



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική Εργασία

**ΟΛΙΣΤΙΚΕΣ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΤΑΥΤΟΧΡΟΝΗ
ΔΟΜΙΚΗ
ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΝΑΒΑΘΜΙΣΗ
ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΩΝ ΚΤΙΡΙΩΝ**

ΧΑΣΑΠΑΚΗΣ ΜΑΤΘΑΙΟΣ



Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των απαιτήσεων για την απόκτηση του
Διπλώματος Πολιτικού Μηχανικού

ΒΟΛΟΣ 2022

© 2022 Χασαπάκης Ματθαίος

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ. 2).

Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:

Πρώτος Εξεταστής Δρ. Κούτας Λάμπρος
(Επιβλέπων) Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών,
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Δεύτερος Εξεταστής Δρ. Παπακωνσταντίνου Χρήστος
Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών,
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Τρίτος Εξεταστής Δρ. Παναγιώτης Γιουργιώτης
Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών,
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Ευχαριστίες

Πρώτα από όλα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της διπλωματικής μου εργασίας, Επίκουρο Καθηγητή Δρ. Λάμπρο Κούτα, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε και για τις πολύτιμες υποδείξεις του καθόλη τη διάρκεια της δουλειάς μου. Επιπρόσθετα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους συναδέλφους μου γιατί αυτό το γεμάτο γνώση ταξίδι δεν θα ήταν το ίδιο δίχως αυτούς. Επίσης, ευχαριστώ στην κοπέλα μου και στους κοντινούς μου φίλους για την ηθική υποστήριξη και την υπομονή που έδειξαν ιδιαίτερα κατά τους τελευταίους μήνες της προσπάθειάς μου. Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ στη μητέρα μου για την ατέρμονη στήριξη και αγάπη κατά τη διάρκεια των σπουδών μου. Αφιερώνω αυτήν την εργασία στη μητέρα μου και στον πατέρα μου που δεν βρίσκεται πια κοντά μας.

Χασαπάκης Ματθαίος

ΟΛΙΣΤΙΚΕΣ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΤΑΥΤΟΧΡΟΝΗ ΔΟΜΙΚΗ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΝΑΒΑΘΜΙΣΗ ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΩΝ ΚΤΙΡΙΩΝ

Χασαπάκης Ματθαίος
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, 2022

Επιβλέπων Καθηγητής: Κούτας Λάμπρος, Επίκουρος Καθηγητής Π.Θ.

Περίληψη

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η πρόταση της συνδυαστικής δομικής και ενεργειακής αναβάθμισης του υφιστάμενου ευρωπαϊκού κτιριακού αποθέματος. Η ανάλυση της διπλωματικής εργασίας περιορίζεται σε κατασκευές οπλισμένου σκυροδέματος με εμφανιζόμενες τοιχοπληρώσεις. Αρχικά, γίνεται μια σύντομη περιγραφή των κυριότερων χαρακτηριστικών των υφιστάμενων κτιρίων και αναλύεται η δομική τρωτότητα και η ενεργειακή ανεπάρκεια της πλειονότητας των κτιριακών εγκαταστάσεων στην Ευρώπη του σήμερα. Στη συνέχεια παρουσιάζονται, σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία, μέθοδοι δομικής ενίσχυσης μελών οπλισμένου σκυροδέματος και εμφανιζόμενων τοιχοπληρώσεων και αξιολογείται η αποτελεσματικότητά τους. Έπειτα, πραγματοποιείται περιγραφή συμβατικών και καινοτόμων μεθόδων ενεργειακής αναβάθμισης υφιστάμενων κατασκευών. Ακολουθεί περιγραφή των κυριότερων αρχών της ταυτόχρονης αναβάθμισης και παράθεση των λόγων για τους οποίους αποτελεί τη βέλτιστη λύση ενίσχυσης. Επιπλέον, παρατίθενται τεχνικές συνδυαστικής αναβάθμισης υπαρχουσών κατασκευών. Τέλος, παρουσιάζονται τα κυριότερα συμπεράσματα της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

SEISMIC AND ENERGY RETROFITTING OF EXISTING BUILDINGS: HOLISTIC APPROACH

Chasapakis Matthaïos
University of Thessaly, Department of Civil Engineering, 2022

Supervisor: Lampros Koutas, Assistant Professor

Abstract

The purpose of this paper is the proposal of the combined structural and energy upgrade of the existing European building stock. The analysis of the thesis is limited to reinforced concrete structures with infill walls. It starts with a brief description of the main characteristics of existing buildings and it analyzes the structural vulnerability and energy inefficiency of the majority of the current building stock in Europe at the moment. Moreover, methods of structural reinforcement of reinforced concrete members and infill walls are presented and their effectiveness is evaluated according to the international literature. Conventional and innovative methods of energy retrofitting of existing structures are then described followed by the main principles of the concurrent upgrading. The reasons why concurrent upgrading is optimal solution are also explained. In addition, techniques for the combined retrofitting of existing structures are presented. Finally, the main conclusions of this thesis are summarized.

Πίνακας Περιεχομένων
Περίληψη
Περιεχόμενα
Κατάλογος Σχημάτων

Κεφάλαιο 1 : Εισαγωγή.....	1
1.1 Κατασκευαστικός Κλάδος και Ευρωπαϊκή Πραγματικότητα	1
1.2 Στόχοι Ευρωπαϊκής Ένωσης	1
1.2.1 Σχέδια Δράσης	2
1.2.2 Άμεσα Εφαρμόσιμοι Κανονισμοί.....	4
1.3 Υπάρχον Κτιριακό Απόθεμα	6
1.3.1 Απαίτηση Ενεργειακής Αναβάθμισης.....	8
1.3.2 Απαίτηση Δομικής Αναβάθμισης.....	9
1.4 Ταυτόχρονη Ενεργειακή και Δομική Αναβάθμιση.....	11
Κεφάλαιο 2: Δομική Αναβάθμιση Υφιστάμενων Κατασκευών.....	13
2.1 Σεισμική Τρωτότητα	13
2.1.1 Βασικές Μορφές Αστοχίας Μελών Οπλισμένου Σκυροδέματος.....	13
2.2 Συνοπτική Περιγραφή Μεθόδων Δομικής Αναβάθμισης Κατασκευών.....	18
2.2.1 Τοπική Ενίσχυση Μελών Οπλισμένου Σκυροδέματος	18
2.2.3 Καθολική Ενίσχυση Κατασκευών Οπλισμένου Σκυροδέματος	33
2.3 Ενίσχυση Εμφατινόμενων Τοιχοπληρώσεων	41
2.3.1 Το Πρόβλημα	41
2.3.2 Καταπονήσεις Εμφατινόμενων Τοιχοπληρώσεων	44
2.3.3 Υφιστάμενες Τεχνικές Ενίσχυσης Εμφατινόμενων Τοιχοπληρώσεων.....	55
Κεφάλαιο 3: Ενεργειακή Αναβάθμιση Υφιστάμενων Κατασκευών.....	68
3.1 Ενεργειακή Επάρκεια Κατασκευών.....	68
3.1.1 Ιστορική Αναδρομή.....	68
3.1.2 Γενικά για την θερμομόνωση κτιρίων	69
3.1.3 Ευάλωτα Κτιριακά Στοιχεία Κελύφους.....	70
3.1.4 Παθητικά Ενεργειακά Συστήματα	79
3.2 Μέθοδοι Ενεργειακής Αναβάθμισης Κατασκευών.....	83
3.2.1 Συνοπτική Περιγραφή Μονωτικών Υλικών.....	85
3.2.2 Τεχνικές Εφαρμογής Θερμομόνωσης.....	92
4. Ταυτόχρονη Δομική και Ενεργειακή Αναβάθμιση Υφιστάμενων Κατασκευών..	98
4.1 Ολιστική Προσέγγιση Αναβάθμισης	98
4.2 Επίδραση Ταυτόχρονης Αναβάθμισης	100
4.2.1 Όφελος Ταυτόχρονης Αναβάθμισης.....	101
4.3 Τεχνικές Ταυτόχρονης Αναβάθμισης	104
5. Γενικά Συμπεράσματα.....	112
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	116

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1-1 Παράγοντες επηρεασμού αιεφόρας ανάπτυξης κατασκευών (Commission Staff Working Document, 2013).....	2
Σχήμα 1-2 Κατανομή οικιστικών κατασκευών στο ευρωπαϊκό κτιριακό απόθεμα(Buildings Performance Institute BPIE, 2011)	7
Σχήμα 1-3 Χρονολόγηση ανέγερσης κατασκευών ανά την Ευρώπη(Buildings Performance Institute BPIE, 2011)	8
Σχήμα 1-4 Πηγές ενέργειας χρησιμοποιούμενες ανά την Ευρώπη (Buildings Performance Institute, 2011)	9
Σχήμα 1-5 Σεισμικές ζώνες ανά την Ευρώπη (Bournas, 2018).....	10
Σχήμα 2-1 Καμπτική αστοχία υποστυλώματος (Δρίτσος, 2005)	15
Σχήμα 2-2 Διατμητική αστοχία υποστυλώματος (Δρίτσος, 2005)	15
Σχήμα 2-3 Βλάβες σε ακραίους κόμβους (Δρίτσος, 2005).....	16
Σχήμα 2-4 Βλάβες σε μεσαίους κόμβους (Δρίτσος, 2005).....	16
Σχήμα 2-5 Ανάπτυξη εγκάρσιων καμπτικών ρωγμών στο κάτω πέλμα δοκού	17
Σχήμα 2-6 Ανάπτυξη καμπτικών ρωγμών στο άνω πέλμα και ολίσθηση οπλισμού στο κάτω (Δρίτσος, 2005)	18
Σχήμα 2-7 Διατμητική αστοχία δοκού (Δρίτσος, 2005)	18
Σχήμα 2-8 Μορφή μανδύα οπλισμένου σκυροδέματος (www.alfakat.gr)	20
Σχήμα 2-9 Διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης σύνθετων υλικών (Triantafillou, 2007).	22
Σχήμα 2-10 Τύποι δοκιμών κατακόρυφων στοιχείων (Realfonzo et al., 2009)	23
Σχήμα 2-11 Αστοχία υποστυλωμάτων (Realfonzo et al., 2009).....	24
Σχήμα 2-12 Πειραματική διάταξη (Alagusundaramoorthy et al., 2003).....	25
Σχήμα 2-13 Αστοχία δοκιμίου CB11-1F (Alagusundaramoorthy et al., 2003)	26
Σχήμα 2-14 Πειραματική διάταξη (Chen et al., 2016)	27
Σχήμα 2-15 Διατμητική αστοχία ενισχυμένης με ΙΟΠ δοκού (Chen et al., 2016).....	27
Σχήμα 2-16 Περίσφιγξη υποστυλώματος ΟΣ με ΙΑΜ (Bournas et al., 2007)	30
Σχήμα 2-17 Πειραματική διάταξη (Al-Salloum et al., 2012)	31
Σχήμα 2-18 Τυπική διατμητική αστοχία (Al-Salloum et al., 2012).....	32
Σχήμα 2-19 Πειραματική διάταξη (Elsanadedy et al., 2012)	32
Σχήμα 2-20 Τυπική καμπτική αστοχία (Elsanadedy et al., 2012).....	33
Σχήμα 2-21 Χιαστί διαγώνια χαλύβδινα στηρίγματα (Δρίτσος, 2005)	34
Σχήμα 2-22 Τοιχωματοποίηση πλαισίου ΟΣ (Στρεπέλιας, 2012).....	36
Σχήμα 2-23 Οπλισμένη τοιχοποιία σε πλαίσιο ΟΣ (Koutromanos et al., 2011)	38
Σχήμα 2-24 Διάταξη ελαστομερικού εφέδρανου (Nishi et al., 2019).	39
Σχήμα 2-25 Διάταξη εφέδρανου ολίσθησης (Warn et al., 2012).	39
Σχήμα 2-26 Αποσβεστήρας λαδιού (t-mec.co.jp)	40
Σχήμα 2-27 Δομική αστοχία τοιχοπληρώσεων σε πολυώροφες κατασκευές ΟΣ	43
Σχήμα 2-28 (α) Ολίσθηση με δημιουργία πλαστικών αρθρώσεων στα υποστυλώματα (β) Ολίσθηση με δημιουργία πλαστικών αρθρώσεων σε υποστυλώματα και δοκό (γ) Ολίσθηση με διατμητική αστοχία υποστυλωμάτων (Mehrabi et al.,1996).....	45
Σχήμα 2-29 (α) Πολλαπλές ρωγμές ολίσθησης με σχηματισμό πλαστικών αρθρώσεων στα υποστυλώματα (β) Πολλαπλές ρωγμές ολίσθησης με σχηματισμό διατμητικών ρωγμών στα υποστυλώματα (Mehrabi et al., 1996)	46

Σχήμα 2-30 (α) Διαγώνιες ρωγμές με σύνθλιψη στις γωνίες και σχηματισμό πλαστικών αρθρώσεων στα υποστυλώματα (β) και στη δοκό (Mehrabi et al., 1996)	46
Σχήμα 2-31 (α) Διαγώνιες ρωγμές με σύνθλιψη στις γωνίες φόρτισης, σχηματισμό πλαστικών αρθρώσεων στα υποστυλώματα (β) και στη δοκό, και διατμητική ψαθυρή αστοχία υποστυλώματος (Mehrabi et al., 1996).....	46
Σχήμα 2-32 Διαγώνιες ρωγμές με ψαθυρή διατμητική αστοχία στα υποστυλώματα (Mehrabi et al., 1996)	47
Σχήμα 2-33 (α) Διαγώνιες ρωγμές με σύνθλιψη της τοιχοποιίας στις γωνίες και σχηματισμό πλαστικών αρθρώσεων στις θέσεις σύνθλιψης (β) Διαγώνιες ρωγμές με εκτενή σύνθλιψη στο επίπεδο της τοιχοπλήρωσης (Mehrabi et al., 1996)	47
Σχήμα 2-34 Καμπτική παραμόρφωση και αστοχία τοιχοπλήρωσης (Mehrabi et al., 1996).....	48
Σχήμα 2-35 Μορφή αστοχίας σε μη ενισχυμένο πλαίσιο ΟΣ παρουσία πλήρωσης (Selim et al., 2015)	49
Σχήμα 2-36 Μοτίβο ρωγμών (α) κονίαμα χαμηλής αντοχής (β) κονίαμα υψηλής αντοχής (da Porto et al., 2015).....	49
Σχήμα 2-37 Μοτίβο ρωγμών για δοκίμιο ελέγχου (Akhoundi et al., 2017)	50
Σχήμα 2-38 Μορφές καμπτικής εκτός επιπέδου αστοχίας πλήρωσης	51
Σχήμα 2-39 Πειραματική διάταξη εκτός επιπέδου καταπόνησης (Koutas et al., 2018)	52
Σχήμα 2-40 Κατανομή ρωγμών στο επίπεδο της πλήρωσης (Koutas et al., 2018)	52
Σχήμα 2-41 Πειραματική διάταξη εκτός επιπέδου καταπόνησης (Palieraki et al., 2018).....	52
Σχήμα 2-42 Αναπτυσσόμενες ρωγμές στο επίπεδο της πλήρωσης για επιβαλλόμενες μετακινήσεις 5, 30 και 60 mm.....	53
Σχήμα 2-43 Αποτελέσματα συνδυασμού καταπονήσεων σε τοιχοπλήρωση (Palieraki et al., 2018).....	54
Σχήμα 2-44 Αποτέλεσμα συνδυαστικής καταπόνησης σε τοιχοπλήρωση (da Porto et al., 2015).....	55
Σχήμα 2-45 Δοκίμιο ενισχυμένο με χαλύβδινο πλέγμα (Altin et al., 2010)	56
Σχήμα 2-46 Τεχνική ενίσχυσης εμφαντούμενης τοιχοπλήρωσης (Alwashali et al., 2020).....	57
Σχήμα 2-47 Ενισχυμένη τοιχοπλήρωση με χαλύβδινο πλέγμα (Koutromanos et al., 2011).....	58
Σχήμα 2-48 Πειραματική διάταξη (Erol et al., 2015)	60
Σχήμα 2-49 Αστοχία ενισχυμένου δοκιμίου (Erol et al., 2015).....	60
Σχήμα 2-50 Ενισχυμένα δοκίμια με διαγώνιες λωρίδες ΙΟΠ διαφορετικού πλάτους (Altin et al., 2006).....	61
Σχήμα 2-51 Θραύση λωρίδων ΙΟΠ (Altin et al., 2006).....	62
Σχήμα 2-52 Πειραματική διάταξη (Akhoundi et al., 2017)	63
Σχήμα 2-53 Μοτίβο ρωγμών ενισχυμένου δοκιμίου (Akhoundi et al., 2017).....	64
Σχήμα 2-54 Ενισχυμένη εμφαντούμενη τοιχοπλήρωση σε πλαίσιο ΟΣ με ΙΑΜ	65
Σχήμα 2-55 Αστοχία δοκιμίου ελέγχου (Koutas et al., 2015)	65
Σχήμα 2-56 Δοκίμιο εμφαντούμενης τοιχοπλήρωσης σε πλαίσιο οπλισμένου σκυροδέματος (Koutas et al., 2019).....	66
Σχήμα 2-57 Εφαρμογή υφάσματος ΙΑΜ (Koutas et al., 2019).....	67

Σχήμα 3-1 Κτιριακά στοιχεία τα οποία επηρεάζουν την ενεργειακή επάρκεια της κατασκευής (Bournas, 2018).....	72
Σχήμα 3-2 Εφαρμογή θερμομόνωσης στην εξωτερική τοιχοποιία (Bournas, 2018)..	73
Σχήμα 3-3 Εσωτερική θερμομόνωση κατασκευής (Vitouladitis, 2012)	75
Σχήμα 3-4 Εξωτερική θερμομόνωση κατασκευής (Vitouladitis, 2012).....	77
Σχήμα 3-5 Θερμοσιφωνικά πάνελ σε στέγη κατασκευής (https://hellasnrg.gr/passivesolar.html)	82
Σχήμα 3-6 Περιόδους μερικής σκίασης (http://www.kamxis.gr)	83
Σχήμα 3-7 Θερμομονωτικό στρώμα ορυκτοβάμβακα (https://www.encon.co.uk) ...	85
Σχήμα 3-8 Στρώμα διογκωμένης πολυστερίνης (https://ewistore.co.uk).....	86
Σχήμα 3-9 Στρώμα εξηλασμένης πολυστερίνης (https://www.theunderfloorheatingstore.com)	87
Σχήμα 3-10 Πήκτη κυτταρίνης (https://ritewayinsulationcompany.com)	87
Σχήμα 3-11 Αφρός πολυουρεθάνης (https://www.indiamart.com).....	88
Σχήμα 3-12 Μονωτικό πάνελ κενού αέρος (https://www.kingspan.com)	89
Σχήμα 3-13 Πάνελ ευγενών αερίων (https://www.buildinggreen.com)	90
Σχήμα 3-14 Υφασμα αεροπηκτωμάτων (https://www.intdit.com)	91
Σχήμα 3-15 Δομή υλικού νανομόνωσης (Jelle et al., 2010)	91
Σχήμα 3-16 Εξωτερικά τοποθετούμενα στρώματα πετροβάμβακα (Knauf, 2016)....	93
Σχήμα 3-17 Τοποθέτηση στρώματος διογκωμένης πολυστερίνης (Knauf, 2017-03). 94	
Σχήμα 3-18 Εσωτερικά τοποθετούμενο στρώμα εξηλασμένης πολυστερίνης (GreenGuard, 2016)	95
Σχήμα 3-19 Τοποθέτηση κυτταρίνης μέσω ακροφυσίου σε στέγη (US GreenFiber, LLC)	96
Σχήμα 3-20 Θερμοπρόσοψη με εξωτερικά τοποθετημένο αφρό πολυουρεθάνης (Elastogran GmbH).....	97
Σχήμα 4-1 Χάρτης κλιματικών ζωνών (Bournas et al., 2020).....	100
Σχήμα 4-2 Οφέλη ταυτόχρονης αναβάθμισης (Manganelli et al., 2021).	101
Σχήμα 4-3 Περίοδος αποπληρωμής αναβαθμίσεων κατασκευών ανά την Ευρώπη (Rohoryles et al., 2020)	103
Σχήμα 4-4 Χύτευση σκυροδέματος στο εσωτερικό ICF πάνελ (https://www.octaform.com).....	106
Σχήμα 4-5 Διαδικασία εφαρμογής ICF πάνελ (Pertile et al, 2021).....	107
Σχήμα 4-6 Αστοχία ενισχυμένου δοκιμίου (Borri et al., 2015)	109
Σχήμα 4-7 Διάταξη TRMs με θερμομονωτική στρώση (Triantafillou et al., 2017)...	110
Σχήμα 4-8 (α) Επικάλυψη ινοπλεγμάτων με στρώση θερμομονωτικού υλικού (β) Πλάγια όψη ενισχυμένης τοιχοπλήρωσης παρουσία IAM και θερμομονωτικής στρώσης (Triantafillou et al., 2017)	111
Σχήμα 4-9 Αστοχία ενισχυμένου δοκιμίου (Triantafillou et al., 2017).....	111

Κεφάλαιο 1 : Εισαγωγή

1.1 Κατασκευαστικός Κλάδος και Ευρωπαϊκή Πραγματικότητα

Ο κατασκευαστικός τομέας απασχολεί 42 εκατομμύρια Ευρωπαίους πολίτες. Αξίζει να σημειωθεί ότι το 80% του σημερινού κατασκευαστικού τομέα είναι οι οικοδομικές εγκαταστάσεις ενώ το υπόλοιπο 20% αφορά λοιπά έργα υποδομής (Buildings Performance Institute Europe BPIE, 2011). Πρόκειται για μια αλυσίδα επαγγελματιών η οποία ξεκινά από τη βαριά βιομηχανία και την παραγωγή κατασκευαστικών υλικών και καταλήγει στους μελετητές, αρχιτέκτονες και πολιτικούς μηχανικούς, μέχρι και στα συνεργεία εφαρμογής. Γίνεται εύκολα αντιληπτή η επιρροή του κατασκευαστικού τομέα τόσο στη σημερινή ευρωπαϊκή οικονομία όσο και στις ισχύουσες περιβαλλοντικές συνθήκες. Μελέτες της Ευρωπαϊκής Ένωσης αποδεικνύουν ότι οι κατασκευές είναι υπαίτιες για το 38% των σημερινών συνολικών εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (Bournas, 2018). Ο κατασκευαστικός τομέας μπορεί να αποτελέσει μέσο επίτευξης του στόχου απαλλαγής από τις εκπομπές άνθρακα έως το 2050 αλλά και της σταθεροποίησης και μείωσης της κατανάλωσης ενεργειακών αποθεμάτων στην Ευρώπη (Commission Staff Working Document, 2013).

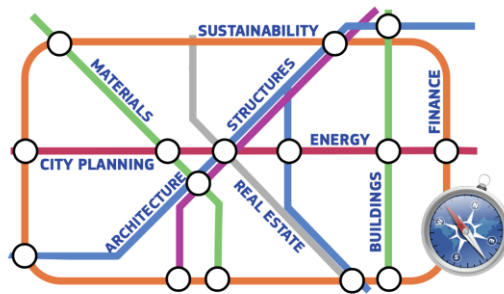
Έχουμε υπάρξει μάρτυρες των καταστροφικών επιπτώσεων των σεισμών στη σημερινή Ευρώπη. Σοβαροί τραυματισμοί, απώλειες ζωής αλλά και σημαντικές οικονομικές επιπτώσεις είναι μονάχα κάποια από τα αποτελέσματα των σεισμικών διεγέρσεων στη σύγχρονη Ευρώπη και ειδικότερα στον ευρωπαϊκό νότο όπου παρατηρείται εκτεταμένη σεισμική δραστηριότητα. Τέλος το μεγαλύτερο μέρος του υπάρχοντος κτιριακού αποθέματος χρονολογείται στο διάστημα 1960-1990 όπου η ανέγερση πραγματοποιούνταν βάσει ανεπαρκών αντισεισμικών κατασκευών.

