταφορών (Hammond & Jones, 2011). Κατά γενικό κανόνα, οι επιπτώσεις των οδικών μεταφορών είναι πολύ μεγαλύτερες από τις θαλάσσιες ή τις σιδηροδρομικές μεταφορές. Επομένως, ένα προϊόν που διανύει μεγάλη απόσταση δια θαλάσσης και μια μικρή περαιτέρω απόσταση οδικώς, να έχει μικρότερο αντίκτυπο στη μεταφορά από ένα προϊόν που μεταφέρεται σε πολύ μικρότερη συνολική απόσταση ταξιδιού μόνο οδικώς.

Ένας ακόμη σημαντικός παράγοντας που εξετάζεται όταν γίνεται έρευνα κι αξιολόγηση του ενεργειακού περιεχομένου των υλικών είναι τα παραγόμενα απόβλητα σε κάθε στάδιο του κύκλου ζωής ενός προϊόντος. Για παράδειγμα για την κατασκευή ενός κτιρίου παράγονται πολυάριθμα υλικά τα οποία εν τέλει δεν χρησιμοποιούνται, αυτό συμβαίνει κυρίως λόγω υπερβολικής προμήθειας υλικών ή είναι αποτέλεσμα σπασίματος και κακής εγκατάστασης.

Τα συνολικά ενεργειακά μεγέθη ενός κτιρίου πρέπει να περιλαμβάνουν τόσο τα ενσωματωμένα όσο και τα λειτουργικά βάρη. Αυτό διασφαλίζει ότι λαμβάνεται υπόψιν κάθε στάδιο του κύκλου ζωής, συμπεριλαμβανομένης της συντήρησης και της αντικατάστασης των δομικών προϊόντων. Πριν από την επιλογή των κατάλληλων υλικών πρέπει να ελέγχονται οι

απαιτήσεις και η συχνότητα συντήρησης των υλικών και πως αυτές οι συνθήκες επηρεάζουν την διάρκεια ζωής τους. Παράλληλα, είναι σημαντικό να εξεταστεί η επίδραση που έχουν τα υλικά κατά τη φάση λειτουργίας τους. Για παράδειγμα, η τιμή της θερμοπερατότητας των μονωτικών υλικών θα έχει επίδραση στην κατανάλωση ενέργειας και στις εκπομπές άνθρακα ενός κτιρίου. Ο τρόπος με τον οποίο αυτά τα προϊόντα ενσωματώνονται στο σχεδιασμό ενός κτιρίου και ο τρόπος λειτουργίας του κτιρίου θα καθορίσει την έκβαση αυτής της θετικής ή αρνητικής επίδρασης (Hammond & Jones, 2011).

Ένας επιπλέον παράγοντας που πρέπει να εξετάζεται στις μελέτες ενσωματωμένης ενέργειας και άνθρακα είναι η δυνατότητα ανακύκλωσης και επαναχρησιμοποίησης των δομικών υλικών, ιδιαίτερα των μεταλλικών στοιχείων που παρουσιάζουν μεγάλη αρχική ενσωματωμένη ενέργεια. Αναφορικά με την ανακύκλωση, η εξοικονόμηση ενέργειας και τα ενεργειακά μεγέθη διαφέρουν από υλικό σε υλικό. Πολλά υλικά στα κτίρια, όπως το σκυρόδεμα και τα τούβλα, καταστρέφονται κατά την αποδόμηση και απαιτούν σχεδόν την ίδια ενέργεια να ανακυκλωθούν, όσο και για να παραχθούν εκ νέου. Άλλα υλικά που ανακυκλώνονται εύκολα, όπως το αλουμίνιο και ορισμένα ακόμη μέταλλα, μπορούν να εξοικονομήσουν έως και το 95% της ενσωματωμένης τους ενέργειας όταν ανακυκλωθούν, ενώ το γυαλί μόνο το 20% (Σαργέντης, 2014). Όπως, διαπιστώθηκε στις παραπάνω ενότητες το αρχικό ενεργειακό περιεχόμενο των μετάλλων είναι ιδιαίτερα υψηλό καθώς οι διαδικασίες εξόρυξης και επεξεργασίας τους είναι αρκετά ενεργοβόρες. Ωστόσο, διακρίνουμε ότι η τιμή των ενσωματωμένων μεγεθών μειώνεται κατά μέσο όρο περίπου στο 1/5 της αρχικής τιμής αν το μέταλλο έχει ανακυκλωθεί. Για παράδειγμα, το αλουμίνιο που έχει από τις μεγαλύτερες τιμές ενσωματωμένης ενέργειας (περίπου 220MJ/kg) δύναται μέσω της ανακύκλωσης να μειώσει αρκετά την τιμή του (περίπου 30 MJ/kg). Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό στοιχείο στις κατασκευές γιατί με αυτόν τον τρόπο προωθείται η αειφορία και μειώνεται το περιβαλλοντικό αποτύπωμα των δομικών υλικών.