Συνοψίζοντας, το μεγαλύτερο μέρος των υφιστάμενων κατασκευών στην ευρωπαϊκή επικράτεια παραμένει απροστάτευτο στη σεισμική δραστηριότητα, χαρακτηρίζεται ως ενεργειακά μη αποδοτικό και αφήνει εκτενές περιβαλλοντικό αποτύπωμα. Αυτά είναι και τα προβλήματα τα οποία ταλανίζουν τις κατασκευές και τα οποία πρέπει να αντιμετωπιστούν χάριν της βιωσιμότητας και της άνετης διαβίωσης της Ευρωπαϊκής κοινότητας.

1.2 Στόχοι Ευρωπαϊκής Ένωσης

Αναλογιζόμενοι τον μεγάλο αντίκτυπο του κατασκευαστικού τομέα τόσο κοινωνικοοικονομικά όσο και περιβαλλοντικά, τα τελευταία χρόνια διαμορφώθηκαν τα κατάλληλα πλαίσια και αποτελεσματικές πολιτικές από τα θεσμικά όργανα της Ευρωπαϊκής Ένωσης έτσι ώστε διασφαλιστεί η βιωσιμότητα σε ό,τι αφορά τις κατασκευές. Πρόκειται για

πλαίσια που αφορούν το περιβάλλον και τους πόρους που χρησιμοποιούνται στις κατασκευές. Επίσης ελέγχονται οι δομικές και ενεργειακές επιδόσεις τόσο ενιαίων αστικών περιοχών όσο και μεμονωμένων κατασκευών με συγκεκριμένα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά ανά την Ευρώπη (Bournas, 2018). Τέλος φιλτράρονται οι βιομηχανικές διαδικασίες παραγωγής των οικοδομικών προϊόντων. Κατά αυτόν τον τρόπο, έχει συνταχθεί ένα σφαιρικό πλαίσιο βελτίωσης όλου του φάσματος επιρροής του κατασκευαστικού τομέα.



Σχήμα 1-1 Παράγοντες επηρεασμού αιφύρας ανάπτυξης κατασκευών
(Commission Staff Working Document, 2013)

Βάσει των παραπάνω διακρίνονται δύο μεγάλες κατηγορίες πλαισίων που θεσμοθετήθηκαν αποσκοπώντας στη βελτίωση των ήδη υπάρχουσών συνθηκών :

1. Σχέδια δράσης και οδηγίες σχετικά με τη βελτίωση περιβαλλοντικών παραγόντων, τα οποία αναφέρονται στην επερχόμενη πράσινη πολιτική την οποία σκοπεύει να υιοθετήσει η Ευρωπαϊκή Ένωση. Η συγκεκριμένη πολιτική υπολογίζει τη βιωσιμότητα και την απόδοση των ήδη χρησιμοποιούμενων πόρων, την κλιματική αλλαγή και φυσικά την οικονομία (Bournas, 2018).
2. Κανονισμοί οι οποίοι χρήζουν άμεσης εφαρμογής. Ευρωπαϊκοί κανονισμοί οι οποίοι είναι άμεσα εφαρμόσιμοι, πίνουν όλο το εύρος των διαδικασιών που ακολουθούνται στον κατασκευαστικό τομέα και αφορούν στην ενεργειακή απόδοση υφιστάμενων και μελλοντικών κατασκευών.

1.2.1 Σχέδια Δράσης

- Το 7^ο πρόγραμμα δράσης της Ευρωπαϊκής Ένωσης εστίασε στη βιωσιμότητα των πόλεων και τη βελτίωσή της (Decision No 1386/2013/EU). Χαράχθηκε πλάνο ευεργετικότερης αξιοποίησης των υπάρχοντων πόρων και μείωσης των αποβλήτων. Τέλος λήφθηκαν υπόψιν οι επιπτώσεις στα κλίματα και τα δάση, η συνεχής υποβάθμιση της Ευρωπαϊκής γης και δόθηκε το έναυσμα για την αιφύρα πράσινη οικονομία μέσω της δραστηκής μείωσης των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (Decision No 1386/2013/EU).

- Πλαίσιο οδηγιών για την εξασφάλιση της βιωσιμότητας των αστικών κέντρων. Αφορούσε πολεοδομικό σχεδιασμό των κατοικήσιμων περιοχών και μια αποδοτικότερη χρήση της διαθέσιμης γης σε συνδυασμό με τις μεταφορές εντός των πόλεων. Επιπλέον δόθηκαν κατασκευαστικά πρότυπα για τις νέες κατασκευές, τα οποία προτάθηκε να ακολουθηθούν ώστε να ανοίξει ο δρόμος για τις βιώσιμες κατασκευές. Δεδομένου του ότι ήδη το 2006 παρατηρείτο υπερδόμηση των περισσότερων αστικών κέντρων συντάχθηκαν οδηγίες για την ποιοτική αναβάθμιση υπάρχουσών κατασκευών χαμηλής ενεργειακής επάρκειας (Regulation No 614/2007/EU).
- Πλαίσιο το οποίο αφορούσε στις ύλες οι οποίες χρησιμοποιούνται στις κατασκευές. Πρόκειται για επαναχρησιμοποίηση ήδη υπαρχόντων υλικών χωρίς ή με μερική τροποποίηση (COM(2011) 25 Final). Το βασικότερο σημείο της συγκεκριμένης πολιτικής είναι ότι αποφεύχθηκε η δαπανηρή και καταστροφική για το περιβάλλον παραγωγή προϊόντων τα οποία αφορούν τις κατασκευές. Συνεπώς η ανακύκλωση δομικών προϊόντων απαιτεί πολύ λιγότερη ενέργεια από την εκ νέου παραγωγή τους, μειώνοντας κατά αυτόν τον τρόπο την εκπομπή διοξειδίου του άνθρακα και άλλων αερίων του θερμοκηπίου. Τέλος, τονίστηκε η οικονομική σημασία της ανακύκλωσης, αφού το κόστος της κατασκευής μειώνεται δραστικά (COM(2011) 25 Final).
- Πλαίσιο ευεργετικής αξιοποίησης των πόρων. Αναλύθηκε η επιρροή των κατασκευών στο περιβάλλον αφού η στροφή προς τις βιωσιμότερες κατασκευές ενδέχεται να μειώσει κατά 42% τη συνολική κατανάλωση ενέργειας, κατά 35% την εκπομπή των αερίων του θερμοκηπίου και κυριότερα περίπου κατά 50% την ενιαία εξόρυξη πόρων (COM(2011) 571 Final). Προτάθηκε η ενεργειακή αναβάθμιση υφιστάμενων κατασκευών και η ανέγερση αποδοτικότερων ενεργειακά κτιρίων βάσει σύγχρονων κανονισμών. Τέλος αναφέρθηκαν τα ευεργετικά οφέλη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και της αξιοποίησής τους. Εφαρμόζοντας τα παραπάνω, δύναται να περιοριστούν σε μεγάλο βαθμό οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις οι οποίες πηγάζουν από τον τομέα των κατασκευών.
- Πλαίσιο με οδηγίες επισκευής και αναβάθμισης των υφιστάμενων κατασκευών λόγω της κλιματικής αλλαγής και των επιπτώσεων της. Αφορούσε σε μια ενιαία πολιτική της οποίας κυριότερο μέλημα ήταν η κλιματική προστασία των κατασκευών (COM(2013) 216 Final). Φυσικά, λόγω της έκτασης της σημερινής Ευρώπης παρατηρείται κλιματική ποικιλομορφία, για αυτό και οι κατασκευές δεν απειλούνται

από τα ίδια φυσικά γεγονότα. Οι κυριότερες απειλές για τις κατασκευές είναι βαριές χιονοπτώσεις και έντονες βροχές όπως και ισχυρά θερμικά γεγονότα στα πιο ζεστά κλίματα. Γενικότερα επισημάνθηκε ότι η έκθεση των κτιρίων σε ακραία καιρικά φαινόμενα κάθε λογής αποτελεί κίνδυνο και ενδέχεται να προκαλέσει αναταραχή στην άνετη και ασφαλή διαβίωση των χρηστών (COM(2013) 216 Final).

- Πολιτική της Ε.Ε. η οποία υπογράμμισε τον κύκλο ζωής των προϊόντων που χρησιμοποιούνται στις κατασκευές και τον συνδύαζε με ευεργετικά για την οικονομία κριτήρια (COM(2015) 614 Final). Πιο συγκεκριμένα το πλαίσιο αφορούσε στην ανακύκλωση και επαναχρησιμοποίηση ποικίλων πρώτων υλών, στη διαχείριση των αποβλήτων από τις διαδικασίες παραγωγής και όλα τα παραπάνω σε συνδυασμό με ξεχωριστές προτεραιότητες της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Προτάθηκε η δημιουργία ενιαίου πλαισίου αξιολόγησης υφιστάμενων κατασκευών, δίνοντας κίνητρα για αναβάθμιση κτιρίων των οποίων η κατάσταση το απαιτεί (COM(2015) 614 Final). Μέσω της εφαρμογής των παραπάνω πρόκειται να επιμηκυνθεί η συνολική διάρκεια ζωής των κατασκευών βελτιώνοντας την ανθεκτικότητα τους και ανακυκλώνοντας πόρους που χρησιμοποιήθηκαν για την ανέγερσή τους. Τέλος, οι συγκεκριμένες οδηγίες συντάχθηκαν από την Ευρωπαϊκή Ένωση έτσι ώστε να διασφαλίσουν την ευεργετική λειτουργία των κατασκευών καθόλη τη διάρκεια της ζωής τους, εστιάζοντας στις ύλες που χρησιμοποιούνται κατά την ανέγερση και την ανακύκλωσή τους όταν αυτό απαιτηθεί (COM(2015) 614 Final).

1.2.2 Άμεσα Εφαρμόσιμοι Κανονισμοί

Η στροφή προς φιλικότερες προς το περιβάλλον και δομικά ασφαλέστερες κατασκευές δεν δύναται να καθυστερήσει περαιτέρω. Για αυτόν τον λόγο, η Ευρωπαϊκή Ένωση εξέδωσε αυστηρές οδηγίες τις οποίες τα κράτη μέλη καλούνται να εφαρμόσουν.

- Οδηγία σχετικά με τα απόβλητα και την επαναχρησιμοποίηση των πρώτων υλών η οποία αποδόθηκε στα κράτη μέλη και την οποία κλήθηκαν να ακολουθήσουν. Σύμφωνα με την οδηγία τα κράτη μέλη καλούνται μέχρι το 2020 να θέσουν προς επαναχρησιμοποίηση ή προς διεργασία το 70% των μη επικίνδυνων κατασκευαστικών αποβλήτων (Directive 2008/98/EC). Τέλος σαν μακροπρόθεσμο στόχο η Ευρωπαϊκή Ένωση έθεσε την επιτάχυνση των διαδικασιών ανακύκλωσης και επαναχρησιμοποίησης καθολικά από όλα τα κράτη μέλη. Σήμερα ο μέσος βαθμός ανακύκλωσης στην Ευρώπη υπολογίζεται περίπου στο 46% (Directive 2008/98/EC).

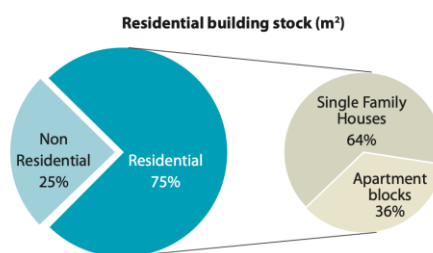
- Οδηγία η οποία αποσκοπούσε στην εισαγωγή διαφόρων ειδών ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές στις κατασκευές (Directive 2009/28/EC). Άμεση εφαρμογή των παραπάνω από τα κράτη μέλη στα νέα δημόσια κτίρια και τις κατασκευές οι οποίες υπόκεινται σε εκτενή αναβάθμιση.
- Πλαίσιο περιορισμού των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα μέσω των κατασκευών (Directive 2010/31/EU). Στόχος ήταν οι ελάχιστες ενεργειακές απαιτήσεις των νέων κατασκευών και η βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης των ήδη υπάρχουσών με βελτίωση ή αντικατάσταση κτιριακών στοιχείων όπως η θερμομόνωση, τα συστήματα ψύξης και θέρμανσης κλπ. Επιπλέον, εισάχθηκε έμπρακτα η ενεργειακή αξιολόγηση των κατασκευών αφού αυστηροποιήθηκε η έκδοση πιστοποιητικών ενεργειακής απόδοσης τα οποία συνοδεύουν τα κτίρια στις πράξεις αγοράς και ενοικίασης (Directive 2010/31/EU). Στόχος της Ευρωπαϊκής Ένωσης ήταν όλα τα νέα κτίρια να είναι μηδενικής ενεργειακής κατανάλωσης μέχρι το τέλος του 2020 και όλα τα δημόσια κτίρια μέχρι το τέλος του 2018 (Directive 2010/31/EU). Στο πλαίσιο πολιτικής της, η Ευρωπαϊκή Ένωση υπογραμμίσε την αποτελεσματικότητα των συστημάτων υψηλής ενεργειακής απόδοσης τα οποία θα συμπεριλάβει σε μελλοντικές οδηγίες.
- Οδηγία περιορισμού των βιομηχανικών εκπομπών. Για να επιτευχθούν οι περιβαλλοντικοί στόχοι της Ευρωπαϊκής Ένωσης δεν αρκούσε να εστιάσουμε στην ενεργειακή απόδοση των κατασκευών, απαιτούταν να βελτιωθεί όλο το εύρος της κατασκευαστικής αλυσίδας ξεκινώντας από την παραγωγή οικοδομικών προϊόντων (Directive 2010/75/EU). Εργοστάσια τσιμέντου, εργαστήρια κεραμικών, γραμμές παραγωγής σύνθετων πολυμερών είναι μόνο κάποιες από τις καθημερινά ακολουθούμενες διεργασίες προς ικανοποίηση της ζήτησης σε υλικά για κατασκευές. Οι διαδικασίες παραγωγής είναι πραγματικά επίπονες για το περιβάλλον, για αυτόν τον λόγο μέσω του πλαισίου της Ευρωπαϊκής Ένωσης, οι αδειοδοτήσεις έγιναν αυστηρότερες και οφείλαν να πληρούν συγκεκριμένα όρια εκπομπών και συγκεκριμένες τιμές επιδόσεων (Directive 2010/75/EU).
- Πλαίσιο κοινής ορολογίας πάνω στα δομικά προϊόντα. Επρόκειτο για την εξασφάλιση ενιαίου κώδικα επικοινωνίας στην αξιολόγηση των επιδόσεων και των χαρακτηριστικών των παραγόμενων κατασκευαστικών υλικών . Οι κατασκευαστές υποχρεώθηκαν να συνοδεύουν τα προϊόντα τους με λεπτομέρειες σχετικά με την επίδοσή τους και τα κράτη μέλη συνένταξαν κανονισμούς σύμφωνα με τις

απαιτήσεις τους (Regulation No 305/2011/EU). Εν συνεχεία υπογραμμίστηκε η βιώσιμη χρήση των παραγόμενων κατασκευαστικών προϊόντων.

- Πλαίσιο σχετικά με την ενεργειακή απόδοση των κατασκευών. Επισημάνθηκε το μερίδιο συμμετοχής των κατασκευών στην επίτευξη των περιβαλλοντικών στόχων του 2020 (Directive 2012/27/EU). Για αυτόν τον λόγο δημιουργήθηκε σχέδιο αναβάθμισης του ήδη υπάρχοντος κτιριακού αποθέματος. Τα κράτη μέλη κλήθηκαν να προσδιορίσουν τις κατάλληλες εθνικές προσεγγίσεις αναβάθμισης των κατασκευών. Το πλάνο ανάχθηκε σε εθνικό επίπεδο αφού η βέλτιστη μέθοδος αναβάθμισης εξαρτάται από τις εκάστοτε τοπικές κλιματικές συνθήκες. Επιπλέον, στο κατάλληλο πλαίσιο ενεργειακής αναβάθμισης υφιστάμενων κατασκευών εντάχθηκε και η παράμετρος της οικονομικότερης λύσης. Εάν και μόνο εάν τονωθούν τα κίνητρα της βαθιάς ανακαίνισης κατασκευών των οποίων η κατάσταση το απαιτεί, τότε μόνο δύναται να επιτευχθούν οι φιλόδοξοι στόχοι που προάγει η ευρωπαϊκή πράσινη πολιτική (Directive 2012/27/EU).

1.3 Υπάρχον Κτιριακό Απόθεμα

Το μεγαλύτερο μέρος των υφιστάμενων κατασκευών στη γηραιά ήπειρο καταλαμβάνεται από κατοικίες. Μόλις το 25% του συνολικού υπάρχοντος κτιριακού αποθέματος αντιστοιχίζεται σε κατασκευές μη οικιστικής χρήσης, όπως γραφεία, χώροι λιανικού και χονδρικού εμπορίου, σχολεία κλπ (Buildings Performance Institute BPIE, 2011). Οι λοιποί τρόποι με τους οποίους δύναται να αξιοποιηθεί μια κατασκευή καθιστούν το συγκεκριμένο μέρος του κτιριακού αποθέματος ιδιαίτερα ποικιλόμορφο. Εν συνεχεία, παρατηρούνται διαφορές στα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά ανάλογα με τα πρότυπα χρήσης της εκάστοτε κατασκευής, επισημαίνοντας κατά αυτόν τον τρόπο την πολυπλοκότητα των μη οικιστικών κατασκευών. Οι εμπορικές κατασκευές, χώροι λιανικού εμπορίου και αποθήκες, καταλαμβάνουν το 32% του κτιριακού αποθέματος, τα γραφεία το 28%, σχολεία και πανεπιστήμια να ακολουθούν με το 17% και τέλος με τα εστιατόρια, τα νοσοκομεία και τις αθλητικές εγκαταστάσεις να έπονται της αλυσίδας (Bournas, 2018).



Σχήμα 1-2 Κατανομή οικιστικών κατασκευών στο ευρωπαϊκό κτιριακό απόθεμα (Buildings Performance Institute BPIE, 2011)

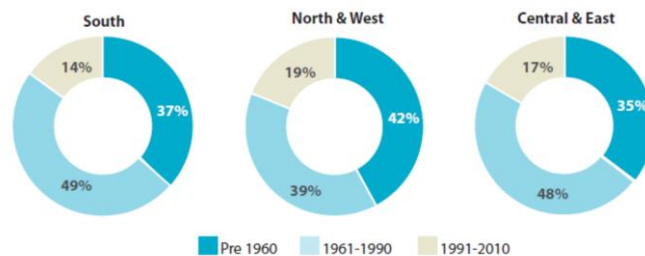
Στις χώρες της βόρειας και δυτικής Ευρώπης παρατηρείται η μεγαλύτερη αντιστοιχία επιφάνεια ανά κάτοικο, ενώ στις χώρες την ανατολικής και κεντρικής η μικρότερη δυνατή. Τα πρότυπα χώρου είναι άρρηκτα συνδεδεμένα με την τοποθεσία της κατασκευής και κατά επέκταση με τα κοινωνικοοικονομικά κριτήρια τα οποία τη χαρακτηρίζουν. Το μέγεθος της χώρας, ο πλούτος των πολιτών και η ζήτηση από το κοινό προς αξιοποίηση των κατασκευών επηρεάζουν καταλυτικά τα κατασκευαστικά πρότυπα ανά την Ευρώπη (Pohoryles et al., 2020). Το κλίμα της εκάστοτε περιοχής είναι ακόμη ένας παράγοντας ο οποίος επηρεάζει το μέγεθος και την τεχνοτροπία των κατασκευών. Αξίζει να σημειωθεί ότι τα τελευταία χρόνια παρατηρείται η προσπάθεια εξασφάλισης μεγαλύτερου χώρου στις κατασκευές, τάση η οποία σε συνδυασμό με τη ραγδαία αύξηση των πληθυσμών προοικονομεί έντονες περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Προστίθεται λοιπόν ακόμη ένας λόγος για τον οποίο η ευρωπαϊκή κοινότητα καλείται να στραφεί στην βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων.

Εκτός από το μέγεθος και τα πρότυπα κατασκευής και χρήσης της εκάστοτε εγκατάστασης, ένας πολύ σημαντικός παράγοντας προς τη διάδοση του ρεύματος της κτιριακής αναβάθμισης είναι οι τίτλοι ιδιοκτησίας. Έχει γίνει ξεκάθαρο, ότι για να επιτευχθεί αποτελεσματικός ρυθμός αναβάθμισης κατασκευών πρέπει να δοθούν τα κατάλληλα κίνητρα στους ευρωπαίους πολίτες έτσι ώστε να στραφούν σε τέτοιου είδους επενδύσεις (Pohoryles et al., 2020). Το γεγονός ότι τα περισσότερα κτίρια στη σημερινή Ευρώπη είναι ιδιόκτητα, ανοίγει τον δρόμο για τις ανακαινίσεις και την επίτευξη των περιβαλλοντικών πολιτικών της σύγχρονης Ευρώπης. Η δομή της ιδιοκτησίας στο υπάρχον κτιριακό απόθεμα είναι καθαρά ιδιωτική στο μεγαλύτερο μέρος της Ευρώπης. Το 20% των οικιστικών εγκαταστάσεων ανήκουν σε δημόσιους πάροχους, ενώ τα τελευταία χρόνια παρατηρείται συμμετοχή ιδιωτικών φορέων στις κοινωνικές κατοικίες, αυξάνοντας κατά αυτόν τον τρόπο τα ποσοστά ιδιωτικότητας (Buildings Performance Institute BPIE, 2011). Επιπλέον αξίζει να σημειωθεί ότι το 50% των εν λόγω ιδιωτικών οικιστικών κτιρίων, κατοικείται από τον ίδιο τον ιδιοκτήτη, στοιχείο αρκετά ενθαρρυντικό για τις επερχόμενες ανακαινίσεις. Στο υπόλοιπο 50% εντάσσονται χώρες με υψηλά ποσοστά ενοικιαστών όπως η Ελλάδα και χώρες με μεγάλο αριθμό δημόσια μισθωμένων κτιρίων όπως το Ηνωμένο Βασίλειο (Buildings Performance Institute, 2011). Τέλος, οι τίτλοι ιδιοκτησίας που αφορούν μεγάλες μη οικιστικές εγκαταστάσεις είναι πιο περίπλοκοι. Η υψηλή ιδιωτικότητα χαρακτηρίζει και αυτό

το είδος κατασκευών με τα ποσοστά ωστόσο να κυμαίνονται μεταξύ 20-90 % και να διαφοροποιούνται ανά κράτος μέλος (Buildings Performance Institute BPIE, 2011).

1.3.1 Απαιτήση Ενεργειακής Αναβάθμισης

Πολλές μεγάλες πόλεις της Ευρώπης θεωρούνται σημαντικά ιστορικά κέντρα με εκτενή αρχιτεκτονική παράδοση. Για αυτόν τον λόγο, μεγάλο μέρος του υπάρχοντος κτιριακού αποθέματος να είναι πολλών εκατοντάδων ετών, προσδίδοντας σε αυτά τα κτίρια εκτός από χρηστικό και πολιτιστικό χαρακτήρα (Buildings Performance Institute BPIE, 2011). Ωστόσο η πλειονότητα των υφιστάμενων κατασκευών χρονολογείται στην δεκαετία του 1960, περίοδο όπου δεν είχαν ακόμη θεσμοθετηθεί οι κατάλληλοι κανονισμοί ενεργειακής απόδοσης των κατασκευών και λησμονούταν ο περιβαλλοντικός αντίκτυπος που ενδέχεται να είχε το κτίριο μακροπρόθεσμα (Pohoryles et al., 2020). Το διάστημα 1960-1990 παρατηρείται ταχύς ρυθμός ανάπτυξης των κατασκευών χωρίς όμως να αναθεωρούνται οι ισχύοντες ενεργειακοί κανονισμοί. Η ελλιπής διασφάλιση της ενεργειακής επάρκειας των κτιρίων τις δεκαετίες όπου παρατηρήθηκε έντονη άνθηση στις κατασκευές, σε συνδυασμό με τον μικρό ρυθμό δόμησης, μόλις 1% ανά έτος, τις δεκαετίες όπου συντάχθηκαν συμπαγείς περιβαλλοντικοί κανονισμοί, καθιστούν το υπάρχον ευρωπαϊκό κτιριακό απόθεμα μη ενεργειακά βιώσιμο (Pohoryles et al., 2020).