Η ανακύκλωση είναι ευεργετική καθώς οι διεργασίες που τη διέπουν απαιτούν πολύ λιγότερη ενέργεια από τις πρωτογενείς διαδικασίες παραγωγής. Για παράδειγμα, η παραγωγή ενός καθαρού μετάλλου προϋποθέτει την εξόρυξη του μεταλλεύματος και τη διύλιση του σε μια πιο καθαρή και χρήσιμη μορφή με τη χρήση σημαντικών πόρων και πρώτων υλών, καθιστώντας την όλη διαδικασία ενεργειακά απαιτητική. Από την άλλη, η ανάκτηση μετάλλων (παλιοσίδερα) από υφιστάμενες κατασκευές εξαλείφει τις ενεργοβόρες εργασίες επεξεργασίας, με αποτέλεσμα

τα ανακυκλωμένα μέταλλα να παρουσιάζουν σημαντικά χαμηλότερη ενσωματωμένη ενέργεια και άνθρακα από τα πρωτογενή. Συνοπτικά, τα ανακυκλωμένα μέταλλα χρησιμοποιούνται ως εισροή σε ένα νέο κτίριο, κάτι που είναι ευεργετικό. Ωστόσο, στο τέλος της ζωής ενός κτιρίου, ένα υψηλό ποσοστό των μετάλλων ανακτάται και αποστέλλεται για ανακύκλωση, γεγονός που εξοικονομεί ενέργεια. Αυτό σημαίνει ότι τα μέταλλα προσφέρουν οφέλη στην αρχή της ζωής ενός κτιρίου (ανακυκλωμένο περιεχόμενο) αλλά και στο τέλος της διάρκειας ζωής ενός κτιρίου (ανακυκλωσιμότητα). Σε αυτό το σημείο, είναι σημαντικό να επισημανθεί να μην γίνεται διπλή καταμέτρηση των δυο οφελών καθώς το ένα προέρχεται από το άλλο.

Το θέμα της αποθήκευσης άνθρακα για προϊόντα ξυλείας είναι εξίσου σημαντικό, καθώς η βάση δεδομένων ICE μελετά την διαδρομή cradle to gate χωρίς να λαμβάνει την μετέπειτα πορεία του υλικού και ιδιαίτερα το τέλος ζωής του. Το ξύλο αποθηκεύει άνθρακα σε όλο τον κύκλο ζωής του και το απελευθερώνει στο περιβάλλον στο τέλος ζωής του, κάτι τέτοιο θα μπορούσε να δώσει αρνητικές τιμές ενσωματωμένου άνθρακα που θα οδηγούσε σε κακή χρήση των δεδομένων και υπερβολικές παραγγελίες προϊόντων ξυλείας. Κατά συνέπεια, θα αυξάνονταν οι περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις και θα ασκούνταν μεγαλύτερη πίεση στους φυσικούς πόρους ξυλείας. Επομένως, για να διασφαλιστεί ότι τα πλεονεκτήματα αποθήκευσης άνθρακα της ξυλείας έχουν συμπεριληφθεί τα αρχικά δεδομένα πρέπει να τροποποιηθούν.