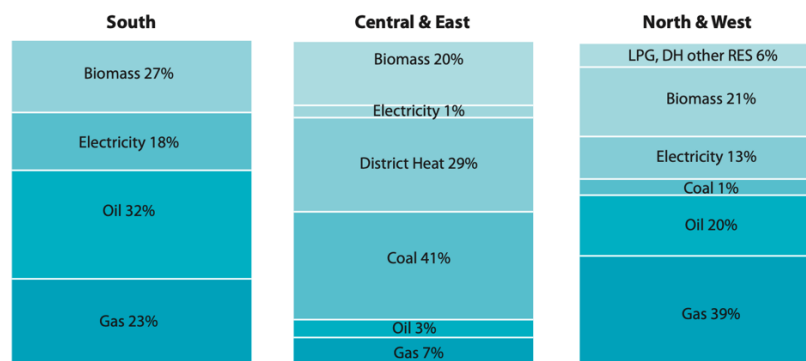


Σχήμα 1-3 Χρονολόγηση ανέγερσης κατασκευών ανά την Ευρώπη (Buildings Performance Institute BPIE, 2011)

Λόγω της υπερδόμησης των ευρωπαϊκών αστικών κέντρων σε συνδυασμό με τον ελλιπή ρυθμό ανάπτυξης νέων κατασκευών, η προσοχή πρέπει να εστιαστεί στην αναβάθμιση. Με ετήσιο ρυθμό κατασκευής νέων κτιρίων 1-2% και ρυθμό ενεργειακής αναβάθμισης 0.5-1.2% ανά έτος υπολογίζεται ότι δύναται να επιτευχθούν οι φιλόδοξοι ενεργειακοί στόχοι της Ευρωπαϊκής Ένωσης (Bournas, 2018). Αξίζει να σημειωθεί ότι οι υπάρχουσες κατασκευές αποτελούν μεγάλη αποθήκη δομικών υλικών. Τα υλικά αυτά δύναται να τροποποιηθούν έτσι ώστε να συμβάλλουν στην αύξηση της ενεργειακής απόδοσης της κατασκευής. Τέλος, οι επίπονες για το περιβάλλον διαδικασίες παραγωγής

περιβαλλοντικών προϊόντων επιβραδύνονται και υπογραμμίζεται η επενδυτική χροιά της ενεργειακής αναβάθμισης αφού αποτελεί την οικονομικότερη λύση (Pohoryles et al., 2020).

Οι κατασκευές οικιστικές και μη, θεωρούνται από τους σημαντικότερους καταναλωτές ενέργειας. Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται αυξημένη ζήτηση ενεργειακών αναγκών. Έρευνες της Ευρωπαϊκής Ένωσης θεωρούν τα ευρωπαϊκά νοικοκυριά υπεύθυνα για το 68% της συνολικά καταναλισκόμενης ενέργειας (Buildings Performance Institute BPIE, 2011). Η ενέργεια στις οικιστικές κατασκευές πρακτικά καταναλώνεται με λειτουργίες οι οποίες κάνουν τη διαβίωση των χρηστών πιο άνετη όπως το ζεστό νερό, το μαγείρεμα κλπ. Φυσικά, υπεύθυνοι για τη δαπάνη υπέρογκων ποσών καταναλωμένης ενέργειας είναι η θέρμανση και η ψύξη εσωτερικών χώρων. Όλες οι περιοχές ανά την επικράτεια της Ευρώπης δεν έχουν τις ίδιες ανάγκες, ωστόσο υπολογίζεται ότι το 70% της ενέργειας που καταναλώνεται στην Ευρώπη αφορά την θέρμανση και την ψύξη κτιριακών εγκαταστάσεων (Buildings Performance Institute, 2011). Το συνηθέστερο σε χρήση καύσιμο είναι το φυσικό αέριο με τις εγκαταστάσεις του να επεκτείνονται με ραγδαίο ρυθμό σε όλη την επικράτεια. Η χρήση του πετρελαίου είναι ιδιαίτερα αυξημένη στον νότο της Ευρώπης, ωστόσο τείνει να αντικατασταθεί σταδιακά από το φυσικό αέριο. Εν συνεχεία, στην κεντρική και ανατολική Ευρώπη παρατηρείται η υψηλότερη χρήση πετρελαίου για οικιστικούς λόγους. Τέλος, οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ηλιακή ενέργεια, τηλεθέρμανση, απόβλητα κλπ.) παρουσιάζουν την μικρότερη απήχηση στις περισσότερες περιοχές (Bournas, 2018).

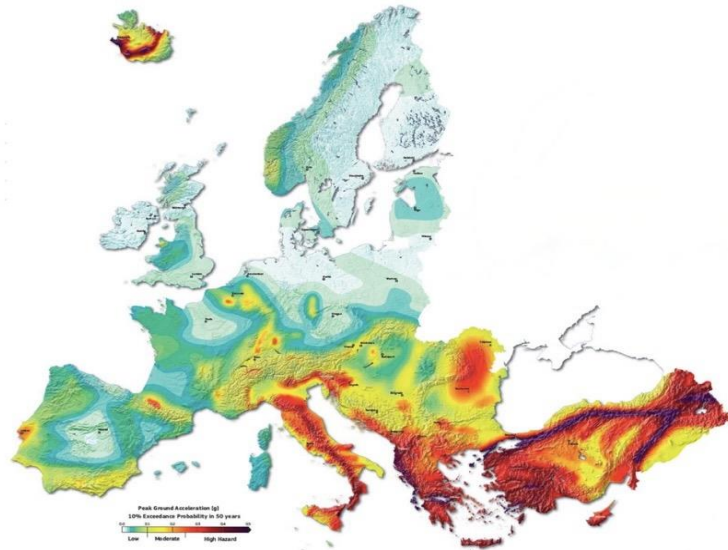


Σχήμα 1-4 Πηγές ενέργειας χρησιμοποιούμενες ανά την Ευρώπη (Buildings Performance Institute, 2011)

1.3.2 Απαίτηση Δομικής Αναβάθμισης

Από το 1980 μέχρι και το 2014 η Ευρώπη αριθμεί περισσότερους από 33.000 θανάτους και 62 δις ευρώ οικονομικές απώλειες εξαιτίας των σεισμών (Buildings Performance Institute BPIE, 2011). Όλες οι χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης δεν διατρέχουν τον ίδιο κίνδυνο σε περίπτωση σεισμού. Ειδικότερα οι πιο σεισμογενείς περιοχές

συγκεντρώνονται στα νοτιοανατολικά. Η χώρα μας και οι εκατέρωθεν γείτονές της, Ιταλία, Τουρκία και Βαλκάνια θεωρούνται οι πιο σεισμογενείς ευρωπαϊκές περιοχές. Τρανή απόδειξη του ανεξέλεγκτου χαρακτήρα των σεισμών είναι ότι χώρες χαμηλής επικινδυνότητας όπως η Πορτογαλία έχουν ζήσει τις καταστροφικές επιπτώσεις σεισμών μεγάλης έντασης (Pohoryles et al., 2020).



Σχήμα 1-5 Σεισμικές ζώνες ανά την Ευρώπη (Bournas, 2018).

Η παρατήρηση των καταστροφικών επιπτώσεων των σεισμών βοήθησε στη ραγδαία ανάπτυξη της αντισεισμικής μηχανικής, η οποία εντάσσεται στους νεοσύστατους αυστηρούς αντισεισμικούς κανονισμούς. Ωστόσο, όπως επισημάνθηκε παραπάνω, το μεγαλύτερο μέρος του υπάρχοντος κτιριακού αποθέματος κατασκευάστηκε τις δεκαετίες 1960-1990, δεκαετίες κατά τη διάρκεια των οποίων η σύνταξη και εφαρμογή των εν λόγω κανονισμών ήταν ελλιπής. Η συγκεκριμένη παρατήρηση γίνεται έμπρακτα κατανοητή όταν σεισμοί μεγάλης έντασης χτυπούν την Ευρώπη και αφήνουν ανυπολόγιστες οικονομικές και κοινωνικές απώλειες στο πέρασμά τους.

Πρακτικά γίνεται λόγος για κατασκευές με ελλιπή λειτουργικότητα και ασφάλεια σύμφωνα με τα τωρινά δεδομένα. Τα συγκεκριμένα κτίρια χαρακτηρίζονται από έντονη τρωτότητα στη σεισμική δραστηριότητα όχι μόνο λόγω των ελλিপών προτύπων κατασκευής αλλά και εξαιτίας της γήρανσης. Κάθε κατασκευή διέπεται από έναν κύκλο ζωής, ένα χρονικό διάστημα κατά το οποίο θεωρείται ασφαλής και λειτουργική για τους χρήστες (Bournas, 2018). Με την πάροδο των ετών, τα οικοδομικά υλικά φθείρονται, χάνοντας τη λειτουργικότητα τους και καθιστώντας το σύνολο της κατασκευής μη ασφαλές.

Το μεγαλύτερο μέρος των ευρωπαϊκών οικιστικών και μη εγκαταστάσεων κατασκευάστηκαν δεκαετίες κατά την διάρκεια των οποίων, ο αντισεισμικός σχεδιασμός

βρισκόταν σε πρώιμο στάδιο. Το διάστημα 1960-1990 δινόταν μεγάλη έμφαση στα φορτία βαρύτητας. Δεν εκπονούνταν κατάλληλοι έλεγχοι προσδιορισμού των δυνατών τρόπων αστοχίας, δεν λαμβανόταν υπόψιν η ελαστική συμπεριφορά των κατασκευών και παρατηρούνταν κακής ποιότητας κατανομή της δυσκαμψίας στο σύνολο της κατασκευής (Τριανταφύλλου et al., 2019).

Συνοψίζοντας τα παραπάνω, το υπάρχον κτιριακό απόθεμα διατρέχει σοβαρό κίνδυνο εξαιτίας της σεισμικής δραστηριότητας η οποία χαρακτηρίζει τη σημερινή Ευρώπη. Η πλειονότητα των κατασκευών όχι μόνο δεν πληροί σύγχρονους αντισεισμικούς κανονισμούς αλλά ενδέχεται να έχει κατασκευαστεί χωρίς επαρκείς αντισεισμικές διατάξεις (Pohoryles et al., 2020). Το γεγονός αυτό εγκυμονεί σοβαρούς κινδύνους για τις υπάρχουσες κατασκευές και για την ασφαλή διαβίωση των χρηστών. Επιπροσθέτως, είναι απαραίτητο να διασφαλιστεί και να προστατευτεί η αρχιτεκτονική και πολιτιστική ταυτότητα των ευρωπαϊκών κατασκευών. Δεν λησμονείται, κυρίως λόγω των μεγάλων ποσοστών ιδιωτικότητας, ότι οι κατασκευές αποτελούν περιουσιακό στοιχείο των πολιτών, το οποίο η ευρωπαϊκή κοινότητα οφείλει να προφυλάξει. Μολονότι τα τελευταία χρόνια παρατηρείται μεγάλη πρόοδος τόσο στην αντισεισμική μηχανική όσο και στην εξέλιξη και βελτίωση των δομικών προϊόντων, η μεγάλη ποικιλομορφία στις κατασκευαστικές μεθόδους και τα δομικά χαρακτηριστικά δυσχεραίνει την εφαρμογή των σύγχρονων αντισεισμικών κανονισμών στις ήδη υπάρχουσες κατασκευές. Δεδομένου ότι η εφαρμογή των σημερινών προτύπων στο υπάρχον κτιριακό απόθεμα θεωρείται αδύνατη, τα βλήματα στρέφονται στην ενίσχυση και την αναβάθμιση των κατασκευών. Αναπτύσσονται μέθοδοι, τεχνοτροπίες και υλικά που μπορούν να εφαρμοστούν στις υπάρχουσες κατασκευές βελτιώνοντας τη δομική ανταπόκριση, πάντα σεβόμενοι τα επιτρεπτά περιθώρια παρεμβολής.

1.4 Ταυτόχρονη Ενεργειακή και Δομική Αναβάθμιση

Όπως επισημάνθηκε παραπάνω, η πλειονότητα του υπάρχοντος κτιριακού αποθέματος χρήζει άμεσης αναβάθμισης. Δεδομένου ότι η αντικατάσταση πολυάριθμων κατασκευών είναι ιδιαίτερα δαπανηρή, η κατεδάφιση εντός αστικών κέντρων εγκυμονεί ανυπολόγιστες περιβαλλοντικές επιπτώσεις και η αρχιτεκτονική και πολιτιστική κληρονομιά οφείλει να διασφαλιστεί, είναι ξεκάθαρο ότι η κτιριακή αναβάθμιση αποτελεί τη βέλτιστη λύση (Pohoryles et al., 2020).

Τις τελευταίες δεκαετίες, σε συνδυασμό με την ανάπτυξη συμπαγούς περιβαλλοντικής πολιτικής από την Ευρωπαϊκή Ένωση, παρατηρήθηκε αυξητικός ρυθμός ενεργειακής αναβάθμισης κατασκευών. Παρ' όλα αυτά, η μεμονωμένη ενεργειακή

αναβάθμιση των κατασκευών δεν είναι αρκετή για να αντιμετωπίσει τα προβλήματα που ταλαιπωρούν το υπάρχον ευρωπαϊκό κτιριακό απόθεμα ειδικά σε κράτη μέλη με υψηλή σεισμική δραστηριότητα (Pohoryles et al., 2020). Οφείλουμε ταυτοχρόνως να προστατεύσουμε και να εκσυγχρονίσουμε τις ήδη υπάρχουσες κατασκευές.

Η τόνωση του ρεύματος της αναβάθμισης εξαρτάται από πολλούς παράγοντες. Πρέπει να δημιουργηθούν κατάλληλες συνθήκες ευαισθητοποίησης πάνω στη δομική τρωτότητα και την ελλιπή ενεργειακή απόδοση η οποία χαρακτηρίζει την πλειονότητα των κατασκευών. Εν συνεχεία, πρέπει να δημιουργηθούν τα κατάλληλα πλαίσια προώθησης της συνδυαστικής αναβάθμισης ως βέλτιστη λύση, έτσι ώστε το ευρωπαϊκό κοινό να αντιληφθεί την κρισιμότητα της κατάστασης και τα ευεργετικά οφέλη της ολιστικής προσέγγισης. Πρέπει να καθοριστούν κατευθυντήριες γραμμές όσον αφορά τις ήδη υπάρχουσες μεθόδους αναβάθμισης και το πώς δύναται να τροποποιηθούν ώστε να επιτευχθεί δομική ανθεκτικότητα και ενεργειακή επάρκεια (Pohoryles et al., 2020). Η Ευρωπαϊκή Ένωση οφείλει να εντάξει την συνδυαστική αναβάθμιση στα πλαίσια πολιτικής της δίνοντας τα κατάλληλα κίνητρα στους πολίτες να προβούν στις απαιτούμενες αναβαθμίσεις. Η ολιστική ενίσχυση των κατασκευών αποτελεί επένδυση, η οποία ειδικότερα στις χώρες με υψηλή σεισμική δραστηριότητα ενδέχεται να έχει μικρότερο χρόνο αποπληρωμής από τις ξεχωριστές αναβαθμίσεις (Pohoryles et al., 2020). Τέλος, με τα κατάλληλα κίνητρα αναμένεται ο τρέχον ρυθμός αναβάθμισης (1%) να διπλασιαστεί. Αξίζει να σημειωθεί ότι ελπιδοφόρα με ενδεχόμενο τριπλασιασμό του τρέχοντος ρυθμού αναβάθμισης και με ταυτόχρονη προτεραιότητα αναβάθμισης των πιο ενεργοβόρων κτιρίων δύναται να επιτευχθούν οι φιλόδοξοι στόχοι της Ευρωπαϊκής Ένωσης για μηδενισμό των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα μέχρι το 2050.

Κεφάλαιο 2: Δομική Αναβάθμιση Υφιστάμενων Κατασκευών

2.1 Σεισμική Τρωτότητα

Η κατάρρευση κτιρίων και η μερική ή ολική αστοχία δομικών μελών οπλισμένου σκυροδέματος συντέλεσαν στην διεύρυνση του γνωστικού επιπέδου σχετικά με την τρωτότητα των κατασκευών. Μέσω της καταγραφής της συμπεριφοράς των κτιρίων έναντι των σεισμικών φορτίσεων εξήχθη το συμπέρασμα ότι οι κατασκευές οπλισμένου σκυροδέματος χαρακτηρίζονται από ελλιπή αντισεισμικό σχεδιασμό. Σχεδιασμός βάσει των βαρυτικών δυνάμεων, δηλαδή των κατακόρυφων φορτίων χωρίς να ληφθούν υπόψιν οι σεισμικές καταπονήσεις, καθιστά την κατασκευή ευαίσθητη στις σεισμικές διεγέρσεις.

Η απουσία ικανοτικού σχεδιασμού στις παλαιότερες κατασκευές είναι ακόμη ένα χαρακτηριστικό υπεύθυνο για την τρωτότητά τους (Κούτσας, 2015). Με τον όρο ικανοτικό σχεδιασμό περιγράφεται η προσπάθεια εξασφάλισης για τις κατασκευές, της ικανότητας απορρόφησης ενέργειας από τις επιβαλλόμενες δυνάμεις, απουσία μερικής ή ολικής κατάρρευσης (Κ. Σπυράκος, 2021). Ο ικανοτικός σχεδιασμός εκμεταλλεύεται την αντοχή του συνόλου της κατασκευής σε συνδυασμό με την ιεράρχηση των ενδεχόμενων βλαβών και την εξασφάλιση εκδήλωσής τους με συγκεκριμένη σειρά. Η έλλειψη πλαστιμότητας των μελών, δηλαδή η ικανότητά τους να παραμορφώνονται, σε περιοχές όπως τα άκρα των υποστυλωμάτων είναι ακόμη ένα χαρακτηριστικό των παλαιότερων κατασκευών. Οι περιοχές αυτές ονομάζονται κρίσιμες, δεδομένου ότι τα σημεία αυτά των δομικών στοιχείων ενδέχεται να διαρρεύσουν κατά τον σεισμό. Τέλος η εκκεντρότητα του κέντρου μάζας με το κέντρο δυσκαμψίας της κατασκευής σε κάτοψη καθιστά το σύνολο του κτιρίου σεισμικά ευαίσθητο.

Βάση των παραπάνω γίνεται αντιληπτή η ευπάθεια της πλειονότητας των κατασκευών έναντι σεισμικής διέγερσης. Απαραίτητη κρίνεται η δομική αναβάθμιση των μελών οπλισμένου σκυροδέματος οι οποίες χαιρούν των παραπάνω χαρακτηριστικών. Παρακάτω αναλύονται οι βασικές μορφές αστοχίας μελών οπλισμένου σκυροδέματος οι οποίες εντοπίζονται στις υφιστάμενες κατασκευές.

2.1.1 Βασικές Μορφές Αστοχίας Μελών Οπλισμένου Σκυροδέματος

Στο σημείο αυτό θα πραγματοποιηθεί ταξινόμηση των συνηθέστερων βλαβών οι οποίες εντοπίζονται σε μέλη οπλισμένου σκυροδέματος τα οποία απαρτίζουν τις κατασκευές.

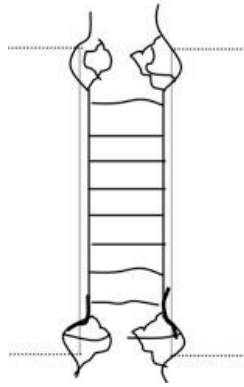
- **Βλάβες σε Υποστυλώματα**

Οι βλάβες στα υποστυλώματα της κατασκευής είναι σύνηθες αποτέλεσμα των σεισμικών διεγέρσεων. Η ανάλυση και αξιολόγησή τους αποτελεί προτεραιότητα για τους μηχανικούς δεδομένης της σημασίας τους, αφού δύναται να οδηγήσουν σε μερική ή ακόμη και σε ολική κατάρρευση της κατασκευής (Δρίτσος, 2005). Οι βλάβες στα υποστυλώματα μπορεί να είναι καμπτικού ή διατμητικού χαρακτήρα και η κατηγοριοποίηση της βλάβης εξαρτάται από τη συσχέτιση της καμπτικής και της διατμητικής καταπόνησης του υποστυλώματος (Δρίτσος, 2005). Μολονότι είναι δύσκολο να υπάρξει σαφές αριθμητικό κριτήριο το οποίο να κατηγοριοποιεί τη βλάβη, όπως επισημαίνεται στη βιβλιογραφία υποστυλώματα μεγάλου ύψους και μικρής διατομής θεωρούνται ευάλωτα στην κάμψη ενώ στην αντίθετη περίπτωση ευάλωτα στη διάτμηση.

1) Καμπτική Αστοχία

Οι βλάβες καμπτικού χαρακτήρα εντοπίζονται στη βάση και τη κορυφή των κατακόρυφων υποστυλωμάτων αφού στα σημεία αυτά παρατηρείται μεγαλύτερη καμπτική ένταση. Οι καμπτικές βλάβες οφείλονται στον ανεπαρκή διατμητικό οπλισμό και το μέγεθος της ρωγμής που προκαλείται είναι αντίστοιχο της βλάβης.

Ο σοβαρότερος τύπος καμπτικής βλάβης έχει ψαθυρό χαρακτήρα και εμφανίζεται σε στοιχεία με μεγάλα θλιπτικά φορτία από ταυτόχρονη ύπαρξη κάμψης και διάτμησης. Ο συγκεκριμένος τύπος βλάβης οδηγεί σε εγκάρσια διόγκωση του σκυροδέματος που συνοδεύεται από διαρροή ή θραύση των συνδετήρων στο σημείο της βλάβης που οδηγεί σε βράχυνση του υποστυλώματος και λυγισμό του κατακόρυφου οπλισμού (Δρίτσος, 2005). Συναντάται σε υποστυλώματα με διατομή μικρότερη από την απαιτούμενη τα οποία γειτνιάζουν με κόμβους στους οποίους συντρέχουν ισχυρές δοκοί. Η συγκεκριμένη βλάβη θεωρείται ιδιαίτερα επικίνδυνη για τη κατασκευή λόγω της ψαθυρότητας της αστοχίας, τη σημαντική μείωση της δυσκαμψίας και την αδυναμία μεταφοράς κατακόρυφων φορτίων μετά την εμφάνισή της (Δρίτσος, 2005). Όσα προαναφέρθηκαν φαίνονται επαρκέστερα στο παρακάτω σχήμα.

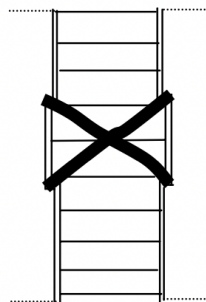


Σχήμα 2-1 Καμπτική αστοχία υποστυλώματος (Δρίτσος, 2005)

2) Διατμητική Αστοχία

Οι διατμητικές βλάβες εντοπίζονται σε υποστυλώματα με μικρό λόγο διάτμησης, σε περιοχές με μεγάλη διατμητική αδυναμία. Οι διατμητικές βλάβες δεν εμφανίζονται κατά κανόνα σε άκρα υποστυλωμάτων. Για μικρούς λόγους διάτμησης, οι οποίοι συναντώνται σε κοντά υποστυλώματα η εμφάνιση τέτοιων βλαβών είναι ιδιαίτερα συνήθης. Συμπεριφορά κοντού υποστυλώματος παρουσιάζουν και υποστυλώματα μεγαλύτερων διαστάσεων σε περιπτώσεις όπου οι οριζόντιες μετακινήσεις εμποδίζονται από δύσκαμπτα κατασκευαστικά στοιχεία (Δρίτσος, 2005).

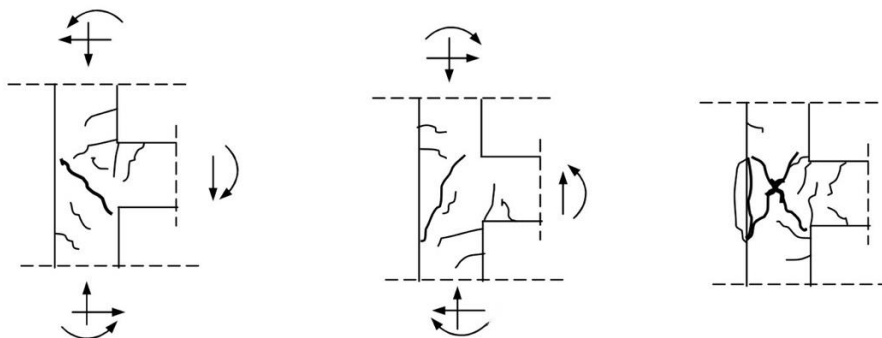
Αξίζει να σημειωθεί πώς οι διατμητικού τύπου βλάβες έχουν ψαθυρό χαρακτήρα και θεωρούνται επικίνδυνες για την ακεραιότητα της κατασκευής. Επιπλέον, η χαμηλή ποιότητα σκυροδέματος και ο ανεπαρκής διατμητικός οπλισμός είναι αιτίες εμφάνισης των συγκεκριμένων βλαβών. Όσον αφορά τη μορφή των συγκεκριμένων βλαβών, εμφανίζονται στο μέσο του κατακόρυφου υποστυλώματος και πολλές φορές έχουν χιαστί μορφή όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα (Δρίτσος, 2005).



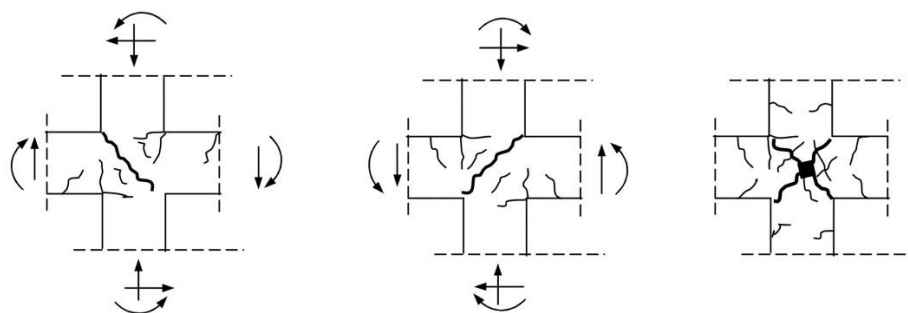
Σχήμα 2-2 Διατμητική αστοχία υποστυλώματος (Δρίτσος, 2005)

- **Βλάβες σε Κόμβους Δοκών Υποστυλωμάτων**

Μέσω της παρατήρησης των καταστρεπτικών επιπτώσεων των σεισμών έχει εξαχθεί το συμπέρασμα ότι οι κόμβοι δοκών υποστυλωμάτων αποτελούν ένα από τα πλέον ευπαθή στοιχεία των κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος (Δρίτσος, 2005). Όπως επισημαίνει ο Δρίτσος (2005), το συμπέρασμα αυτό οφείλεται στο ότι η διατμητική ένταση στους κόμβους είναι ιδιαίτερα υψηλή. Επιπρόσθετα, οι κόμβοι αποτελούν σημεία με χαμηλή ποιότητα σκυροδέτησης κυρίως λόγω της παρουσίας πυκνής όπλισης. Συμπερασματικά οι βλάβες στους κόμβους σύνδεσης θεωρούνται κρίσιμες για την ακεραιότητα της κατασκευής. Ακόμη και ρωγμές μικρού εύρους στους κόμβους δοκού υποστυλώματος λαμβάνονται ως επικίνδυνες και αντιμετωπίζονται ως σοβαρότερες βλάβες από ότι ρωγμές αντίστοιχου εύρους στα υπόλοιπα δομικά στοιχεία (Δρίτσος, 2005). Στα παρακάτω σχήματα διακρίνονται επαρκέστερα διάφορες βλάβες σε ακραίους και μεσαίους κόμβους.



Σχήμα 2-3 Βλάβες σε ακραίους κόμβους (Δρίτσος, 2005)

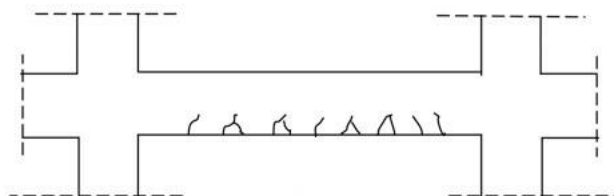


Σχήμα 2-4 Βλάβες σε μεσαίους κόμβους (Δρίτσος, 2005)

- **Βλάβες σε Δοκούς**

Οι βλάβες σε δοκούς είναι εξίσου συνήθεις με τις βλάβες οι οποίες προαναφέρθηκαν. Δύναται να προκληθούν είτε εξαιτίας σεισμών είτε εξαιτίας κατακόρυφων φορτίων (Δρίτσος, 2005). Η εμφάνισή τους θεωρείται συχνότερη από τις βλάβες στα υποστυλώματα ωστόσο θεωρούνται λιγότερο επικίνδυνες.

Η συχνότερη βλάβη η οποία εντοπίζεται στις δοκούς εξαιτίας σεισμικής διέγερσης αφορά την εμφάνιση εγκάρσιων καμπτικών ρωγμών στο κάτω πέλμα (Δρίτσος, 2005). Πάραυτα όπως επισήμανε ο Δρίτσος (2005), η σεισμική ένταση δεν δικαιολογεί τέτοιου είδους βλάβες και στη πραγματικότητα πρόκειται για την εμφάνιση προϋπαρχουσών ρωγμών οι οποίες έγιναν εμφανείς εξαιτίας της κατακόρυφης συνιστώσας του σεισμού. Ο συγκεκριμένος τύπος βλάβης ωστόσο αποτελεί ένδειξη καμπτικής ανεπάρκειας στη δοκό εάν αποτελεί αποτέλεσμα κατακόρυφων φορτίων. Σε αυτή την περίπτωση, παρατηρούνται αρκετές ρωγμές στο ίδιο σημείο της δοκού όπου αναπτύχθηκε μέγιστη ροπή κάμψης και αποτελεί ένδειξη διαρροής του εφελκόμενου χάλυβα (Δρίτσος, 2005). Ο συγκεκριμένος τύπος βλάβης αποτυπώνεται επαρκέστερα στο παρακάτω σχήμα.



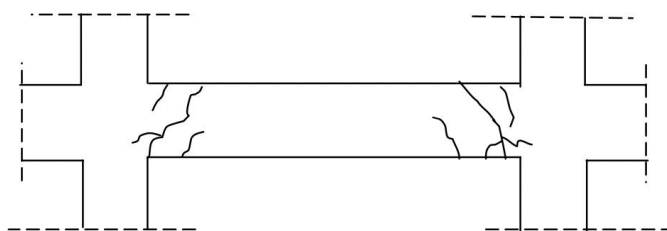
Σχήμα 2-5 Ανάπτυξη εγκάρσιων καμπτικών ρωγμών στο κάτω πέλμα δοκού
(Δρίτσος, 2005)

Καμπτικές ρωγμές στο επάνω πέλμα δοκού είναι επίσης δυνατό να εμφανιστούν ως αποτέλεσμα σεισμικής δράσης. Αντίστοιχες εγκάρσιες ρωγμές δύναται να εμφανιστούν και στην κάτω παρειά της δοκού κοντά στις στηρίξεις. Η ανάπτυξη των εν λόγω ρωγμών μπορεί να οφείλεται είτε στη διαρροή του εφελκόμενου χάλυβα του κάτω πέλματος είτε εξαιτίας ανεπαρκούς αγκύρωσης και ολίσθησης του οπλισμού (Δρίτσος, 2005). Ο συγκεκριμένος τύπος βλάβης εμφανίζεται με ρωγή μεγάλου εύρους στην παρειά της στήριξης και μπορεί να εμφανιστεί για κάθε περίπτωση φόρτισης. Η καμπτική αστοχία άνω πέλματος και η ανάπτυξη ρωγμών στο κάτω πέλμα σε σημείο κοντά στις στηρίξεις φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 2-6 Ανάπτυξη καμπτικών ρωγμών στο άνω πέλμα και ολίσθηση οπλισμού στο κάτω (Δρίτσος, 2005)

Ο σοβαρότερος τύπος βλάβης που μπορεί να εμφανιστεί σε δοκούς αφορά την ανάπτυξη διατμητικών ρωγμών στις στηρίξεις τη δοκού. Όπως επισημαίνει ο Δρίτσος (2005), θεωρείται ο επικινδυνότερος τύπος βλάβης για δοκούς λόγω της ψαθυρής αστοχίας που τον χαρακτηρίζει. Για την αποφυγή εμφάνισης του συγκεκριμένου τύπου βλάβης, οι σύγχρονοι αντισεισμικοί κανονισμοί προτείνουν τον ικανοτικό σχεδιασμό σε τέμνουσα, λαμβάνοντας υπόψιν τις μέγιστες ροπές που μπορούν να αναπτυχθούν στα άκρα της δοκού. Ο τύπος βλάβης παρατίθεται επαρκέστερα στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 2-7 Διατμητική αστοχία δοκού (Δρίτσος, 2005)

2.2 Συνοπτική Περιγραφή Μεθόδων Δομικής Αναβάθμισης Κατασκευών

Η επιτακτική ανάγκη αναβάθμισης της πλειονότητας του υφιστάμενου κτιριακού αποθέματος οδηγεί σε πολυάριθμα διαθέσιμα δομικά σχήματα αναβάθμισης. Οι μέθοδοι δομικής αναβάθμισης διακρίνονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες, στις μεθόδους τοπικής ενίσχυσης στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος και στις μεθόδους καθολικής ενίσχυσης στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος. Οι δύο αυτές κατηγορίες περιγράφονται αναλυτικότερα παρακάτω.

2.2.1 Τοπική Ενίσχυση Μελών Οπλισμένου Σκυροδέματος

Οι μέθοδοι τοπικής ενίσχυσης στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος αφορούν αποκλειστικά στην βελτίωση της απόκρισης των μελών στα οποία εφαρμόζονται και όχι στη δομική αναβάθμιση του συνόλου της κατασκευής. Στόχος τους είναι να μειώσουν τη σεισμική τρωτότητα των δομικών στοιχείων προσδίδοντάς τους ικανότητα παραμόρφωσης, αυξημένη αντοχή και δυσκαμψία καθώς και μηχανισμούς απορρόφησης ενέργειας. Οι

τοπικές επεμβάσεις δύναται να διακριτοποιηθούν σε σχήματα αναβάθμισης τα οποία κάνουν χρήση συμβατικών τεχνικών και υλικών, όπως οι μανδύες ΟΣ, αλλά και σε καινοτόμες προσεγγίσεις οι οποίες χρησιμοποιούν πρωτοποριακά υλικά, όπως τα ινοπλισμένα πολυμερή και τα ινοπλέγματα. Οι εν λόγω μέθοδοι περιγράφονται αναλυτικότερα παρακάτω όπου εξετάζεται και η αποτελεσματικότητά τους.

- **Μανδύες Οπλισμένου Σκυροδέματος**

Οι μανδύες οπλισμένου σκυροδέματος αποτελούν μέθοδο δομικής αναβάθμισης στοιχείων ΟΣ και κάνουν χρήση συμβατικών υλικών όπως ο χάλυβας και το σκυρόδεμα. Η λειτουργία τους έγκειται στην αύξηση της αντοχής, της δυσκαμψίας και της πλαστιμότητας των μελών στα οποία εφαρμόζονται. Η εφαρμογή τους αφορά τα υποστυλώματα υπαρχουσών κατασκευών. Η τεχνική περιλαμβάνει αύξηση της διατομής του υποστυλώματος μέσω της προσθήκης νέων διατμητικών και εγκάρσιων οπλισμών περιμετρικά (Δρίτσος, 2005). Οι μανδύες οπλισμένου σκυροδέματος δύναται να εκτείνονται σε όλο το μήκος του υποστυλώματος (ολικός μανδύας) ή σε μέρος αυτού (τοπικός μανδύας). Επιπλέον, η εφαρμογή τους μπορεί να περιβάλλει ολόκληρη τη διατομή του υποστυλώματος (κλειστός μανδύας) ή μέρους αυτής (ανοικτός μανδύας) (Δρίτσος, 2005).

Γενικότερα στην αγορά εντοπίζονται τέσσερις κατηγορίες μανδύων ΟΣ:

- 1) Μανδύες από έγχυτο σκυρόδεμα**

Για τη κατασκευή μανδύα από έγχυτο σκυρόδεμα απαιτείται η χρήση ξυλότυπου ενώ η συγκεκριμένη τεχνική χρησιμοποιείται όταν ο μανδύας που κατασκευάζεται έχει πάχος μεγαλύτερο από 8 εκ. (Δρίτσος, 2005)

- 2) Μανδύες από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα**

Πρόκειται για τη συνηθέστερη τεχνική κατασκευής μανδύων ΟΣ. Αφορά μανδύες το πάχος των οποίων δεν θα είναι μεγαλύτερο των 10εκ.. Στη περίπτωση όπου δεν χρησιμοποιείται ξυλότυπος πρέπει να εξασφαλιστεί η κατακόρυφη επιφάνεια του μανδύα (Δρίτσος, 2005).

3) Μανδύες από σκυροτσιμεντόπηγμα

Αφορά τεχνική η οποία εγγυάται την ευκολότερη σκυροδέτηση του μανδύα, ακόμη και σε περιπτώσεις παρουσίας πυκνού οπλισμού. Η διαδικασία εφαρμογής αφορά την τοποθέτηση αδρανών σε καλούπια και στη συνέχεια την κάλυψη των κενών (Δρίτσος, 2005). Η τεχνική εγγυάται τη μείωση της συστολής ξήρανσης στο ελάχιστο ωστόσο δεν είναι ιδιαίτερα διαδεδομένη στη χώρα μας.

4) Μανδύες από ειδικά σκυροδέματα και τσιμεντοκονιάματα

Η συγκεκριμένη τεχνική εγγυάται για το πολύ μικρό πάχος του μανδύα ΟΣ. Παρόλα αυτά το αυξημένο κόστος της, αποτελεί ανασταλτικό παράγοντα στην ευρεία εφαρμογή της (Δρίτσος, 2005).



Σχήμα 2-8 Μορφή μανδύα οπλισμένου σκυροδέματος (www.alfakat.gr)

Στο παραπάνω σχήμα διακρίνεται τυπική μορφή ενίσχυσης με μανδύες ΟΣ. Όσον αφορά στη διαδικασία που ακολουθείται για την εφαρμογή των μανδύων οπλισμένου σκυροδέματος, είναι συγκεκριμένη και αποτελείται από διαδοχικά βήματα τα οποία περιγράφονται παρακάτω. Σύμφωνα με τον Δρίτσο (2005):

- I. Υποστλώνονται οι πλάκες και οι δοκοί οι οποίες συντρέχουν στο προς ενίσχυση υποστύλωμα
- II. Απομακρύνεται το αποδιοργανωμένο σκυρόδεμα και επιδιορθώνονται υπάρχουσες βλάβες
- III. Εύρεση θέσεων συγκόλλησης παλαιών με νέους οπλισμούς
- IV. Διάνοιξη οπών στις θέσεις αγκύρωσης των νέων οπλισμών και στις θέσεις όπου θα χρησιμοποιηθούν βλήτρα

- V. Εκτράχυνση της εξωτερικής επιφάνειας του σκυροδέματος για την απομάκρυνση της επιδερμικής στρώσης τσιμεντοπολτού και εμφάνιση των αδρανών
- VI. Κατάλληλος καθαρισμός των επιφανειών με χρήση αέρα υπό πίεση
- VII. Αγκύρωση των άκρων των ράβδων του διαμήκους οπλισμού μέσω εποξειδικής ρητίνης
- VIII. Αγκύρωση των βλήτρων όπου προβλέπεται
- IX. Τοποθετούνται τα περιβλήματα σύνδεσης παλαιών και νέων οπλισμών
- X. Τοποθέτηση καινούργιων συνδετήρων

Η παραπάνω διαδικασία ολοκληρώνεται μέσω της σκυροδέτησης του μανδύα η οποία πραγματοποιείται με έναν εκ των τεσσάρων τρόπων που προτάθηκαν παραπάνω.

Γενικότερα οι μανδύες οπλισμένου σκυροδέματος αποτελούν μια ευρέως χρησιμοποιούμενη μέθοδο δομικής αναβάθμισης για δομικά στοιχεία ΟΣ. Οι κυριότεροι λόγοι της ευρείας εφαρμογής τους αφορούν την αποτελεσματικότητά τους σε όρους αύξησης αντοχής, δυσκαμψίας και πλαστιμότητας, το χαμηλό τους κόστος και τέλος την εξοικείωση που έχουν τα συνεργεία με τα υλικά του σκυροδέματος και του χάλυβα, γεγονός το οποίο βελτιστοποιεί την σωστή εφαρμογή της τεχνικής (Fardis, 2009). Επιπλέον, η λειτουργία των μανδύων ΟΣ ανάγεται και στην επισκευή φθαρμένων μελών οπλισμένου σκυροδέματος και στην εξασφάλιση της λειτουργικότητάς τους μακροπρόθεσμα.

Η δυσκαμψία και η καμπτική αντοχή των στοιχείων αυξάνεται χάριν της αυξημένης διατομής και του πρόσθετου διαμήκη οπλισμού (Fardis, 2009). Η αύξηση της διατμητικής αντοχής και της ικανότητας παραμόρφωσης του στοιχείου ανάγεται στον νέο εγκάρσιο οπλισμό ο οποίος λειτουργεί σε διάτμηση. Τέλος, το πρόσθετο σκυρόδεμα το οποίο προστίθεται βελτιώνει την απόκριση του στοιχείου ενώ προστατεύει από τη περαιτέρω διάβρωση και φθορά του υπάρχοντος οπλισμού.

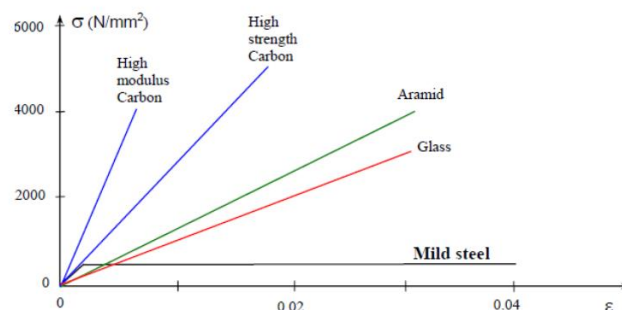
Παρόλα αυτά οι μανδύες οπλισμένου σκυροδέματος παρουσιάζουν και σημαντικά μειονεκτήματα. Το κυριότερο πρόβλημα των μανδύων έγκειται στην μεγάλη αύξηση του πάχους της διατομής των μελών στα οποία εφαρμόζονται (Fardis, 2009). Η μεγάλη αύξηση του πάχους των στοιχείων είναι το σημαντικότερο μειονέκτημα των μανδύων ΟΣ ιδιαίτερα στις περιπτώσεις όπου υπάρχουν γεωμετρικοί περιορισμοί και έλλειψη χώρου, παράγοντες οι οποίοι εμποδίζουν την εφαρμογή. Επιπρόσθετα, η εφαρμογή των μανδύων σε υφιστάμενες κατασκευές δημιουργεί προβλήματα. Παρατηρούνται μεγάλες ποσότητες σκόνης και θραυσμάτων, προκαλείται ηχορύπανση ενώ αρκετές φορές κρίνεται απαραίτητη η διακοπή

της λειτουργίας της κατασκευής (Fardis, 2009). Επιπλέον δημιουργούνται ερωτηματικά για την υγεία των χρηστών και των συνεργείων κατά την εφαρμογή. Οι παραπάνω παράγοντες εμποδίζουν την ευρεία χρήση των μανδύων ΟΣ ως τεχνική δομικής αναβάθμισης κατασκευών και δίνουν το κίνητρο για την ανάπτυξη και τη χρήση καινοτόμων τεχνικών.

- **Ινοπλισμένα Πολυμερή (FRPs)**

Αναλογιζόμενοι τις συνεχείς προσπάθειες αναβάθμισης των υπαρχουσών μεθόδων, τις τελευταίες δεκαετίες παρατηρείται εκτενής ανάπτυξη μεθόδου ενίσχυσης η οποία κάνει χρήση ινοπλισμένων πολυμερών (FRPs).

Η δομή των FRPs είναι ινώδης με τις λεπτές ίνες να είναι κατασκευασμένες από ύαλο, άνθρακα, βασάλτη και οι οποίες εμποτίζονται σε εποξειδική ρητίνη (Triantafyllou, 2007). Το παρακάτω διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης αναδεικνύει την ικανότητα παραμόρφωσης ινών κατασκευασμένων από σύνθετα υλικά συγκριτικά με το τυπικό χάλυβα. Πρακτικά η εφαρμογή των ινοπλισμένων πολυμερών συμβάλλει στην ανάληψη των εφελκυστικών δυνάμεων αποκλειστικά από τις ίνες του υφάσματος.



Σχήμα 2-9 Διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης σύνθετων υλικών (Triantafyllou, 2007).

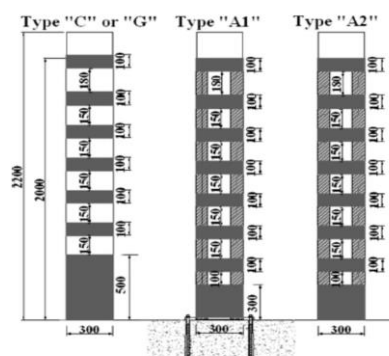
Υλικά όπως ο ύαλος και ο βασάλτης δεν διαθέτουν όριο πλαστικής διαρροής (Τριανταφύλλου, 2004). Η αντοχή των υλικών αυτών σε θραύση είναι πολύ μεγαλύτερη συγκριτικά με τον χάλυβα.

Για την εξασφάλιση της συνάφειας μεταξύ πολυμερών και σκυροδέματος επιστρατεύεται η εποξειδική ρητίνη ως συνδετικό υλικό (Bournas, 2018). Η εφαρμογή δεν χρήζει ιδιαίτερης εξειδίκευσης, το μικρό πάχος των υφασμάτων δεν επηρεάζει την υπάρχουσα αρχιτεκτονική, τα σύνθετα υλικά παρουσιάζουν σημαντική αντίσταση στη

διάβρωση συγκριτικά με τον χάλυβα και τέλος εντοπίζεται υψηλή αύξηση της αντοχής σε σχέση με το βάρος (Bournas, 2018).

Οι μέθοδοι ενίσχυσης εστιάζουν στον σκελετό του κτιρίου, δηλαδή στις δοκούς τα υποστυλώματα και τους κόμβους σύνδεσης. Αξίζει ωστόσο να σημειωθεί ότι τα υποστυλώματα ως κατακόρυφα δομικά στοιχεία είναι υπεύθυνα για τη παραλαβή κατακόρυφων φορτίων καθόλη τη διάρκεια ζωής της κατασκευής. Πρακτικά αυτό σημαίνει πως τα υποστυλώματα θεωρούνται η κρισιμότερη περιοχή της κατασκευής. Η δομική ενίσχυση των υποστυλωμάτων προέχει των υπόλοιπων δομικών στοιχείων δεδομένου ότι συμβάλλει καθοριστικά στη σεισμική προστασία. Ο συνηθέστερος τρόπος ενίσχυσης των κατακόρυφων δομικών στοιχείων είναι η περίσφιγξη. Ακολουθεί ενδεικτική αναφορά σε πειραματική δοκιμή ενίσχυσης υποστυλωμάτων ΟΣ με ινοπλισμένα πολυμερή.

Οι Realfonzo et al. (2009) εξέτασαν την αποτελεσματικότητα της περίσφιγξης υποστυλωμάτων οπλισμένου σκυροδέματος κάνοντας χρήση υφασμάτων ινοπλισμένων πολυμερών. Η αποτελεσματικότητα της μεθόδου εξετάστηκε σε όρους αύξησης ικανότητας παραμόρφωσης των δομικών στοιχείων αλλά και σε αναπτυσσόμενους μηχανισμούς απόσβεσης ενέργειας. Οι πειραματικές δοκιμές εκπονήθηκαν σε τετραγωνικής διατομής υποστυλώματα τα οποία υποβλήθηκαν σε πλευρικές και αξονικές καταπονήσεις. Οι Realfonzo et al. (2009) εξέτασαν την αποτελεσματικότητα της ενίσχυσης βάσει του αριθμού των στρώσεων των ΙΟΠ, του αξονικού φορτίου που εφαρμόστηκε και του υπάρχοντος χαλύβδινου διαμήκους οπλισμού.