Συμπερασματικά, για μια ολιστική μελέτη και σύγκριση οικοδομικών προϊόντων πρέπει να ληφθεί υπόψιν όλος ο κύκλος ζωής των υλικών, όμως επειδή η σύγκριση πραγματοποιείται για όλα τα υλικά για την ίδια διαδρομή (cradle to gate) από μια κοινή βάση δεδομένων, μπορούμε να ισχυριστούμε ότι η σύγκριση και αξιολόγηση των υλικών με βάση την ICE database είναι αξιόπιστη. Τα δεδομένα έχουν δομηθεί με τέτοιο τρόπο ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν γρήγορα για υπολογισμούς και για να προσδιοριστεί ενδεχομένως η καλύτερη επιλογή υλικού ενός απλού προϊόντος. Η βάση δεδομένων ICE εφαρμόζεται στη βιομηχανία και προσφέρει ένα σημαντικό εργαλείο για την ενσωματωμένη αξιολόγηση του άνθρακα και του αποτυπώματος του, συνεισφέροντας σε σημαντική εξοικονόμηση άνθρακα, μετριασμό των εκπομπών GHGs και στην επίτευξη των διεθνών στόχων εκπομπών. Ωστόσο, για την πλήρη αξιοποίηση των δεδομένων πρέπει να συμπεριλαμβάνεται στην τελική αξιολόγηση η συνεισφορά των ανακυκλωμένων υλικών και η αποθήκευση άνθρακα προϊόντων ξυλείας, καθώς οι δυο αυτοί παράγοντες έχουν μεγάλη επιρροή στα αποτελέσματα.

Ελληνική Βιβλιογραφία

1. Λεγάκις Αντώνης, Δομικά Υλικά, 1992

2. Μαυρίδου Σοφία, Περιβαλλοντική Αξιολόγηση Συμβατικών Δομικών Υλικών με Συνδυασμό των Μεθόδων Ανάλυσης Κύκλου Ζωής και Πολυκριτιριακής Ανάλυσης, 2010

3. Σαργέντης Φοίβος, Ενσωματωμένη Ενέργεια το Υλικό ως Ενεργειακή Αποθήκη, 2014

4. Σαργέντης Φοίβος, Επιλογή Δομικών Υλικών με Οικολογικά Κριτήρια, 2014

5. Τριανταφύλλου Αθανάσιος, Δομικά Υλικά, 2013

6. Τσανούλας Γεώργιος, Ανάλυση Κύκλου Ζωής και Embodied Energy Δομικών Υλικών, 2022

7. Χάστας Π, Θεοδοσίου Τ., Μπίκας Δ., Κοντολέων Κ., Embodied Energy and Nearly Zero Energy Buildings: A Review in Residential Buildings, 2016

Διεθνής Βιβλιογραφία

1. Azhar S., Hein M., A Review of Building Information Modeling for Energy Analysis, 2011

2.Bastianoni S., Galli A., Niccolucci V.,Pulselli R.M., The ecological footprint of building construction ,2006

3. Chong H.G., Integrating Building Information Modeling (BIM) and Life Cycle Assessment (LCA) for Sustainable Building Design, 2017

4. Crawford R.H., Post-occupancy life cycle energy assessment of a residential building in Australia, 2014, Architectural Science Review 57 (2):114–124

5. Circular Ecology, ICE Database v3.0, 2019

6. Conti J. , Holtberg P., Diefenderfer J., LaRose A., Turnure J.T., Westfall L., 2016, International energy outlook 2016 with projections to 2040, USDOE Energy Information Administration (EIA), Washington, DC (United States), Office of Energy Analysis