Σχήμα 2-10 Τύποι δοκιμίων κατακόρυφων στοιχείων (Realfonzo et al., 2009)

Παραπάνω παρατίθενται οι τύποι δοκιμίων που χρησιμοποιήθηκαν στις πειραματικές δοκιμές. Οι τύποι "G" και "C" αφορούν στο υλικό από το οποίο κατασκευάστηκαν οι ίνες των υφασμάτων, ύαλος και άνθρακας αντιστοίχως. Όσον αφορά τους τύπους A1 και A2, οι πρώτοι αφορούν την πρόσθετη εφαρμογή φύλλων χάλυβα επαρκώς αγκυρωμένων με το θεμέλιο ενώ οι A2 τοποθέτηση φύλλων χάλυβα στα άκρα χωρίς αγκύρωση.

Σχετικά με τον μηχανισμό αστοχίας που παρατηρήθηκε, οι κυριότερες βλάβες εντοπίστηκαν στην κάτω παρειά του κατακόρυφου υποστυλώματος. Παρατηρήθηκε θραύση σκυροδέματος, λυγισμός των χαλύβδινων ράβδων και ανάπτυξη κατακόρυφων ρωγμών. Όσον αφορά τα ενισχυμένα δοκίμια παρατηρήθηκε αποκόλληση και θραύση των υφασμάτων, ωστόσο η ενίσχυση κατάφερε να περιορίσει το μέγεθος της ζημίας σε σχέση με τα μη ενισχυμένα δοκίμια. Οι Realfonzo et al. (2009) επισήμαναν ότι στα ενισχυμένα δοκίμια παρατηρήθηκε μικρότερο πλήθος ρωγμών οι οποίες είχαν και σταθερό πλάτος καθόλη τη διάρκεια της δοκιμής.



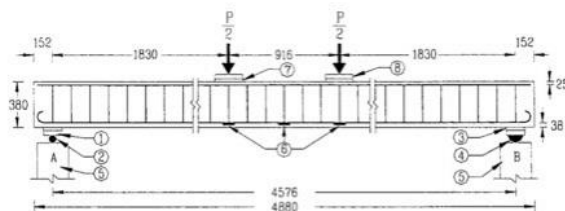
Σχήμα 2-11 Αστοχία υποστυλωμάτων (Realfonzo et al., 2009)

Συμπερασματικά οι Realfonzo et al. (2009) παρατήρησαν ότι η ενίσχυση με υφάσματα ινοπλισμένων πολυμερών αυξάνει την ικανότητα μετατόπισης των κατακόρυφων στοιχείων. Επιπροσθέτως, παρατηρήθηκε ότι η αύξηση του αριθμού των στρώσεων στα άκρα των υποστυλωμάτων αυξάνει την ικανότητα παραμόρφωσης των κατακόρυφων στοιχείων. Όσον αφορά την επιπρόσθετη εφαρμογή φύλλων χάλυβα, παρατηρήθηκε ολκιμότερος μηχανισμός απόκρισης ενώ στη περίπτωση που τα φύλλα αγκυρώθηκαν επαρκώς με το θεμέλιο παρατηρήθηκε αύξηση και της καμπτικής αντοχής.

Τα ινοπλισμένα πολυμερή επίσης εφαρμόζονται σε δομικά στοιχεία δοκών ή πλάκας. Οι μανδύες τοποθετούνται στο εφελκόμενο πέλμα με κατάλληλο προσανατολισμό. Ο προσανατολισμός του υφάσματος και κατ' επέκταση των ινών του είναι ιδιαίτερα σημαντικός για την αποτελεσματικότητα της παρέμβασης. Με τον ορθό προσανατολισμό του υφάσματος οι ίνες δύνανται να παραλάβουν τις εφελκόμενες δυνάμεις λόγω κάμψης (Τριανταφύλλου, 2004). Στην περίπτωση των δοκών, τα υφάσματα τοποθετούνται με τρόπο τέτοιο ώστε οι ίνες να είναι παράλληλα στον άξονα του στοιχείου ενώ στη περίπτωση των πλακών οι μανδύες τοποθετούνται με τις διευθύνσεις των ινών να συναντώνται κάθετα στο επίπεδο. Γενικότερα η ενίσχυση των οριζόντιων στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος αφορά την αύξηση της

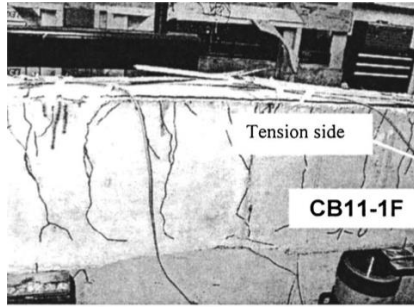
καμπτικής αντοχής των μελών. Ακολουθεί πειραματική δοκιμή η οποία αφορούσε την αύξηση της καμπτικής αντοχής δοκών μέσω ενίσχυσης με ινοπλισμένα πολυμερή.

Πιο συγκεκριμένα οι Alagusundaramoorthy et al. (2003) εξέτασαν την αποτελεσματικότητα της ενίσχυσης δοκών οπλισμένου σκυροδέματος με ΙΟΠ για αύξηση της καμπτικής τους αντοχής. Πραγματοποιήθηκε δοκιμή καταπόνησης των δοκών σε δύο σημεία η οποία περιελάμβανε πέντε κύκλους φόρτισης-αποφόρτισης. Ο έκτος και τελευταίος κύκλος αφορούσε φόρτιση μέχρι την αστοχία με σταθερό ρυθμό 10 kN το λεπτό. Η δοκιμή πραγματοποιήθηκε για δύο δοκούς ελέγχου και δώδεκα ενισχυμένες δοκούς. Όλες οι δοκοί χαρακτηρίζονταν από ανεπαρκή χαλύβδινο υπάρχον οπλισμό. Οι παράμετροι οι οποίες εξετάστηκαν αφορούσαν διαφορετικά πάχη και διαστάσεις δοκών καθώς και διαφορετικό πλήθος στρώσεων υφασμάτων. Αξίζει να σημειωθεί ότι χρησιμοποιήθηκαν υφάσματα ινοπλισμένων πολυμερών αποτελούμενα μόνο από ίνες άνθρακα.



Σχήμα 2-12 Πειραματική διάταξη (Alagusundaramoorthy et al., 2003)

Όσον αφορά τους μηχανισμούς αστοχίας, στα δοκίμια ελέγχου παρατηρήθηκε πρόωρη διαρροή του εφελκυσμένου χαλύβδινου οπλισμού. Στις δοκούς ελέγχου παρατηρήθηκε θραύση του σκυροδέματος λόγω της αστοχίας του οπλισμού. Τόσο στις μη ενισχυμένες δοκούς όσο και στις δοκούς οι οποίες ενισχύθηκαν με ΙΟΠ παρατηρήθηκε ανάπτυξη καμπτικών ρωγμών. Αξίζει να σημειωθεί ότι στη πλειονότητα των δοκιμών δεν παρατηρήθηκαν διαμητικές ρωγμές κατά τη διάρκεια των δοκιμών. Όσον αφορά τις ενισχυμένες δοκούς επισημάνθηκε η αποκόλληση του υφάσματος στο μέσο του ανοίγματος στις περισσότερες περιπτώσεις. Επιπλέον, παρατηρήθηκε θλίψη του σκυροδέματος τόσο στο μέσον της δοκού για κάποια δοκίμια όσο και στα σημεία επιβολής των φορτίων για κάποια άλλα. Στις περισσότερες περιπτώσεις οι καμπτικές ρωγμές αναπτύχθηκαν από το μέσον της δοκού προς τα ακραία στηρίγματα. Τέλος, η αποκόλληση των υφασμάτων στα ενισχυμένα δοκίμια προηγήθηκε της σύνθλιψης του σκυροδέματος από την οποία επήλθε και η αστοχία.



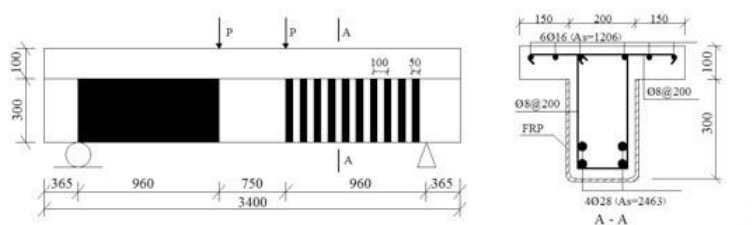
Σχήμα 2-13 Αστοχία δοκιμίου CB11-1F (Alagusundaramoorthy et al., 2003)

Συμπερασματικά οι Alagusundaramoorthy et al. (2003) επισήμαναν ότι η ενίσχυση με υφάσματα ινοπλισμένων πολυμερών κατάφερε να αυξήσει τη καμπτική αντοχή δοκών οπλισμένου σκυροδέματος έως και 49% συγκριτικά με τα δοκίμια ελέγχου. Επιπλέον, τονίστηκε ότι η εφαρμογή των υφασμάτων παρουσία επαρκούς αγκύρωσης στα άκρα των δοκών κατάφερε να αυξήσει τη καμπτική αντοχή έως και 58%. Όσον αφορά το διαφορετικό πλήθος στρώσεων των υφασμάτων, το φορτίο αστοχίας αυξήθηκε κατά 24% στη περίπτωση μιας στρώσης υφάσματος συγκριτικά με τα δοκίμια ελέγχου. Αντίστοιχα, στην περίπτωση δύο στρώσεων παρατηρήθηκε αύξηση της τάξης 35% ενώ στην περίπτωση των τριών στρώσεων υπογραμμίζεται αύξηση του φορτίου αστοχίας κατά 49%. Στις περιπτώσεις πολλαπλών στρώσεων και επαρκούς αγκύρωσης επισημάνθηκαν μεγάλες αυξήσεις του φορτίου αστοχίας. Τέλος, τονίστηκε η αύξηση και της δυσκαμψίας των δοκών οπλισμένου σκυροδέματος χάριν της ενίσχυσης με ΙΟΠ.

Επίσης σημαντική είναι η ενίσχυση των στοιχείων ΟΣ έναντι διάτμησης. Η συγκεκριμένη ενίσχυση επιτυγχάνεται με την εξωτερική επικόλληση των υφασμάτων με τρόπο τέτοιο ώστε οι ίνες να είναι παράλληλες στη διεύθυνση των κύριων τάσεων του στοιχείου, δηλαδή κάθετα στη διεύθυνση των εν δυνάμει ρωγμών οι οποίες πρόκειται να δημιουργηθούν (Τριανταφύλλου, 2004). Και σε αυτή τη περίπτωση η εφαρμογή των υφασμάτων για την προστασία από διάτμηση δεν είναι εύκολη δεδομένου ότι η σωστή τοποθέτηση των υφασμάτων ευνοείται από διεύθυνση ινών κάθετη στον άξονα του δομικού στοιχείου. Λύση στο παραπάνω πρόβλημα δίνει η δομή κλειστού μανδύα, όπου το επιτρέπει η αρχιτεκτονική του κελύφους. Φυσικά υπάρχει η δυνατότητα ανοικτής δομής μανδύα, ωστόσο παρατηρείται πρόωρη αποκόλληση του υφάσματος. Ακολουθεί αναφορά σε πειραματική δοκιμή η οποία εξέτασε την αύξηση της διατμητικής αντοχής μελών ενισχυμένων με ΙΟΠ.

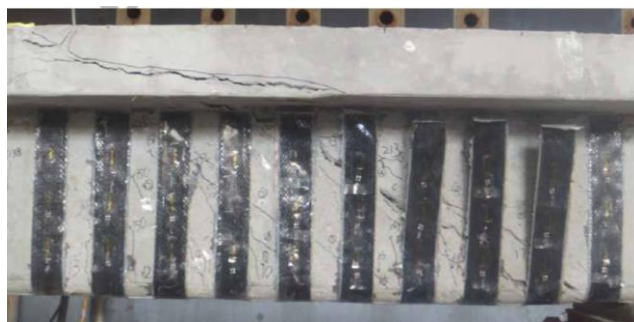
Οι Chen et al. (2016) εξέτασαν την αποτελεσματικότητα της ενίσχυσης με μανδύες ινοπλισμένων πολυμερών σε δοκούς οπλισμένου σκυροδέματος για αύξηση της διατμητικής

τους αντοχής. Η πειραματική δοκιμή αφορούσε έντεκα ενισχυμένες δοκούς, διατομής T, με μανδύες ινοπλισμένων πολυμερών σε σχήμα U. Δύο δοκοί παρέμειναν μη ενισχυμένες και είχαν τη λειτουργία των δοκιμίων ελέγχου. Οι δοκοί υποβλήθηκαν σε μονοτονική φόρτιση δύο σημείων.



Σχήμα 2-14 Πειραματική διάταξη (Chen et al., 2016)

Όσον αφορά τους μηχανισμούς αστοχίας που εντοπίστηκαν στις δοκούς, στα δοκίμια ελέγχου παρατηρήθηκε διατμητική αστοχία λόγω εφελκυσμού, χαρακτηριστικό ήταν η διατμητική ρωγμή η οποία σχηματίστηκε μεταξύ των σημείων στήριξης και φόρτισης. Στα ενισχυμένα δοκίμια επισημάνθηκε η αποκόλληση του μανδύα ΙΟΠ. Αντίστοιχη αστοχία παρατηρήθηκε και στα ενισχυμένα δοκίμια παρουσία αγκυρίων και εξήχθη το συμπέρασμα ότι η επαρκής αγκύρωση των ΙΟΠ δεν συμβάλλει καταλυτικά στην ενίσχυση δοκών ΟΣ έναντι διάτμησης. Επιπροσθέτως παρατηρήθηκε πρόσθετη θραύση και εξόλκευση των αγκυρίων ο οποίο θεωρείται τυπικός τρόπος αστοχίας.



Σχήμα 2-15 Διατμητική αστοχία ενισχυμένης με ΙΟΠ δοκού (Chen et al., 2016)

Συμπερασματικά οι Chen et al. υπογράμμισαν την αποτελεσματικότητα της ενίσχυσης κάνοντας χρήση ΙΟΠ για την αύξηση της διατμητικής αντοχής των δοκών. Επιπλέον επισήμαναν ότι χωρίς την ύπαρξη αγκυρίων παρατηρείται ευκολότερη αποκόλληση των υφασμάτων ενώ όταν γίνεται χρήση αγκυρίων η θραύση των υφασμάτων είναι η τυπικότερη μορφή αστοχίας. Παρόλα αυτά η ύπαρξη αγκυρίων προσδίδει στις δοκούς ολκιμότερο μηχανισμό απόκρισης. Τέλος επισημάνθηκε ότι η ενίσχυση δοκών οπλισμένου σκυροδέματος με ΙΟΠ τύπου U καταφέρνει να αυξήσει της διατμητική αντοχή των στοιχείων.

Συνοψίζοντας τα παραπάνω τα ινοπλισμένα πολυμερή μέσω της κατάλληλης εφαρμογής δύναται να ενισχύσουν και να βελτιώσουν την απόκριση των στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος. Τα ΙΟΠ δύναται να θεωρηθούν συγγενική μέθοδος των μανδύων οπλισμένου σκυροδέματος, ωστόσο αποτελούν μια βελτιωμένη εκδοχή τους. Το παρόν σχήμα ενίσχυσης θεωρείται αποτελεσματικότερο δεδομένου ότι εκμεταλλεύεται τις καλές ιδιότητες των μανδύων ΟΣ ενώ ταυτόχρονα παραλαμβάνει μεγαλύτερες τάσεις εφελκυσμού, λόγω της χρήσης σύνθετων υλικών.

- **Ινοπλέγματα σε Ανόργανη Μήτρα (IAM)**

Τα ινοπλέγματα σε ανόργανη μήτρα (IAM ή TRM στη διεθνή βιβλιογραφία) θεωρούνται η νεότερη και πιο καινοτόμα λύση δομικής αναβάθμισης υφιστάμενων κατασκευών. Η καινοτομία του εν λόγω υλικού έγκειται στον συνδυασμό υφάσματος παρουσία ινών υψηλής αντοχής και κονιάματος, το οποίο αντιπροσωπεύει την ανόργανη μήτρα. Το υλικό από το οποίο κατασκευάζονται οι ίνες των υφασμάτων μπορεί να είναι άνθρακας, ύαλος ή και βασάλτης ενώ το κονίαμα κατά κανόνα αποτελείται από ανόργανα προϊόντα.

Πρακτικά τα ινοπλέγματα παρουσιάζουν σημαντικές ομοιότητες τόσο με τα ινοπλισμένα πολυμερή αλλά και με τους μανδύες οπλισμένου σκυροδέματος. Όπως τα ΙΟΠ έτσι και τα IAM παρουσιάζουν σημαντικά πλεονεκτήματα συγκριτικά με τους μανδύες οπλισμένου σκυροδέματος. Όπως επισημαίνεται από τον Κούτας (2015), κάποια από τα πλεονεκτήματα είναι τα εξής :

1. Εύκολη εφαρμογή η οποία δεν χρήζει εξειδίκευσης
2. Μεγάλη ικανότητα παραλαβής εφελκυστικών δυνάμεων με χρήση ελαφρών υλικών
3. Χρήση υλικών σύνθετης σύστασης τα οποία σε αντίθεση με τον χάλυβα αντιστέκονται στη διάβρωση. Κοινώς, τα καινοτόμα αυτά υλικά συμβάλλουν στην εξασφάλιση της μακροζωίας του οπλισμού.

Όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό τα ινοπλέγματα σε ανόργανη μήτρα (IAM) δύναται να θεωρηθούν ως η εξέλιξη των ινοπλισμένων πολυμερών (ΙΟΠ). Επιπλέον ως μέθοδος τα ινοπλέγματα δίνουν απάντηση στα σημαντικότερα προβλήματα των ινοπλισμένων πολυμερών τα οποία και εμπόδιζαν την ευρεία εφαρμογή τους.

Τα περισσότερα προβλήματα των ινοπλισμένων πολυμερών πηγάζουν από την ευρεία χρήση ρητινών. Αναφέρονται κάποια εκ των σημαντικότερων :

- ⇒ Χαμηλή αντοχή ρητινών σε υψηλές θερμοκρασίες γεγονός το οποίο απαιτεί την πρόσθετη εγκατάσταση μέτρων πυροπροστασίας αυξημένου κόστους (Κούτας, 2015).
- ⇒ Αδυναμία εφαρμογής των ΙΟΠ εξαιτίας των ρητινών σε υγρές επιφάνειες λόγω των ποσοστών υγρασίας.
- ⇒ Αδυναμία χρήσης των ινοπλισμένων πολυμερών σε ιστορικού χαρακτήρα κατασκευές εξαιτίας της χημικής ασυμβατότητας των ρητινών (Κούτας, 2015). Κοινώς τα ΙΟΠ δεν δύναται να χρησιμοποιηθούν για τη διαφύλαξη της πολιτιστικής κληρονομιάς του υπάρχοντος κτιριακού αποθέματος.

Όπως επισημαίνει ο Κούτας (2015) λόγω της ομοιότητας των ΙΑΜ με τα ΙΟΠ ως μέθοδοι δομικής αναβάθμισης, εντοπίζονται πληθώρα πειραματικών δοκιμών άμεσης σύγκρισης της αποτελεσματικότητας των δύο μεθόδων. Έχει ήδη καταστεί σαφής η υπεροχή των ΙΑΜ σε σχέση με τις υπόλοιπες μεθόδους δομικής αναβάθμισης, όχι μόνο σε όρους φιλικότητας προς το περιβάλλον και προς τους χρήστες αλλά και σε όρους απόδοσης. Υπογραμμίζεται η σύνταξη οδηγιών το έτος 2013 αναφορικά στη χρήση των ΙΑΜ από το Αμερικανικό Ινστιτούτο Σκυροδέματος, γεγονός το οποίο τονίζει τη καταλληλότητα του εν λόγω σχήματος (ACI 549.4R-13, 2013).

Αναλυτικότερα η σύσταση του εν λόγω δομικού σχήματος αποτελείται από δύο κύρια μέρη: α) το πλέγμα ινών (ινόπλεγμα) και β) το κονίαμα το οποίο έχει το χαρακτηριστικό της ανόργανης σύστασης.

A. Ινοπλέγματα

Πρόκειται για ευθύγραμμες ίνες, ομοιόμορφα κατανεμημένες. Η διάταξη αποτελείται από κενά τα οποία δημιουργούνται μεταξύ των κλώνων ινών. Η ύπαρξη κενών στη διάταξη του πλέγματος είναι προκαθορισμένη και εξυπηρετεί τη μετέπειτα τοποθέτηση του κονιάματος και την αύξηση της συνάφειας με το σκυρόδεμα.

Συνηθέστερα για την κατασκευή του ινοπλέγματος παρατηρείται ύφανση των κλώνων και για τις δύο διευθύνσεις. Αξίζει να σημειωθεί ότι παρατηρείται επικάλυψη των πλεγμάτων με ρητίνη για συνάφεια με το σκυρόδεμα.

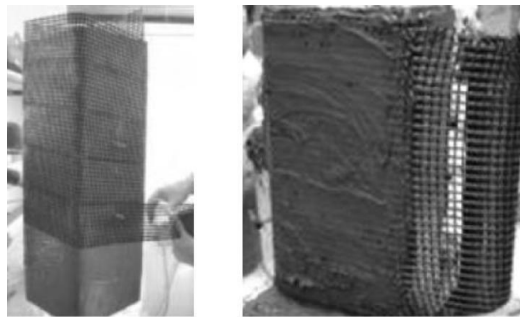
B. Ανόργανη Μήτρα

Κατά κανόνα η σύσταση της μήτρας είναι ανόργανη και συνηθέστερα έχει ως βάση το τσιμέντο. Κάθε στρώση κονιάματος εφαρμόζεται επι της προηγούμενης όταν η τελευταία

βρίσκεται ακόμη σε νωπή κατάσταση (Koutas et al., 2014). Τέλος το τσιμεντοκονίαμα χαρακτηρίζεται από επαρκή διατμητική αντοχή η οποία παρεμποδίζει την πρόωρη αποκόλληση του υφάσματος από τις εκάστοτε επιφάνειες. Τα πολυμερή έχουν την δυνατότητα διείσδυσης στο εσωτερικό των κλώνων εμποτίζοντας τις ίνες και αυξάνοντας την αντοχή του σχήματος αναβάθμισης.

Λόγω της συγγενικότητας της μεθόδου με τους μανδύες ινοπλισμένων πολυμερών, συμπεραίνεται ότι τα IAM δύναται να βελτιώσουν συνολικά την δομική απόκριση των στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος. Στη βιβλιογραφία εντοπίζεται πληθώρα πειραματικών δοκιμών οι οποίες εξετάζουν την αποτελεσματικότητα των περισφιγμένων μανδύων σε κατακόρυφα υποστυλώματα καθώς και την αύξηση της καμπτικής και διατμητικής αντοχής δομικών μελών χάριν της εφαρμογής των IAM. Παρακάτω παρατίθενται ενδεικτικά κάποιες από τις πειραματικές δοκιμές.

Ο Bournas (2009, 2017) έχει επισημάνει την ευεργετική συνεισφορά των IAM στις κρίσιμες περιοχές των υποστυλωμάτων, των οποίων η απόκριση σε όρους πλευρικής παραμόρφωσης βελτιώνεται έως και 2.5 φορές. Οι μανδύες ινοπλεγμάτων συμπληρώνουν επαρκώς τους υπάρχοντες ελλειπίς οπλισμούς και αντιμετωπίζουν το ζήτημα των ανεπαρκών ματίσεων, αυξάνοντας τη πλευρική δυσκαμψία της κατασκευής. Τέλος μέσω της περισφιγξης καθυστερείται σημαντικά ο λυγισμός του διαμήκη οπλισμού στον κόμβο δοκού-υποστυλώματος. Αντίστοιχη συνεισφορά παρατηρείται και στην ενίσχυση δομικών στοιχείων δοκού και πλακών με τη χρήση IAM.