7. Estrada H. & Lee L., Embodied Energy and Carbon Footprint of Concrete Compared to Other Construction Materials

8. Geoffrey Hammond and Craig Jones, Embodied Carbon The Inventory of Carbon and Energy (ICE), 2011

9. Goodman S.H., Dodiuk-Kenig, Handbook of Thermoset Plastics (3rd edition.), 2013

10. ISO, 14067, Greenhouse gases: carbon footprint of products – Requirements and guidelines for quantification. International Organisation for Standardisation, Geneva, 2018

11. ISO, 14040, Environmental management: life cycle assessment – Principles and framework. International Organisation for Standardisation, Geneva, 2006

12. Marwa D., Jukka H., Deena E.M., Dalya M. H., A comparative study of life cycle carbon emissions and embodied energy between sun-dried bricks and fired clay bricks, 2020

13. Nizam R.S., Zhang Ch., A BIM based tool for assessing embodied energy for buildings, 2018

14. Rock Ch et al, Life Cycle Assessment in Building and Construction: A Systematic Literature Review, 2020

15. Royal Institute of Chartered Surveyors (RICS), Whole Life Carbon Assessment for the Built Environment, 2017

16. Shadram F.,Johansson T.,Lu W., Schade J., An Integrated BIM-based framework for minimizing embodied energy during building design,2016

17. Thormark C., A low energy building in a life cycle -its embodied energy, energy need for operation and recycling potential, Building and Environment, vol. 37, issue 4, April 2002

18. US Green Building Council (USGBC), LEED v4.1 Building Design and Construction Guide, 2024

19. Wu P., Low S.P., Xia B., Zuo J., Achieving transparency in carbon labeling for construction materials – Lessons from current assessment standards and carbon labels, 2024

20. Yohanis Y. G. and B. Norton, Life-cycle operational and embodied energy for a generic single-storey office building in the UK, Energy, 2002

Ιστογραφία

1. Adewumi J. B et al, Long-Term strength and durability performance of eco-friendly concrete with supplementary cementitious materials, 2023, Ανακτήθηκε από: https://link.springer.com/article/10.1007/s41062-023-01225-3

2.Ahmed M. Elsayed, Hazem H. Elanwar, Mohamed Marzouk, Sherif S. Safar, Sustainable layout design of steel buildings through embodied energy and costs optimization, 2021, Ανακτήθηκε από:

https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666790821002688

3.Almusaed A.,Yiymen I., Myhren J.A., Almsaad A., Assessing the Impact of Recycled Building Materials on Environmental Sustainability and Energy Efficiency: A Comprehensive Framework for Reducing Greenhouse Gas Emissions,2024, Ανακτήθηκε από: https://www.mdpi.com/2075-5309/14/6/1566

4.Asdrubali F.,Grasieschi G.,Roncone M., Thiebat F., Carbonaro C.,Sustainability of Building Materials: Embodied Energy and Embodied Carbon of Masonry,2023, Ανακτήθηκε από: https://www.mdpi.com/1996-1073/16/4/1846

5. Batis G., Rakanta E.,Corrosion of steel reinforcement due to atmospheric pollution, 2004, Ανακτήθηκε από: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0958946504000320?via%3Dihub

6. BigRentz, 20 Sustainable Building Materials for a Greener Future, 2023, Ανακτήθηκε από: https://www.bigrentz.com/blog/sustainable-construction

7. Cabral J.P.,Kafle B., Subhani M.,Reiner J.,Ashraf M., Densification of timber: a review on the process, material properties, and the application, 2022, Ανακτήθηκε από: https://jwoodscience.springeropen.com/articles/10.1186/s10086-022-02028-3

8. Ciaran R.,Emilio G., Fibre-Reinforced Concrete Is Sustainable and Cost-Effective for Water-Retaining Structures, 2021, Ανακτήθηκε από: https://www.mdpi.com/2071-1050/13/20/11479