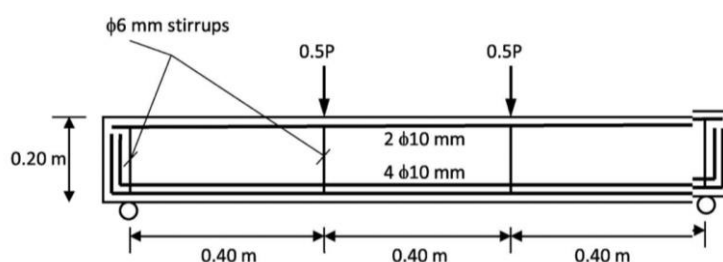


Σχήμα 2-16 Περίσφιγξη υποστυλώματος ΟΣ με IAM (Bournas et al., 2007)

Προέκυψε ότι οι πολλαπλές στρώσεις μανδύων και η κλειστή δομή εφαρμογής αυξάνει σημαντικά στη συνεισφορά των μανδύων, συμπέρασμα το οποίο αφορά όλα τα δομικά στοιχεία οπλισμένου σκυροδέματος. Παρόλες τις ομοιότητες ως μέθοδοι ενίσχυσης μεταξύ ΙΟΠ και IAM, η βέλτιστη συμπεριφορά των ΙΟΠ έγκειται στην άρτια αγκύρωση των μανδύων, στοιχείο το οποίο επηρεάζει σε μικρότερο βαθμό τα IAM λόγω της πολλαπλής επίστρωσης ανόργανου κονιάματος. Ακολουθούν ενδεικτικές αναφορές σε πειραματικές

δοκιμές ενίσχυσης δοκών ΟΣ με IAM, για αύξηση της διατμητικής και της καμπτικής τους αντοχής αντίστοιχα.

Οι Al-Salloum et al. (2012) εξέτασαν την αποτελεσματικότητα των IAM ως μέθοδο ενίσχυσης δοκών οπλισμένου σκυροδέματος και πιο συγκεκριμένα τη συνεισφορά τους στην αύξηση της διατμητικής αντοχής των μελών. Χρησιμοποιήθηκαν υφάσματα, οι ίνες των οποίων ήταν κατασκευασμένες από βασάλτη. Οι παράμετροι οι οποίες εξετάστηκαν αφορούσαν σε διαφορετικά είδη τσιμεντοειδών κονιαμάτων ενισχυμένα και μη από πολυμερή. Επιπλέον, εξετάστηκε η συνεισφορά των πολλαπλών στρώσεων των υφασμάτων καθώς και ο προσανατολισμός τους. Δέκα δοκοί καταπονήθηκαν με δύο σημεία επιβολής φορτίου στην άνω παρειά της δοκού. Συνολικά ενισχύθηκαν οκτώ δοκοί, σε τέσσερις από τις οποίες εφαρμόστηκε τυπικό τσιμεντοκονίαμα ενώ στις υπόλοιπες τσιμεντοειδές κονίαμα παρουσία πολυμερών. Δύο δοκοί παρέμειναν μη ενισχυμένες και αποτέλεσαν τα δοκίμια ελέγχου.



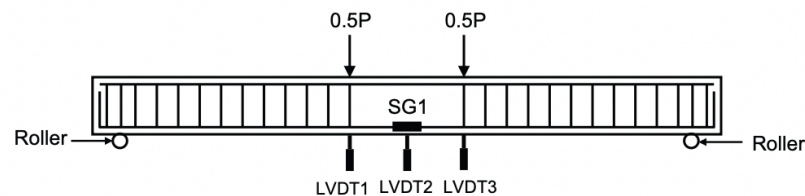
Σχήμα 2-17 Πειραματική διάταξη (Al-Salloum et al., 2012)

Όπως επισήμαναν οι Al-Salloum et al. (2012), τα δοκίμια ελέγχου αστόχησαν διατμητικά με τη δημιουργία διαγώνιων ρωγμών από τα σημεία επιβολής φορτίου προς τις στηρίξεις. Επιπλέον, παρατηρήθηκε σύνθλιψη του σκυροδέματος στην άνω παρειά. Παρόμοια αστοχία εντοπίζεται και για τις δοκούς οι οποίες ενισχύθηκαν με IAM παρουσία τυπικού τσιμεντοκονιάματος. Μολονότι, το τυπικό τσιμεντοκονίαμα δεν συμβάλλει στην βέλτιστη συνδεσιμότητα του υφάσματος με το σκυρόδεμα, δεν παρατηρήθηκε πρόωρη αποκόλληση ενώ τονίστηκε η αύξηση της διατμητικής αντοχής της δοκού. Επισημάνθηκε ότι η ενίσχυση με το τροποποιημένο κονίαμα κρίθηκε αποτελεσματικότερη από αυτή με το τυπικό τσιμεντοκονίαμα. Τέλος και πιο σημαντικά, το μεγαλύτερο πλήθος στρώσεων επηρεάζει θετικά την απόκριση της δοκού ενώ όσο αυξάνεται το πλήθος των στρώσεων αυξάνεται και η επιρροή της παραμέτρου του προσανατολισμού του υφάσματος. Δεδομένου ότι η απόκριση της δοκού βελτιώθηκε μέσω της ενίσχυσης, η εφαρμογή των IAM κρίθηκε αποτελεσματική για την αύξηση της διατμητικής αντοχής μελών ΟΣ.



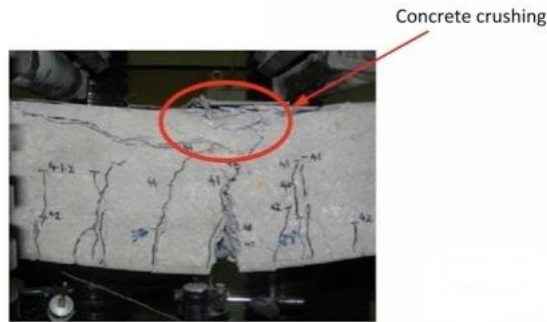
Σχήμα 2-18 Τυπική διατμητική αστοχία (Al-Salloum et al., 2012)

Οι Elsanadedy et al. (2012) εκπόνησαν πειραματική δοκιμή εξετάζοντας την αποτελεσματικότητα της μεθόδου των IAM για αύξηση της καμπτικής αντοχής δοκών οπλισμένου σκυροδέματος. Χρησιμοποιήθηκαν συνολικά έξι δοκοί ίδιων διαστάσεων οι οποίες καταπονήθηκαν σε κάμψη τεσσάρων σημείων. Οι παράμετροι οι οποίες λήφθηκαν υπόψιν αφορούσαν δύο κονιάματα, τυπικό τσιμεντοκονίαμα και ενισχυμένο τσιμεντοειδές κονίαμα με πολυμερή καθώς και ο αριθμός των στρώσεων των IAM. Δύο από τις δοκούς παρέμειναν μη ενισχυμένες ενώ στις υπόλοιπες τέσσερις τα IAM χρησιμοποιήθηκαν για την εξωτερική καμπτική ενίσχυση των δοκών.



Σχήμα 2-19 Πειραματική διάταξη (Elsanadedy et al., 2012)

Τα δοκίμια ελέγχου αστόχησαν καμπτικά εξαιτίας σχηματισμού καμπτικής ρωγμής στο μέσον του ανοίγματος. Παρατηρήθηκε θραύση του σκυροδέματος στη κρίσιμη διατομή. Για το ενισχυμένο δοκίμιο με το τυπικό τσιμεντοκονίαμα παρατηρήθηκε ξαφνική αστοχία στο άκρο λόγω της αποκόλλησης του υφάσματος ενώ για ενισχυμένο δοκίμιο με ίδιο αριθμό στρώσεων αλλά με τροποποιημένο τσιμεντοκονίαμα παρατηρήθηκε θραύση του υφάσματος στη μεσαία διατομή της δοκού. Η αστοχία και για τα ενισχυμένα δοκίμια οφείλεται στη θραύση του σκυροδέματος, παρόλα αυτά επισημαίνεται ότι το τροποποιημένο τσιμεντοκονίαμα βελτιστοποιεί τη συνάφεια μεταξύ του υφάσματος και του σκυροδέματος και κρίνεται πιο αποτελεσματικό. Τέλος, για τα ενισχυμένα δοκίμια με πολλαπλές στρώσεις υφάσματος η αστοχία που παρατηρήθηκε ήταν αντίστοιχη των δοκιμίων ελέγχου, παρόλα αυτά η ενίσχυση με IAM βελτιώνει την καμπτική αντοχή δοκών οπλισμένου σκυροδέματος.



Σχήμα 2-20 Τυπική καμπτική αστοχία (Elsanadedy et al., 2012)

Συμπερασματικά, βάσει των παραπάνω τα IAM καταφέρνουν να βελτιώσουν αποτελεσματικά την δομική απόκριση των μελών οπλισμένου σκυροδέματος. Ενισχύουν τα δομικά στοιχεία αυξάνοντας την δυσκαμψία και την πλαστιμότητα τους και αυξάνουν τη διατμητική και καμπτική τους αντοχή. Επιπλέον λόγω της άμεσης συγγενικότητας των IAM με τα ΙΟΠ ως μέθοδοι ενίσχυσης επισημαίνεται η παραπλήσια συνεισφορά των δύο σχημάτων, παρόλα αυτά επισημαίνεται η υπεροχή των IAM αφού αντιμετωπίζουν τα σημαντικότερα προβλήματα των ινοπλισμένων πολυμερών και εξυπηρετούν την ταχεία και ευρεία εφαρμογή τους.

2.2.3 Καθολική Ενίσχυση Κατασκευών Οπλισμένου Σκυροδέματος

Μια άλλη προσέγγιση δομικής αναβάθμισης ανάγεται στην εύρεση μεθόδων οι οποίες ενισχύουν το σύνολο της κατασκευής. Μέσω της εφαρμογής των εν λόγω μεθόδων επιτυγχάνεται η μείωση της έντασης στα τρωτά στοιχεία της κατασκευής σε επίπεδα ανεκτά από τα όρια αντοχής τους. Η εν λόγω προσέγγιση αφορά κατασκευές οι οποίες χαρακτηρίζονται από πληθώρα αδύναμων στοιχείων, η τοπική αναβάθμιση των οποίων φαντάζει δύσκολη και ασύμφορη.

Στην παρούσα ενότητα αναφέρονται οι κυριότερες μέθοδοι καθολικής αναβάθμισης κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος, αναλύονται τα χαρακτηριστικά τους και επισημαίνονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά τους.

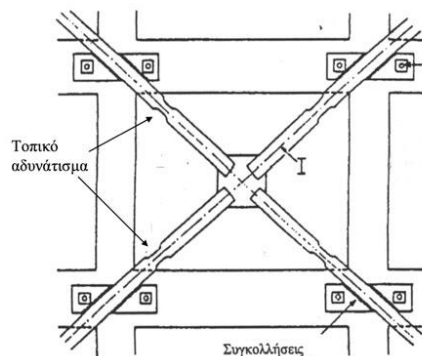
- **Προσθήκη Δικτυωτών Συστημάτων**

Πρόκειται για μέθοδο δομικής αναβάθμισης κατασκευής η οποία προσφέρει σημαντική αύξηση της δυσκαμψίας και της ικανότητας παραμόρφωσης. Κατά κανόνα οι διατμητικοί σύνδεσμοι κατασκευάζονται από χάλυβα γεγονός το οποίο ευνοεί την απορρόφηση σεισμικής ενέργειας λόγω των ανελαστικών παραμορφώσεων.

Η τεχνική εφαρμογής των δικτυωτών συστημάτων στις κατασκευές οπλισμένου σκυροδέματος είναι αντίστοιχη της τοποθέτησής τους σε μεταλλικές κατασκευές. Κάποια

από τα κυριότερα πλεονεκτήματα τους αφορούν την ταχύτητα της εφαρμογής, την μικρή αύξηση του βάρους ενώ μέσω της εφαρμογής τους δεν παρεμποδίζεται ο φυσικός φωτισμός των εσωτερικών χώρων (Δρίτσος, 2005). Αξίζει να σημειωθεί ότι η τοποθέτηση των δικτυωτών συστημάτων δύναται να πραγματοποιηθεί και εκτός του φανώματος ειδικά στις περιπτώσεις που περικλείεται τοιχοπλήρωση εντός των πλαισίων ΟΣ. Επιπλέον, εντοπίζεται πληθώρα διαθέσιμων διατάξεων όπως σχήμα Κ ή ρόμβου, με τα χιαστί διαγώνια στηρίγματα να αποτελούν την πιο χρησιμοποιούμενη διάταξη.

Όσον αφορά τη συνδεσιμότητα των δικτυωτών συστημάτων με το πλαίσιο οπλισμένου σκυροδέματος διακρίνονται δύο κύριες περιπτώσεις. Η πρώτη αφορά στην άμεση εφαρμογή των στηριγμάτων στον φέροντα οργανισμό. Στις υπόλοιπες περιπτώσεις η εφαρμογή των στηριγμάτων πραγματοποιείται επι μεταλλικού πλαισίου το οποίο συνδέεται με το πλαίσιο οπλισμένου σκυροδέματος (Tsironis et al., 2014).



Σχήμα 2-21 Χιαστί διαγώνια χαλύβδινα στηρίγματα (Δρίτσος, 2005)

Παρόλη την ευεργετική συνεισφορά της μεθόδου στη δομική απόκριση της κατασκευής, υπάρχουν στοιχεία άξια προσοχής όσον αφορά την εφαρμογή της. Αρχικά λόγω της τοποθέτησης των χαλύβδινων στηριγμάτων εισάγονται νέα εντατικά μεγέθη στο φορέα και ειδικότερα στο πλαίσιο οπλισμένου σκυροδέματος (Δρίτσος, 2005). Ο κόμβος σύνδεσης δοκού υποστυλώματος χρήζει πρόσθετης αντοχής δεδομένου ότι αποτελεί το σημείο σύνδεσης του υπάρχοντος φορέα με τα νέα στοιχεία. Απαραίτητο στοιχείο της άρτιας εφαρμογής της μεθόδου είναι να περιλαμβάνονται οι κόμβοι στην ενίσχυση (Δρίτσος, 2005).

Άξιος προσοχής είναι και ο λυγισμός των χαλύβδινων στηριγμάτων. Πιο συγκεκριμένα οι ανακυκλιζόμενες δράσεις δύναται να οδηγήσουν στον λυγισμό των μεταλλικών στηριγμάτων. Για αυτόν τον λόγο, ειδικότερα για τα διαγώνια στηρίγματα έχει προταθεί λέπτυνση της διατομής κοντά στα σημεία σύνδεσης όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα.

Συνοψίζοντας η προσθήκη δικτυωτών στηριγμάτων εγγυάται για την αύξηση της αντοχής και της δυσκαμψίας της κατασκευής (Δρίτσος, 2005). Επιπλέον, αξίζει να αναφερθεί ότι η συγκεκριμένη μέθοδος με κατάλληλη μελέτη και εφαρμογή δύναται να αναλάβει εξολοκλήρου τις πλευρικές καταπονήσεις διευκολύνοντας τη λειτουργία του πλαισίου οπλισμένου σκυροδέματος (Tsironis et al., 2014). Γενικότερα, η εφαρμογή των δικτυωτών στηριγμάτων δεν προϋποθέτει τη διακοπή της λειτουργίας της κατασκευής ούτε δημιουργεί προβλήματα αρχιτεκτονικού περιεχομένου, γεγονός το οποίο ευνοεί την ευρεία εφαρμογή. Παρόλα αυτά δημιουργούνται προβλήματα συνδεσιμότητας των στηριγμάτων με το πλαίσιο οπλισμένου σκυροδέματος και η μέθοδος δεν φαντάζει ιδανική για κατασκευές με εκτενείς κατασκευαστικές ατέλειες. Η αποτελεσματική εφαρμογή της μεθόδου προϋποθέτει την αναβάθμιση των περιφερειακών στοιχείων ΟΣ με άλλη μέθοδο δομικής αναβάθμισης γεγονός το οποίο αυξάνει σημαντικά το κόστος και αποτελεί ανασταλτικό παράγοντα στην ευρεία εφαρμογή.

- **Εμφατνούμενα Τοιχώματα**

Η εμφάνιση τοιχωμάτων σε κατασκευές οπλισμένου σκυροδέματος θεωρείται η πλέον αποτελεσματική μέθοδος σε όρους αύξησης της αντοχής και της δυσκαμψίας της κατασκευής (Δρίτσος, 2005). Πρόκειται για μέθοδο η οποία αντιμετωπίζει τις υπάρχουσες ατέλειες στη μόρφωση του φορέα όπως ασυμμετρίες στη κατανομή της δυσκαμψίας ή εκκεντρότητες.

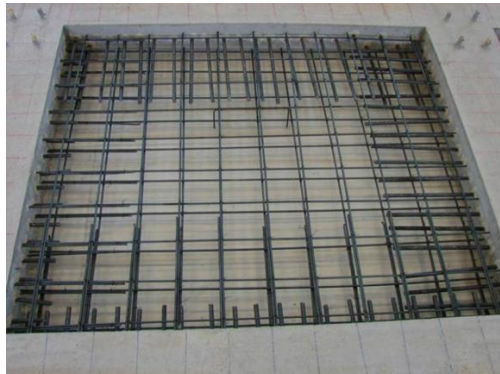
Φυσικά πρόκειται για μέθοδο η οποία προϋποθέτει την κατάλληλη μελέτη αφού η αλόγιστη τοποθέτηση νέων τοιχωμάτων στη κατασκευή ενδέχεται να οδηγήσει στην απότομη μεταβολή της δυσκαμψίας καθ' ύψος (Δρίτσος, 2005). Σε κάθε περίπτωση, η εφαρμογή των αντισεισμικών κανονισμών κρίνεται απαραίτητη για την άρτια εφαρμογή της μεθόδου. Επιπλέον, ιδιαίτερα σημαντικό κρίνεται να ληφθεί υπόψιν η συνεισφορά των ήδη υπάρχοντων φερόντων στοιχείων της κατασκευής.

Γενικότερα εντοπίζονται τρεις κύριες τεχνικές τοιχωματοποίησης πλαισίων ΟΣ μέσω εμφάνισης ανάλογα με τον τύπο του τοιχώματος που χρησιμοποιείται : 1. Τοιχώματα οπλισμένου σκυροδέματος τα οποία κατασκευάζονται στο εργοτάξιο 2. Προκατασκευασμένα Τοιχώματα και 3. Προσθήκη τοιχοποιίας από οπτόπλινθους ή τσιμεντόπλινθους (Δρίτσος, 2005).

1. Τοιχώματα έγχυτου ή εκτοξευόμενου σκυροδέματος

Η συγκεκριμένη τεχνική αφορά τοιχώματα τα οποία κατασκευάζονται στο εργοτάξιο και περικλείονται σε πλαίσια οπλισμένου σκυροδέματος και συνδέονται κατά μήκος της περιμέτρου τους με τις υπάρχουσες δοκούς και τα υποστυλώματα (Δρίτσος, 2005).

Σε περιπτώσεις που πέραν της αύξησης της αντοχής και της δυσκαμψίας επιδιώκεται και η αύξηση της πλαστιμότητας η σύνδεση των τοιχωμάτων πραγματοποιείται μόνο με τις δοκούς της άνω παρειάς. Σε περίπτωση που η εμφάντωση πραγματοποιηθεί χωρίς σύνδεση με τα περιμετρικά υποστυλώματα, η σύνδεση με την υπάρχουσα θεμελίωση κρίνεται αναγκαία (Δρίτσος, 2005).



Σχήμα 2-22 Τοιχωματοποίηση πλαισίου ΟΣ (Στρεπέλιας, 2012)

Σημείο άξιο προσοχής για την εφαρμογή της μεθόδου αποτελεί η εξασφάλιση μεταφοράς των οριζόντιων δράσεων στο νέο τοίχωμα. Απαραίτητος κρίνεται ο έλεγχος ότι οι δοκοί που συντρέχουν στο νέο τοίχωμα διαθέτουν επαρκή διαμήκη οπλισμό για τη μεταφορά των οριζόντιων δράσεων (Δρίτσος, 2005). Σε περίπτωση που ο οπλισμός είναι ανεπαρκής, η τοποθέτηση πρόσθετου οπλισμού κρίνεται απαραίτητη. Επίσης σημαντικός κρίνεται ο έλεγχος για βέλτιστη συνδεσιμότητα στη διεπιφάνεια μεταξύ νέου και παλαιού σκυροδέματος. Η προσθήκη διατμητικών συνδέσμων εξασφαλίζει τη κατάλληλη σύνδεση στη διεπιφάνεια. Η συνηθέστερη μορφή συνδέσμων αφορά χαλύβδινα βλήτρα τα οποία εφαρμόζονται αφού έχει πραγματοποιηθεί κατάλληλος καθαρισμός.

Ένα πρόβλημα το οποίο ανάγεται στη σύνδεση των νέων τοιχωμάτων με το υπάρχον πλαίσιο οπλισμένου σκυροδέματος αφορά στη συστολή ξήρανσης του νέου σκυροδέματος η οποία εκδηλώνεται μέσω ρηγμάτωσης στη διεπιφάνεια (Δρίτσος, 2005). Το συγκεκριμένο πρόβλημα αντιμετωπίζεται μέσω της χρήσης σκυροδέματος ειδικής σύνδεσης. Ένα ακόμη πρόβλημα προκύπτει μόνο στη περίπτωση έγχυτου σκυροδέματος λόγω της δυσκολίας σκυροδέτησης του υψηλότερου τμήματος του νέου τοιχώματος. Για αυτόν τον λόγο το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα αποτελεί προτιμότερη λύση.

2. Προκατασκευασμένα Τοιχώματα

Η τοποθέτηση προκατασκευασμένων φατνωμάτων εντός των υφιστάμενων πλαισίων οπλισμένου σκυροδέματος παρουσιάζει αρκετά πλεονεκτήματα συγκριτικά με τα νέα τοιχώματα έγχυτου ή εκτοξευόμενου σκυροδέματος. Η εφαρμογή των προκατασκευασμένων φατνωμάτων είναι ευκολότερη, χρήζει λιγότερης εξειδίκευσης, είναι γρηγορότερη ενώ θεωρείται οικονομικότερη από τα νέα τοιχώματα σκυροδέματος. Παρόλα αυτά αξίζει να σημειωθεί ότι η συνεισφορά των φατνωμάτων είναι λιγότερο αποδοτική σε όρους αύξησης αντοχής και δυσκαμψίας για το σύνολο της κατασκευής (Δρίτσος, 2005).

Η συγκεκριμένη τεχνική δύναται να χρησιμοποιηθεί για κάλυψη ολόκληρου ανοίγματος ή τμήματος του. Τα προκατασκευασμένα τοιχώματα δύναται να συνδέονται με τα υποστυλώματα οπλισμένου σκυροδέματος ή και όχι. Όσον αφορά την σύνδεση των νέων τοιχωμάτων με το πλαίσιο οπλισμένου σκυροδέματος χρησιμοποιούνται ειδικές τεχνικές αγκύρωσης οι οποίες βελτιώνουν σημαντικά την αποτελεσματικότητα της τεχνικής. Στις περιπτώσεις όπου επιδιώκεται αύξηση της πλαστιμότητας μέσω της μεθόδου δομικής αναβάθμισης, συνιστάται η σύνδεση των φατνωμάτων μόνο με τις δοκούς οπλισμένου σκυροδέματος (Δρίτσος, 2005).

Τα προκατασκευασμένα τοιχώματα δύναται να είναι συμπαγή από σκυρόδεμα, ενώ μπορεί να έχουν τη μορφή τοιχωμάτων τύπου "σάντουιτς" αποτελούμενα στη περίμετρο τους από οπλισμένο σκυρόδεμα ή χαλύβδινα φύλλα (Δρίτσος, 2005). Η εφαρμογή των τοιχωμάτων τύπου "σάντουιτς" θεωρείται δυσκολότερη και χρήζει εξειδικευμένης μελέτης για περιπτώσεις φωτιάς.

Η συγκεκριμένη μέθοδος μέχρι σήμερα συναντάται σε ανεπτυγμένες κατασκευαστικά χώρες και η λειτουργία τους περιορίζεται σε διαχωριστικά εσωτερικών χώρων τα οποία όμως συνεισφέρουν στην αντισεισμική λειτουργία της κατασκευής (Δρίτσος, 2005). Παρόλα αυτά τα τελευταία χρόνια παρατηρείται έντονη ανάπτυξη της εν λόγω τεχνικής και ειδικότερα των τοιχωμάτων τύπου "σάντουιτς", με στόχο την αξιοποίησή τους για επίτευξη υψηλών αντοχών σε χαμηλά κόστη.

3. Τοιχώματα από Τοιχοποιία

Μία ακόμα μέθοδος τοιχωματοποίησης πλαισίων οπλισμένου σκυροδέματος είναι η κατασκευή οπλισμένης ή άοπλης τοιχοποιίας. Για την κατασκευή της τοιχοποιίας χρησιμοποιούνται τυπικοί οπτόπλινθοι ή τσιμεντόπλινθοι. Μολονότι η συγκεκριμένη τεχνική είναι λιγότερο αποτελεσματική από αυτές που προαναφέρθηκαν, είναι οικονομικότερη ενώ η νέα τοιχοποιία αποσβένει αποδοτικά την εισαγόμενη σεισμική ενέργεια.