9. Concrete Network, Concrete Admixtures, 2020, Ανακτήθηκε από: https://www.concretenetwork.com/concrete/concrete_admixtures/

10. Crawford R.H., Embodied Energy, 2020, Ανακτήθηκε από:https://www.yourhome.gov.au/materials/embodied-energy

11. Crawford R.H., Embodied energy of common construction assemblies (Version 1.0), The University of Melbourne, Melbourne, 2019

12. Crawford R.H. , Post-occupancy life cycle energy assessment of a residential building in Australia, 2014, Architectural Science Review 57 (2):114–124

13. Daziel Ch., Common Brick vs Face Brick, 2021, Ανακτήθηκε από: https://www.hunker.com/12539937/common-brick-vs-face-brick

14. E.E. Indicators, Fundamentals on Statistics, International Energy Agency, 2014

15. EPD, Environmental Product Declarations, 2021, Ανακτήθηκε από: https://www.environdec.com/all-about-epds/the-epd

16. Epddanmark, Verified environmental information for construction products, 2020,https://www.epddanmark.dk/uk/about-epds/what-is-an-epd/

17. Eurofer (The European Steel Association),What is steel and how is steel made? Ανακτήθηκε από: https://www.eurofer.eu/about-steel/learn-about-steel/what-is-steel-and-how-is-steel-made

18. Gent N. A., Elastomers, 1999, Ανακτήθηκε από: https://www.britannica.com/science/elastomer

19. Hafez S. F. and others, Energy Efficiency in Sustainable Buildings : A Systematic Review with Taxomany Challenges, Motivations, Methodological Aspects, Recommendations, and Pathways for Future Research, 2023, Ανακτήθηκε από: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211467X22002073

20. Housing New Desk,What is the correct water-cement ratio?,2023, Ανακτήθηκε από:https://housing.com/news/what-is-the-correct-water-cement-ratio/

21. Hudson O., What polymers are used in construction?, 2022, Ανακτήθηκε από: https://www.azobuild.com/article.aspx?ArticleID=8511

22. Industrial Metal Service, Ferrous Metals: History, Types, Properties , Uses, Pros and Cons,2024, Ανακτήθηκε από: https://industrialmetalservice.com/metal-university/ferrous-metals/

23. Intsel, The different types of structural steel, 2024, Ανακτήθηκε από: https://www.bushwickmetals.com/different-types-of-structural-steel/

24. Kristensen S, Natural Stone as a Sustainable Building material - How natural stone can impact the “green” architectural design process in the future, 2016, Ανακτήθηκε από: https://stone-universe.com/wp-content/uploads/2019/01/NaturalStone_as_a_Sustainable_Buildingmaterial.pdf

25. Lad K., Advantages & Disadvantages of Glass building material, 2019, Ανακτήθηκε από: https://gharpedia.com/blog/advantages-disadvantages-glass-building-material/

26. Long Beach City College, Glass in Architecture, *Building Construction and Materials: An Open Educational Resource Textbook*, Ανακτήθηκε από: https://lbcc.pressbooks.pub/buildingconstruction/chapter/glass-in-architecture/

27. Material Properties, Concrete, 2023, Ανακτήθηκε από: https://material-properties.org/concrete/

28. Material Properties, High Density Fiberboard (HDF), 2023, Ανακτήθηκε από: view-source:https://material-properties.org/high-density-fiberboard-hdf/#google_vignette

29. Melton P.,The American Institute of Architects, Buildings that last:design for adaptability, deconstruction and reuse, 2020,Ανακτήθηκε από: https://content.aia.org/sites/default/files/2020-03/ADR-Guide-final_0.pdf#:~:text=URL%3A%20https%3A%2F%2Fcontent.aia.org%2Fsites%2Fdefault%2Ffiles%2F2020

30. Miller M.K., Pareige P.,, Burke M.G.,Understanding Pressure Vessel Steels: An atom probe perspective, 1999, Ανακτήθηκε από: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S104458039900056X