Στη περίπτωση της οπλισμένης τοιχοποιίας, οι οπλισμοί αγκυρώνονται στο περιμετρικό πλαίσιο οπλισμένου σκυροδέματος μέσω ειδικών ρητινών είτε με χαλύβδινα αγκύρια (Δρίτσος, 2005).

Το σημαντικότερο μειονέκτημα της συγκεκριμένης τεχνικής είναι η αβεβαιότητα η οποία επικρατεί από την πλευρά των μελετητών σχετικά με τα ακριβή χαρακτηριστικά των νέων εμφανιζόμενων τοιχοπληρώσεων και με τη συνδεσιμότητά τους με το περιμετρικό πλαίσιο. Εξαιτίας αυτής της αβεβαιότητας, κρίνεται αδύνατο να γνωρίζουμε την απόκριση του φορέα παρουσία του νέου τοιχώματος. Για τους παραπάνω λόγους η εφαρμογή της συγκεκριμένης τεχνικής γίνεται εμπειρικά και κυριότερος της στόχος είναι η αντιμετώπιση των ήδη υπάρχουσών ασυμμετριών στη κάτοψη (Δρίτσος, 2005).



Σχήμα 2-23 Οπλισμένη τοιχοποιία σε πλαίσιο ΟΣ (Koutromanos et al., 2011)

- **Σεισμική Μόνωση**

Η σεισμική μόνωση προτάθηκε ως λύση σεισμικής προστασίας τόσο νέων όσο και υφιστάμενων κατασκευών από έντονες σεισμικές διεγέρσεις. Πρόκειται για περίτεχνη μέθοδο ενίσχυσης η οποία χρήζει άρτιας εξειδίκευσης, για αυτόν τον λόγο μέχρι σήμερα δεν είναι ιδιαίτερα διαδεδομένη. Η Ιαπωνία, για παράδειγμα, χώρα ιδιαίτερα ανεπτυγμένη στο κατασκευαστικό τομέα, μόλις το 2015 ξεκίνησε τον σχεδιασμό σεισμικά μονωμένων κατασκευών με μόλις 1500 πολύωρες κατασκευές οι οποίες διέθεταν σύστημα σεισμικής μόνωσης (Sirag et al., 2015).

Ένας ακόμη λόγος για τον οποίο η σεισμική μόνωση δεν είναι διαδεδομένη είναι η ασυμβατότητα της μεθόδου με τις διάφορες κτιριακές τυπολογίες. Πριν την εγκατάσταση της συγκεκριμένης μεθόδου είναι απαραίτητο να ληφθούν υπόψιν τα εδαφολογικά χαρακτηριστικά της κατασκευής όπως και ο αρχιτεκτονικός της σχεδιασμός, στοιχεία του οποίου καθορίζουν την σεισμική απόκριση του συνόλου της κατασκευής.

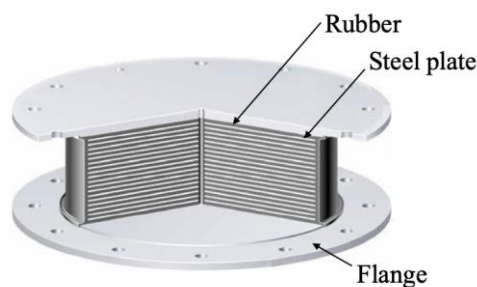
Όσο μεγαλύτερη η κατασκευή τόσο μεγαλύτερη και η βάση θεμελίωσης. Κατά τη διάρκεια σεισμού στις συμβατικές κατασκευές, η σεισμική διέγερση μεταφέρεται απευθείας

από τη βάση θεμελίωση στην ανωδομή (Sirag et al., 2015). Οι δονήσεις περνούν στο υπόλοιπο της κατασκευής έχοντας τις καταστρεπτικές επιπτώσεις. Την αδιάκοπη μεταφορά δονήσεων στο σύνολο της κατασκευής καλείται να αντιμετωπίσει η σεισμική μόνωση. Το σύστημα της μόνωσης χρησιμοποιεί κατάλληλες συσκευές απορρόφησης κραδασμών άρα και ενέργειας οι οποίες τοποθετούνται μεταξύ του κτιρίου και του εδάφους.

Οι συσκευές με τις οποίες επιτυγχάνεται η σεισμική μόνωση των κτιρίων εντάσσονται στις κατηγορίες είτε των μονωτών είτε των αποσβεστήρων. Παρακάτω αναλύονται τα χαρακτηριστικά κάποιων από τις διαθέσιμες στην αγορά συσκευές.

1. Ελαστομερικά Εφέδρανα

Πρόκειται για συσκευή η οποία αποτελείται στο εσωτερικό της από στρώματα χάλυβα και καουτσούκ. Πρακτικά η συγκεκριμένη συσκευή έχει τη δυνατότητα να στηρίζει το κτίριο αλλά και να το μετακινεί πλευρικά (Sirag et al., 2015).



Σχήμα 2-24 Διάταξη ελαστομερικού εφέδρανου (Nishi et al., 2019).

2. Εφέδρανα Ολίσθησης

Ο ολισθητήρας διαθέτει λεία στρώση από οργανικό πολυμερές και πλάκα χάλυβα. Όπως και στη διάταξη του ελαστομερή μονωτή, ο ολισθητήρας μπορεί να κρατήσει το βάρος του κτιρίου και δύναται να μετακινηθεί πλευρικά, με συγκεκριμένο εύρος αξιοποιώντας δυνάμεις τριβής (Sirag et al., 2015).



Σχήμα 2-25 Διάταξη εφέδρανου ολίσθησης (Warn et al., 2012).

3. Σεισμικός Αποσβεστήρας

Για την πλήρη απορρόφηση της εκκλειόμενης ενέργειας από τις σεισμικές δονήσεις χρησιμοποιούνται αποσβεστήρες. Το μεγαλύτερο μέρος της αγοράς κατέχουν οι χαλύβδινοι αποσβεστήρες και οι αποσβεστήρες μολύβδου οι οποίοι βασίζονται στις ελαστοπλαστικές ιδιότητες του χάλυβα και το μολύβδου αντίστοιχα.



Σχήμα 2-26 Αποσβεστήρας λαδιού (t-mec.co.jp)

Πρακτικά μέσω των παραπάνω συσκευών επιδιώκεται τη κίνηση του κτιρίου όταν αυτό υπόκειται σε σεισμική δόνηση με την ελάχιστη ενέργεια να περνά στην ανωδομή. Φυσικά δεν είναι απόλυτα δυνατό να πραγματοποιηθεί πλήρης μηδενισμός της μεταφοράς ενέργειας μεταξύ εδάφους και υπερκείμενης κατασκευής, ωστόσο μέσω της σεισμικής μόνωσης επιτυγχάνεται μερικός περιορισμός. Για το εύρος ιδιοπεριόδων τόσο της δομής όσο και της διέγερσης διαμορφώνεται διαφορετική σχέση μεταξύ μετατοπίσεων και επιταχύνσεων εδάφους και δομής. Μέσω της σεισμικής μόνωσης το παραπάνω πρόβλημα αντιμετωπίζεται αφού περιορίζεται η μεταφορά κινητικής ενέργειας και κατά επέκταση η κίνηση της δομής ([Paul, 2016](#)).

Η εφαρμογή της σεισμικής μόνωσης στις κατασκευές έχει θετικό αντίκτυπο. Τα συστήματα μόνωσης καταφέρνουν να μειώσουν τις σεισμικές απαιτήσεις του κτιρίου δεδομένου ότι περιορίζονται οι αναπτυσσόμενες μετατοπίσεις. Γίνεται αντιληπτό πως η εφαρμογή της σεισμικής μόνωσης είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική ωστόσο πρόκειται για τεχνοτροπία σεισμικής προστασίας η οποία χρήζει ιδιαίτερης εξειδίκευσης. Λόγω της αποτελεσματικότητας και της απαιτούμενης εξειδίκευσης η σεισμική μόνωση συναντάται σε μεγάλα έργα, με υπέρογκο κόστος και ανάγκη προστασίας όπως οι γέφυρες.

Μολονότι πρόκειται για αποτελεσματική μέθοδο ικανή να προστατέψει το κτιριακό απόθεμα, εκτός από την απαιτούμενη εξειδίκευση η εγκατάσταση της σεισμικής μόνωσης ενδέχεται να χρήζει τη διακοπή της λειτουργίας του κτιρίου, γεγονός το οποίο δεν έχει θετικό αντίκτυπο για τις μεθόδους ενίσχυσης.

2.3 Ενίσχυση Εμφατνούμενων Τοιχοπληρώσεων

2.3.1 Το Πρόβλημα

Η παρούσα εργασία αφορά κατά κύριο λόγο τη δομική ενίσχυση κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος παρουσία τοιχοπληρώσεων. Με τον όρο εμφατνούμενη τοιχοποιία περιγράφεται επαρκέστερα το παραπάνω δομικό σύστημα, το οποίο αποτελείται από το πλαίσιο οπλισμένου σκυροδέματος και την εμφατνούμενη πλήρωση. Η δομική τρωτότητα των υφιστάμενων κατασκευών όπως αναλύθηκε παραπάνω αφορούσε τους ανεπαρκείς αντισεισμικούς κανονισμούς οι οποίοι βρίσκονταν σε ισχύ μέχρι πριν δύο δεκαετίες. Παρόλα αυτά όπως επισημαίνεται από τον Κούτας (2015) η συνολική απόκριση της κατασκευής έναντι σεισμικής διέγερσης είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με τη παρουσία της πλήρωσης. Αξίζει να σημειωθεί ότι για τη πλειονότητα των υπαρχουσών κατασκευών, οι τοιχοπληρώσεις δεν σχεδιάστηκαν ως φέροντα στοιχεία κατά το σχεδιασμό. Δεδομένου ότι οι τοιχοπληρώσεις κατασκευάζονταν μετά τον σκελετό οπλισμένου σκυροδέματος, δεν συνυπολογίστηκαν στο σχεδιασμό της κατασκευής. Παρακάτω σχολιάζεται αναλυτικότερα η συνεισφορά των εμφατνούμενων τοιχοπληρώσεων στην απόκριση του συνόλου της κατασκευής.

Όπως επισημαίνεται από τον Fardis (2009) μετά την παρατήρηση σεισμικών γεγονότων μεγάλης έντασης η συνεισφορά των τοιχοπληρώσεων δύναται να είναι ευεργετική για την απόκριση της κατασκευής έναντι πλευρικών δράσεων. Τα κυριότερα χαρακτηριστικά της ευεργετικής δράσης των πληρώσεων αφορούν στην αύξηση της δυσκαμψίας της κατασκευής και στη μείωση των απαιτούμενων παραμορφώσεων, διευκολύνοντας τη λειτουργία του φέροντα οργανισμού. Επιπροσθέτως, λόγω της παρουσίας τοιχοπληρώσεων αυξάνεται η εντός επιπέδου διατμητική αντοχή των φανωμάτων. Τέλος, δημιουργείται συμπαγής μηχανισμός απορρόφησης ενέργειας χάριν της εντός επιπέδου συμπεριφοράς της πλήρωσης.

Απαραίτητη προϋπόθεση για τα παραπάνω χαρακτηριστικά θεωρείται η βέλτιστη σύνδεση της πλήρωσης με το περιμετρικό πλαίσιο οπλισμένου σκυροδέματος. Ειδικότερα για την Ελλάδα, όπως επισημαίνεται από τον Κούτας (2015), επικρατούν ειδικές διατάξεις καλής σφήνωσης της πλήρωσης με το πλαίσιο ΟΣ.

Γενικότερα, επικρατεί προβληματισμός στην κατασκευαστική κοινότητα σχετικά με το εάν θα πρέπει η πλήρωση να είναι σε άμεση επαφή με τα δομικά στοιχεία οπλισμένου σκυροδέματος και εφόσον η πλήρωση συνδέεται με το πλαίσιο εάν θα πρέπει να συνυπολογίζεται στον σχεδιασμό του φέροντος οργανισμού.

Στη περίπτωση όπου οι τοιχοπληρώσεις βρίσκονται σε άμεση επαφή με το πλαίσιο οπλισμένου σκυροδέματος, χαρακτηριστικό κοινό για την πλειονότητα των κατασκευών, η παρουσία των τοιχοπληρώσεων δύναται να έχει δυσμενή επιρροή για την απόκριση του συνόλου της κατασκευής. Οι κυριότερες δυσμενείς επιρροές αναλύονται παρακάτω όπως περιεγράφηκαν από τον Fardis (2009).

Δημιουργία μηχανισμού «μαλακού ορόφου». Ο μηχανισμός «μαλακού ορόφου» δύναται να οδηγήσει το κτίριο σε μερική ή ακόμη και ολική κατάρρευση. Πρόκειται για μηχανισμό ο οποίος συναντάται σε πολυώροφες κατασκευές και είναι υπεύθυνος για πληθώρα κτιρίων τα οποία κατέρρευσαν μετά από σεισμό. Συνήθως συναντάται στον ισόγειο όροφο. Πρακτικά αυξάνονται κατά πολύ οι σχετικές μετατοπίσεις στη στάθμη του ισογείου. (Fardis, 2009).

Συγκέντρωση ανελαστικών παραμορφώσεων σε σημείο της κατασκευής σε κάτοψη. Βασικό χαρακτηριστικό του αντισεισμικού σχεδιασμού είναι η συμμετρία των δομικών στοιχείων της κατασκευής. Πιο συγκεκριμένα, μη συμμετρικά τοποθετημένες τοιχοπληρώσεις δημιουργούν εκκεντρότητα μεταξύ του κέντρου μάζας και του κέντρου δυσκαμψίας της κατασκευής (Fardis, 2009). Τα κτίρια αυτά χαρακτηρίζονται από ευπάθεια έναντι σεισμικών φορτίσεων. Επιπλέον, από τους κανονισμούς επισημαίνεται πως τα δομικά στοιχεία θα πρέπει να «τρέχουν» από τη βάση θεμελίωσης έως και την ανώτερη στάθμη της κατασκευής χωρίς να διακόπτονται. Διακοπή των δομικών στοιχείων για αρχιτεκτονικούς λόγους, τaráσσει τη συμμετρία της κατασκευής και δημιουργεί πρόβλημα στην απόκρισή της.

Διατμητική αστοχία των γειτνιαζόντων στην τοιχοπλήρωση υποστυλωμάτων. Δύσκαμπτες τοιχοπληρώσεις διαθέτουν μεγάλη διατμητική αντοχή. Δεδομένου ότι οι συγκεκριμένες τοιχοπληρώσεις δεν μπορούν να υποστούν βλάβη τόσο εύκολα, προκαλούν διατμητική βλάβη σε αδύνατα υποστυλώματα με τα οποία ενώνονται (Fardis, 2009). Ο συγκεκριμένος τρόπος αστοχίας είναι απόρροια τοπικών φαινομένων.

Η τοιχοπλήρωση αρχικά χρησιμοποιούταν για λόγους εσωτερικής διαρρύθμισης των κατασκευών. Αντιμετωπιζόταν ως κατασκευαστικό σύνορο για τους εσωτερικούς χώρους έως ότου ο Polyakov (1956) επισήμανε ότι η δυσκαμψία της τοιχοπλήρωσης είναι μεγαλύτερη από αυτή του πλαισίου το οποίο την περικλείει. Πρακτικά, τονίζεται ότι το πλαίσιο οπλισμένου σκυροδέματος και η τοιχοπλήρωση συνεργάζονται και αλληλοεπιδρούν με αποτέλεσμα η συνολική δυσκαμψία του συστήματος πλαίσιο-πλήρωση να είναι μεγαλύτερη από αυτή των μεμονωμένων δομικών στοιχείων (Zhai et al., 2015). Σύμφωνα με

τους Kose και Karslioglu (2011) επισημαίνεται η συμμετοχή της πλήρωσης στην παραλαβή σεισμικών φορτίσεων και ο ρόλος της στην μεταβολή της φυσικής περιόδου της ταλάντωσης.

Συνοψίζοντας, για κατασκευές των οποίων η ανέγερση δεν έγινε βάσει των σύγχρονων αντισεισμικών κατασκευών, οι τοιχοπληρώσεις καλούνται να αναλάβουν την αντίσταση του συνόλου έναντι της σεισμικής διέγερσης. Μολονότι, οι πληρώσεις καταφέρνουν να αντισταθούν στην αρχή φαίνεται να αστοχούν πρόωρα. Σύμφωνα με τον Κούτας (2015) η συνηθέστερη πρόωρη αστοχία τοιχοπληρώσεων συναντάται στη στάθμη του ισογείου λόγω της απαίτησης μεγάλων παραμορφώσεων. Επιπλέον, η παρουσία τοιχοπληρώσεων δύναται να προκαλέσει έντονες βλάβες και στα γειτνιάζοντα δομικά στοιχεία οπλισμένου σκυροδέματος. Το παραπάνω φαινόμενο παρατηρείται έντονα όταν οι τοιχοπληρώσεις μεγάλης δυσκαμψίας συνορεύουν με μέλη οπλισμένου σκυροδέματος μικρής αντοχής, λόγω ελλιπούς οπλισμού και ανεπαρκούς σχεδιασμού.

Λόγω των όσων προαναφέρθηκαν η συνεισφορά των τοιχοπληρώσεων στην απόκριση της κατασκευής κατά τον σεισμό είναι προφανής. Για αυτόν τον λόγο στο επερχόμενο κύμα αναβάθμισης του ευρωπαϊκού κτιριακού αποθέματος δεν πρέπει να λησμονηθεί η δομική ενίσχυση των τοιχοπληρώσεων. Στη διεθνή βιβλιογραφία εντοπίζεται πληθώρα πειραματικών δοκιμών οι οποίες εκπονήθηκαν σε εργαστήριο και αποτύπωσαν τη λειτουργία του συστήματος πλαίσιο ΟΣ-πλήρωση.

Παρακάτω παρατίθενται εικόνες από βλάβες τοιχοπληρώσεων μετά από έντονη σεισμική διέγερση. Οι εν λόγω βλάβες δύναται να οδηγήσουν σε μερική ή ακόμη και ολική κατάρρευση της κατασκευής καθιστώντας το ενδεχόμενο δομικής αναβάθμισης μείζονος σημασίας.



(α)



(β)

Σχήμα 2-27 Δομική αστοχία τοιχοπληρώσεων σε πολώροφες κατασκευές ΟΣ

(Dolce et al., 2009)

Η παρουσία μη ενισχυμένων τοιχοπληρώσεων αποτελεί ένα οξύ πρόβλημα για τις παλαιότερες κατασκευές οι οποίες απαρτίζουν το υπάρχον ευρωπαϊκό κτιριακό απόθεμα. Μέσω των παραπάνω γίνεται αντιληπτή η ανάγκη ενίσχυσής τους. Η επέμβαση καλείται να αποτρέψει τη πρόωρη αστοχία των πληρώσεων και να τις μετατρέψει σε αξιόπιστα στοιχεία ανάληψης δυνάμεων και παραμορφώσεων. Επιπλέον, καλούνται να αποτρέψουν τη δημιουργία μαλακού ορόφου καθώς και να αυξήσουν πλευρική αντοχή και δυσκαμψία σε σημεία της κάτοψης όπου εντοπίζονται ασυμμετρίες. Τέλος και πιο σημαντικά οι δομικές αναβαθμίσεις στο επίπεδο των πληρώσεων αποσκοπούν στην αποφυγή κατάρρευσής τους.

Παρακάτω μελετώνται αναλυτικότερα τα είδη καταπόνησης των υπαρχουσών πληρώσεων καθώς και οι μηχανισμοί ανάληψης δυνάμεων και αστοχίας για κάθε περίπτωση.

2.3.2 Καταπονήσεις Εμφανιζόμενων Τοιχοπληρώσεων

Εφαρμόζονται φορτία τόσο παράλληλα στο επίπεδο της πλήρωσης όσο και κάθετα σε αυτό αντιπροσωπεύοντας τα καθεστώτα της εντός και της εκτός επιπέδου καταπόνησης. Οι περισσότερες μελέτες επικεντρώνονται στην εντός επιπέδου καταπόνηση του συστήματος. Μικρό μέρος της υπάρχουσας βιβλιογραφίας συνδυάζει τις καταπονήσεις επιβάλλοντας δυνάμεις τόσο παράλληλα όσο και κάθετα στο επίπεδο της πλήρωσης.

2.3.2.1 Εντός Επιπέδου Καταπόνηση

Η ικανότητα παραλαβής φορτίων από το επίπεδο της πλήρωσης αφορά στη συνεργασία των δύο υλικών κατασκευής τα οποία την απαρτίζουν. Το πρώτο υλικό αφορά στα στοιχεία από τα οποία αποτελείται η πλήρωση όπως οι οπτόπλινθοι, ενώ το δεύτερο υλικό είναι το τσιμεντοκονίαμα.

Οι πληρώσεις κατά τη διάρκεια ζωής της κατασκευής καλούνται εκτός από τα κατακόρυφα βαρυτικά φορτία να παραλάβουν και οριζόντιες δυνάμεις. Όταν τα φορτία τα οποία καταπονούν την πλήρωση υπερβούν τη αντοχή της οδηγούμεστε σε ψαθυρή, πρόωρη αστοχία μέσω της οποίας δύναται να επέλθει η κατάρρευση. Για να γίνουν καλύτερα αντιληπτοί οι μηχανισμοί αστοχίας της τοιχοποιίας εκτελούνται πειραματικές διαδικασίες εντός επιπέδου καταπόνησης των πληρώσεων. Η εντός επιπέδου καταπόνηση προϋποθέτει την καταπόνηση του επιπέδου της πλήρωσης μέσω επιβολής φορτίων παράλληλων στο επίπεδό της.

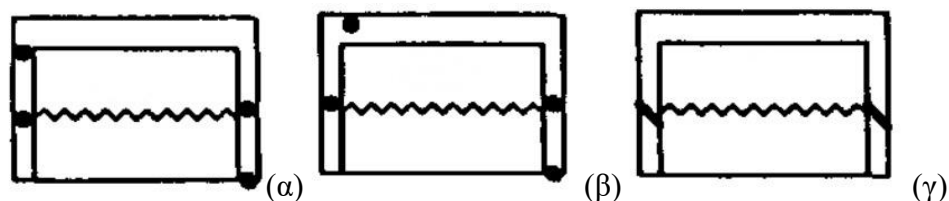
Η τοιχοποιία δύναται να υποβληθεί σε δοκιμές εντός επιπέδου κάμψης και εντός επιπέδου διάτμησης. Το αξονικό φορτίο, η διεύθυνση του οποίου είναι κατακόρυφη και δύναται να οδηγήσει στην εντός επιπέδου κάμψη ή στην εντός επιπέδου διάτμηση στοιχείων

τύπου φατώματος, αντικατοπτρίζει τη δράση των βαρυτικών δυνάμεων από τους υπερκείμενους ορόφους.

Γενικότερα η τοιχοποιία δεν διαθέτει μηχανισμούς ανακατανομής της έντασης, κοινώς δεν χαρακτηρίζεται από ανελαστική συμπεριφορά. Για αυτόν τον λόγο η εκ των προτέρων γνώση της φέρουσας ικανότητας της τοιχοποιίας όταν αυτή καταπονείται από πλευρικά φορτία κρίνεται δύσκολη. Παρόλα αυτά η παρατήρηση σεισμικών δράσεων σε κατασκευές ΟΣ παρουσία πληρώσεων καθιστά ευκολότερη την ανάλυση των αναμενόμενων μορφών αστοχίας στο επίπεδο της πλήρωσης. Οι κυριότερες μορφές αστοχίας της τοιχοποιίας έναντι της εντός επιπέδου καταπόνησης παρουσιάζονται αναλυτικά παρακάτω.