31. Mishra G.,Types of Building Materials – Properties and Uses in Construction,2012, Ανακτήθηκε από: https://theconstructor.org/building/types-of-building-materials-construction/699/

32. Morecamble Metals, How is metal used in the construction trade? , 2022, Ανακτήθηκε από: https://www.morecambemetals.co.uk/how-is-metal-used-in-the-construction-trade/

33. Pradena M, Cesar A., Different approaches to develop more sustainable concrete alternatives, 2021, Ανακτήθηκε από: https://www.intechopen.com/chapters/78685

34. Schrenk D., Amiri A., Life cycle energy analysis of residential wooden buildings versus concrete and steel buildings: a review,2023,,Ανακτήθηκε από: https://www.frontiersin.org/journals/built-environment/articles/10.3389/fbuil.2022.975071/full

35. Stacey M., Aluminium's life cycle advantaqges, 2017, Ανακτήθηκε από : https://www.recyclingtoday.com/news/aluminium-construction-life-cycle-recycling/

36. Team Xometry, Aluminum: History, characteristics, types, properties, and applications, 2023, Ανακτήθηκε από: https://www.xometry.com/resources/materials/what-is-aluminum/

37. Team Xometry, Metal: Definition Properties, Use and Types, 2024, Ανακτήθηκε από: https://www.xometry.com/resources/materials/metal/

38. The brick calculator, diving deep into engineering brick:specifications, history and uses,2024, Ανακτήθηκε από: https://www.thebrickcalculator.com/bricks/engineering-brick.html

39. The constructor, Types of Tiles used in building construction and their applicatilons, 2017, Ανακτήθηκε από: https://theconstructor.org/building/types-of-tiles-applications-building-construction/15649/

40. The Constructor, What is Reinforced Concrete? Uses,benefits and advantages, 2019,Ανακτήθηκε από: https://theconstructor.org/concrete/reinforced-concrete-uses-benefits-advantages/35976/#goog_rewarded

41. The Piping Mart Blog,Alloy Steel vs Non-Allow Steel – What's the difference?,2023,,Ανακτήθηκε από: https://blog.thepipingmart.com/metals/alloy-steel-vs-non-alloy-steel-whats-the-difference/

42. Trissot O., Copper Helps Reduce Carbon Emissions in Buildings, Ανακτήθηκε από: https://internationalcopper.org/resource/copper-helps-reduce-carbon-emissions-in-buildings/

43. Tsoumis G.T., Utilization of wood, 2024, Ανακτήθηκε από: https://www.britannica.com/science/wood-plant-tissue/Properties-of-wood

44. UN Enviroment Programme, Chemicals of Concern in the Building and Construction Sector, 2021, Ανακτήθηκε από: https://saicmknowledge.org/sites/default/files/resources/Del_2.1.1_CoC_in_building_products_final.pdf

45. Valle G., 14 Advantages of Using Glass in construction, 2021, Ανακτήθηκε από: https://www.builderspace.com/advantages-of-using-glass-in-construction

46. Valle G., Is stone a sustainable building material?,2022, Ανακτήθηκε από: https://www.builderspace.com/is-stone-a-sustainable-building-material

47. Vitro Architectural Glass, Embodied Carbon and Glass, 2024, Ανακτήθηκε από: https://www.vitroglazings.com/design-resources/sustainability/embodied-carbon-in-glass/

48. Woubishet Z.T., Kassahun A.A.,Embodied Energy and CO_2 Emissions of Widely Used Building Materials: The Ethiopian Context,2019, Ανακτήθηκε από: https://www.mdpi.com/2075-5309/9/6/136

49. Zeeshan M., The copper connection: unveiling its role in building construction, 2024, Ανακτήθηκε από: https://alsyedconstruction.com/the-copper-connection-unveiling-its-role-in-building-construction/