- **Οριζόντια Ολίσθηση Τμημάτων Τοιχοποιίας**

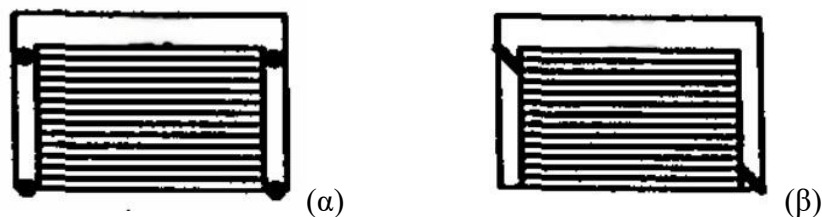
Ο συγκεκριμένος μηχανισμός αστοχίας χαρακτηρίζεται από οριζόντιες ρωγμές ολίσθησης στην τοιχοπλήρωση οι οποίες συνηθέστερα εντοπίζονται στο μέσον του ύψους της. Συναντάται σε περιπτώσεις όπου χρησιμοποιείται κονίαμα χαμηλής αντοχής ενώ η σύνδεση πλαισίου τοιχοπλήρωσης είναι αρκετά ισχυρή (Σκυριανού, 2019). Κατά αυτόν τον τρόπο παρατηρείται διατμητική συντριβή η οποία οδηγεί στην αποκόλληση και την ανάπτυξη σχετικών μετατοπίσεων μεταξύ της άνω και κάτω παρειάς της τοιχοπλήρωσης. Επιπλέον, εντοπίζεται σχηματισμός πλαστικών αρθρώσεων στα υποστυλώματα ενώ στις περιπτώσεις που τα υποστυλώματα είναι ισχυρότερα από τη δοκό παρατηρείται σχηματισμός πλαστικών αρθρώσεων και στο επίπεδο της δοκού (Σκυριανού, 2019). Τέλος, τα υποστυλώματα δύναται να αστοχήσουν διατμητικά και να ακολουθήσει ο σχηματισμός καμπτικών πλαστικών αρθρώσεων, γεγονός το οποίο οδηγεί σε ψαθυρή αστοχία (Σκυριανού, 2019).



Σχήμα 2-28 (α) Ολίσθηση με δημιουργία πλαστικών αρθρώσεων στα υποστυλώματα (β) Ολίσθηση με δημιουργία πλαστικών αρθρώσεων σε υποστυλώματα και δοκό (γ) Ολίσθηση με διατμητική αστοχία υποστυλωμάτων (Mehrabi et al., 1996)

Επιπρόσθετα υπάρχει και η περίπτωση σχηματισμού οριζόντιων ρωγμών ολίσθησης σε περισσότερους από έναν αρμούς (Σκυριανού, 2019). Η αστοχία αυτή εντοπίζεται σε περιπτώσεις που έχει χρησιμοποιηθεί κονίαμα πολύ χαμηλής διατμητικής αντοχής. Οι πολλαπλές ρωγμές ολίσθησης στην πλήρωση δύναται να οδηγήσουν στον σχηματισμό

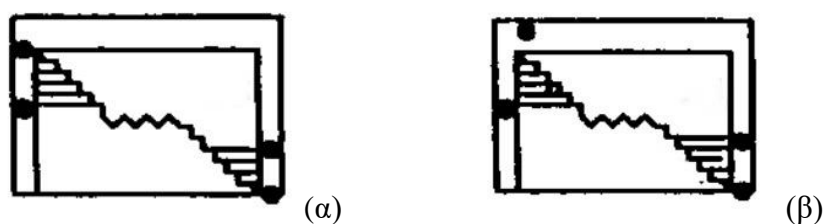
πλαστικών αρθρώσεων στα υποστυλώματα. Σε περιπτώσεις ελλιπούς όπλισης οι ρωγμές συνοδεύονται από τη διατμητική αστοχία των γειτονικών της πλήρωσης υποστυλωμάτων.



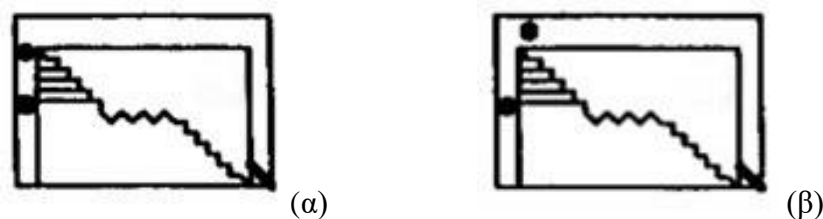
Σχήμα 2-29 (α) Πολλαπλές ρωγμές ολίσθησης με σχηματισμό πλαστικών αρθρώσεων στα υποστυλώματα (β) Πολλαπλές ρωγμές ολίσθησης με σχηματισμό διατμητικών ρωγμών στα υποστυλώματα (Mehrabi et al., 1996)

- **Διαγώνια Ρηγμάτωση**

Αφορά μορφή αστοχίας η οποία εντοπίζεται όταν ασκείται οριζόντια φόρτιση στην τοιχοπλήρωση. Παρατηρείται η ανάπτυξη διαγώνιας ρωγμής στο επίπεδο της πλήρωσης, η οποία ξεκινάει από το σημείο άσκησης φορτίου και καταλήγει στην απέναντι γωνία (Σκυριανού, 2019). Η διαγώνια ρωγμή συνοδεύεται από την ανάπτυξη θλιπτικών τάσεων και παραμορφώσεων ενώ στην άλλη διεύθυνση της διαγωνίου παρατηρείται η ανάπτυξη εφελκυστικών τάσεων και παραμορφώσεων οι οποίες όταν υπερβούν την παραμόρφωση ρηγμάτωσης της τοιχοπλήρωσης εμφανίζονται πρόσθετες ρωγμές παράλληλες στον διαγώνιο θλιπτήρα (Mehrabi et al., 1996). Στις περιπτώσεις όπου έχει χρησιμοποιηθεί κονίαμα χαμηλής αντοχής, οι διαγώνιες ρωγμές συνοδεύονται από οριζόντια ολίσθηση μεταξύ των αρμών. Το γεγονός αυτό οδηγεί στο σχηματισμό πλαστικών αρθρώσεων και διατμητικών ρωγμών στα υποστυλώματα (Mehrabi et al., 1996).

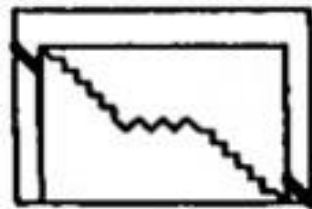


Σχήμα 2-30 (α) Διαγώνιες ρωγμές με σύνθλιψη στις γωνίες και σχηματισμό πλαστικών αρθρώσεων στα υποστυλώματα (β) και στη δοκό (Mehrabi et al., 1996)



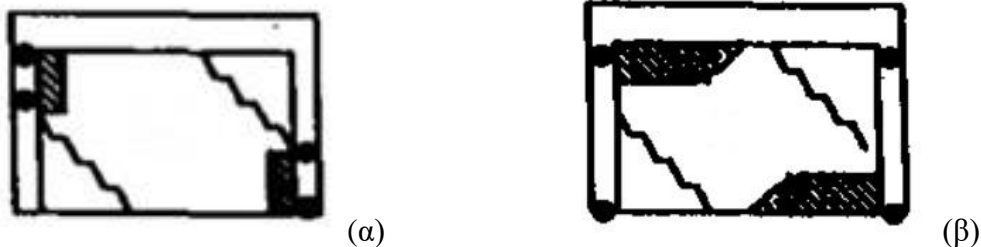
Σχήμα 2-31 (α) Διαγώνιες ρωγμές με σύνθλιψη στις γωνίες φόρτισης, σχηματισμό πλαστικών αρθρώσεων στα υποστυλώματα (β) και στη δοκό, και διατμητική ψαθυρή αστοχία υποστυλώματος (Mehrabi et al., 1996)

Επιπλέον η συγκεκριμένη μορφή αστοχίας δύναται να εντοπιστεί χωρίς το σχηματισμό πλαστικών αρθρώσεων. Για τη συγκεκριμένη περίπτωση εντοπίζονται διατμητικές ρωγμές στο άνω άκρο του υποστυλώματος φόρτισης και στο κάτω άκρο του απέναντι υποστυλώματος (Mehrabian et al., 1996). Το αποτέλεσμα της συγκεκριμένης περίπτωσης οδηγεί σε διατμητική ψαθυρή αστοχία.



Σχήμα 2-32 Διαγώνιες ρωγμές με ψαθυρή διατμητική αστοχία στα υποστυλώματα (Mehrabian et al., 1996)

Ένας ακόμη μηχανισμός διαγώνιας ρηγμάτωσης αφορά την ανάπτυξη παράλληλων διαγώνιων ρωγμών. Ο συγκεκριμένος μηχανισμός συνοδεύεται από αστοχία του τοίχου στα άκρα της θλιβόμενης διαγωνίου ενώ εντοπίζονται και υποπεριπτώσεις όπου υπήρξε σύνθλιψη στο επίπεδο της τοιχοπλήρωσης (Mehrabian et al., 1996).



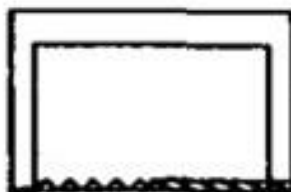
Σχήμα 2-33 (α) Διαγώνιες ρωγμές με σύνθλιψη της τοιχοποιίας στις γωνίες και σχηματισμό πλαστικών αρθρώσεων στις θέσεις σύνθλιψης (β) Διαγώνιες ρωγμές με εκτενή σύνθλιψη στο επίπεδο της τοιχοπλήρωσης (Mehrabian et al., 1996)

Ο μηχανισμός που περιεγράφηκε παραπάνω ονομάζεται διαγώνιος θλιπτήρας και θεωρείται ο τυπικός μηχανισμός λειτουργίας και αστοχίας των εμφανιζόμενων τοιχοπληρώσεων σε πλαίσια οπλισμένου σκυροδέματος (Σκυριανού, 2019).

- **Καμπτική Αστοχία**

Η καμπτική αστοχία αφορά ενιαία παραμόρφωση του πλαισίου ΟΣ και της τοιχοπλήρωσης, τα οποία λειτουργούν ως ενιαίο σύστημα έως ότου επέλθει η αστοχία. Η συγκεκριμένη μορφή αστοχίας είναι ιδιαίτερα σπάνια και δεν συνοδεύεται από την

αποκόλληση της τοιχοπλήρωσης από το πλαίσιο (Mehrabi et al, 1996). Συναντάται κυρίως σε εμφαντούμενες τοιχοπληρώσεις οι οποίες γειτνιάζουν με υποστυλώματα ελλιπούς οπλισμού.

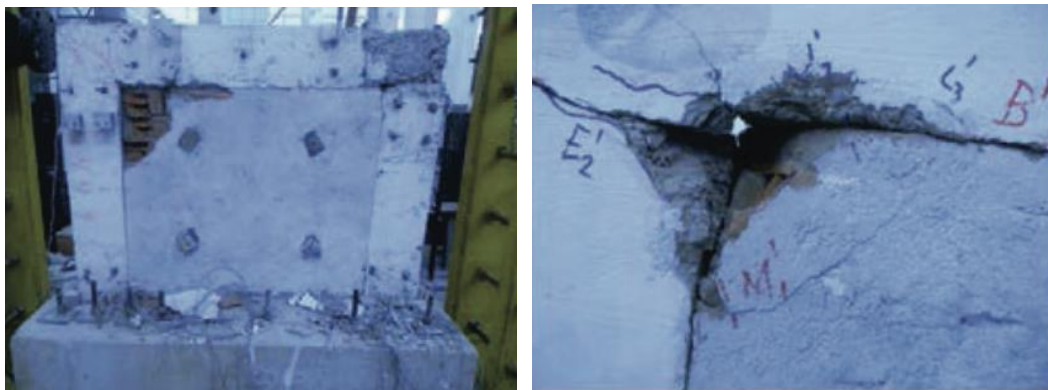


Σχήμα 2-34 Καμπτική παραμόρφωση και αστοχία τοιχοπλήρωσης (Mehrabi et al., 1996)

Ανατρέχοντας στη διεθνή βιβλιογραφία εντοπίζεται πληθώρα πειραματικών δοκιμών οι οποίες αφορούν την εντός επιπέδου καταπόνηση εμφαντούμενων τοιχοπληρώσεων σε πλαίσια οπλισμένου σκυροδέματος. Οι πειραματικές διαδικασίες αποσκοπούν στη δομική ενίσχυση των εν λόγω συστημάτων ωστόσο εντοπίζουν και αξιολογούν την αστοχία των μη ενισχυμένων πληρώσεων. Γενικότερα οι βασικότερες μορφές αστοχίας που εντοπίστηκαν αφορούν στην αποκόλληση της πλήρωσης από το πλαίσιο οπλισμένου σκυροδέματος όπως και τη διαγώνια ρηγμάτωσή της. Δεδομένου ότι η παρουσία της πλήρωσης καθορίζει τη λειτουργία του φορέα οπλισμένου σκυροδέματος, βλάβες εντοπίστηκαν και στα μέλη ΟΣ, κυρίως στα υποστυλώματα. Οι πιο συνήθεις μορφές αστοχίας στα δομικά στοιχεία ΟΣ αφορούσαν τη διατμητική αστοχία των υποστυλωμάτων. Βάση της παρατήρησης των βλαβών για τα ενισχυμένα και μη δοκίμια αξιολογήθηκε η αποτελεσματικότητα του σχήματος αναβάθμισης. Πιο συγκεκριμένα, παρακάτω αναλύονται κάποιες από τις πειραματικές έρευνες για την εντός επιπέδου καταπόνηση μη ενισχυμένων εμφαντούμενων τοιχοπληρώσεων σε πλαίσια οπλισμένου σκυροδέματος.

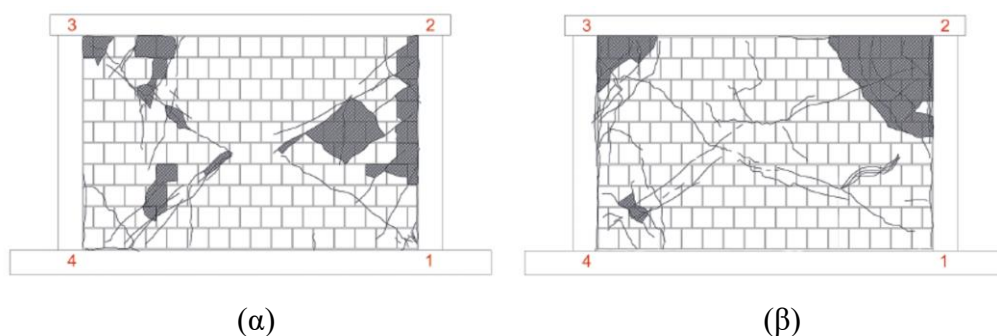
Οι Selim et al. (2015) εκπόνησαν πειραματική διαδικασία εντός επιπέδου καταπόνησης συστήματος μονώροφου πλαισίου οπλισμένου σκυροδέματος παρουσία τοιχοπλήρωσης. Το δοκίμιο ελέγχου ήταν κλίμακας 1/3. Χρησιμοποιήθηκε υδραυλικό σύστημα επιβολής φορτίων πλευρικά τοποθετημένο. Επίσης στην άνω παρειά των υποστυλωμάτων ασκήθηκαν κατακόρυφα αξονικά φορτία. Συνολικά πραγματοποιήθηκαν 11 κύκλοι μετατόπισης και οι πρώτες ρωγμές εμφανίστηκαν πρόωρα στη διεπιφάνεια της πλήρωσης με το υποστυλώμα. Στους επόμενους κύκλους παρατηρήθηκε ευρεία διασπορά των ρωγμών στα ακραία σημεία επαφής πλαισίου πλήρωσης. Περισσότερες ρωγμές εντοπίστηκαν στην άνω παρειά του συστήματος παρά στην κάτω. Συμπερασματικά για πλευρική μέγιστη δύναμη ίση με 43.4 kN παρατηρήθηκε ρωγμή ίση με 10 mm στο κόμβο σύνδεσης δοκού-υποστυλώματος. Η αστοχία του δοκιμίου ελέγχου θεωρήθηκε ψαθυρή και

δεν επέτρεψε την επιβολή πρόσθετων κύκλων φόρτισης λόγω της πρόωρης αστοχίας. Το μοτίβο των ρωγμών παρατίθεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 2-35 Μορφή αστοχίας σε μη ενισχυμένο πλαίσιο ΟΣ παρουσία πλήρωσης (Selim et al., 2015)

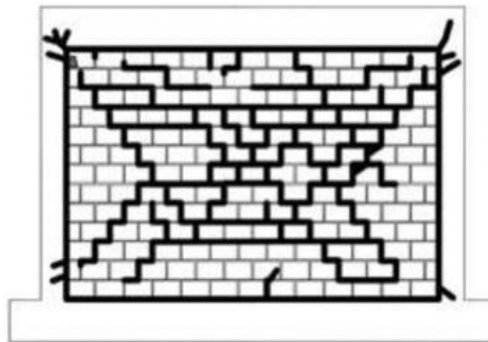
Οι da Porto et al. (2015) εκπόνησαν πειραματική διαδικασία καταπόνησης εμφαντούμενης τοιχοποιίας σε πλαίσιο ΟΣ υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση έως ότου επήλθε η αστοχία. Όσον αφορά τα μη ενισχυμένα δοκίμια βλάβες μεγάλης έκτασης παρατηρήθηκαν συμπεριλαμβανομένης της θραύσης της τοιχοπλήρωσης στις γωνίες επαφής με το πλαίσιο οπλισμένου σκυροδέματος. Επιπλέον παρατηρήθηκε καθυστέρηση της αστοχίας για τα δοκίμια στα οποία έγινε χρήση κονιάματος υψηλότερης αντοχής. Ενδεικτικά αξίζει να αναφερθεί ότι για το κονίαμα μειωμένης ισχύος παρατηρήθηκε ακόμη και εγκάρσια ολίσθηση στους αρμούς. Η απόκριση των μη ενισχυμένων δοκιμίων χαρακτηρίστηκε από ψαθυρή αστοχία και περιορισμένη ικανότητα παραμόρφωσης των δομικών στοιχείων.



Σχήμα 2-36 Μοτίβο ρωγμών (α) κονίαμα χαμηλής αντοχής (β) κονίαμα υψηλής αντοχής (da Porto et al., 2015)

Οι Akhoundi et al. (2017) διενέργησαν πιο πρόσφατα πειραματική διαδικασία δοκιμίων ΟΣ με εμφαντούμενη τοιχοποιία τα οποία ήταν κατασκευασμένα με τα κατασκευαστικά πρότυπα του 1960. Τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε εντός επιπέδου καταπόνηση μέσω δύο κατακόρυφων γρύλων οι οποίοι τοποθετήθηκαν στη κορυφή των

υποστυλωμάτων. Οι γρύλοι εφάρμοζαν φορτίο ίσο με το 40% της ικανότητας του υποστυλώματος. Οι συνθήκες κυκλικής φόρτισης δημιουργήθηκαν μέσω υδραυλικού ενεργοποιητή ο οποίος ασκούσε δυνάμεις έλξης και ώθησης στο σύστημα. Όσον αφορά την απόκριση των μη ενισχυμένων δοκιμίων παρατηρήθηκε πρόωρος διαχωρισμός του πλαισίου ΟΣ από τη πλήρωση. Ο διαχωρισμός αυτός οφείλεται στην πλευρική δράση. Εξαιτίας της αποκόλλησης παρατηρήθηκε λειτουργία της πλήρωσης ως διαγώνιος θλιπτήρας με επακόλουθο τον σχηματισμό διαγώνιων ρωγμών στο επίπεδο της. Επιπλέον, παρατηρήθηκε θραύση των αρμών οι οποίοι ήταν τοποθετημένοι στην άνω παρειά της τοιχοπλήρωσης. Τέλος, το δοκίμιο ελέγχου αστόχησε αφού όλες οι διεπιφάνειες μεταξύ των οπτόπλινθων ρηγματώθηκαν όπως και οι αρμοί στα σημεία επαφής του πλαισίου οπλισμένου σκυροδέματος με το επίπεδο της πλήρωσης.



Σχήμα 2-37 Μοτίβο ρωγμών για δοκίμιο ελέγχου (Akhoundi et al., 2017)

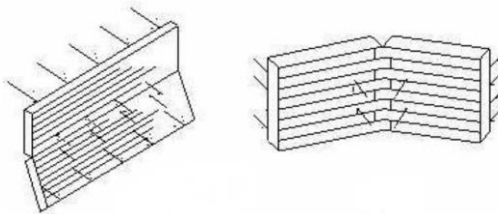
2.3.2.2 Εκτός Επιπέδου Καταπόνηση

Η αστοχία των πληρώσεων δύναται να επέλθει εξαιτίας και της εκτός επιπέδου καταπόνησης. Με τον όρο εκτός επιπέδου καταπόνηση περιγράφονται φορτία τα οποία εφαρμόζονται κάθετα στο επίπεδο της πλήρωσης. Δεδομένου ότι μέσω της εκτός επιπέδου καταπόνησης των εμφανιζόμενων τοιχοπληρώσεων σε πλαίσια οπλισμένου σκυροδέματος δύναται να επέλθει κατάρρευση, στη διεθνή βιβλιογραφία εντοπίζεται πληθώρα εργασιών οι οποίες μελετούν την εκτός επιπέδου απόκριση των συστημάτων.

Όπως επισημαίνεται από τους Vicente et al. (2012) οι σεισμικές διεγέρσεις μεγάλης έντασης δύναται να οδηγήσουν στην εκτός επιπέδου κατάρρευση των εμφανιζόμενων τοιχοπληρώσεων οδηγώντας στην ολική κατάρρευση της κατασκευής. Με τις τοιχοπληρώσεις να αποτελούν την πρόσοψη των κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος οι Vicente et al. (2012) σχολίασαν ότι η αποκόλληση και η εκτός επιπέδου μετακίνηση των πλίνθων οι οποίοι απαρτίζουν την πλήρωση είναι ιδιαίτερα συνήθης, ωστόσο εξαρτάται από τις συνθήκες σύνδεσης των πληρώσεων με τα περιμετρικά στοιχεία οπλισμένου σκυροδέματος. Επιπλέον οι διαστάσεις των πληρώσεων αποτελούν σημαντικό παράγοντα για

την εκτός επιπέδου απόκρισή τους. Για παράδειγμα οι πληρώσεις μικρού πάχους χαρακτηρίζονται από πρόωρη αποκόλληση από το πλαίσιο οπλισμένου σκυροδέματος όταν καταπονούνται από εκτός επιπέδου δυνάμεις. Επιπρόσθετα, η αντίσταση της πλήρωσης σε εκτός επιπέδου παραμορφώσεις εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τον λόγο του ύψους προς το πάχος, δηλαδή από τη λυγηρότητα της πλήρωσης. Όσο μεγαλύτερη είναι η λυγηρότητα της πλήρωσης τόσο δυσκολότερο είναι για τους πλίνθους να αντισταθούν στις αναπτυσσόμενες εκτός επιπέδου μετακινήσεις. Τέλος, η κακή ποιότητα κατασκευής της πλειονότητας των παλαιότερων κατασκευών χαρακτηρίζεται από την ανεπαρκή αρμολόγηση των οπτόπλινθων. Το συγκεκριμένο χαρακτηριστικό ευνοεί την εμφάνιση εκτός επιπέδου αστοχίας στο επίπεδο της πλήρωσης.

Η συνηθέστερη μορφή αστοχίας για την εκτός επιπέδου καταπόνηση των πληρώσεων είναι η εκτός επιπέδου κάμψη και αφορά την αποκόλληση των αρμών. Όπως επισημαίνουν οι Petrus et al. (2015) ο συγκεκριμένος τρόπος αστοχίας δύναται να είναι είτε παράλληλα στους οριζόντιους αρμούς είτε κάθετα σε αυτούς όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.

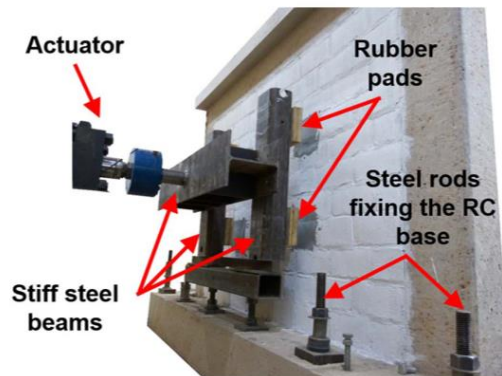


Σχήμα 2-38 Μορφές καμπτικής εκτός επιπέδου αστοχίας πλήρωσης

(Petrus et al., 2015)

Παρακάτω παρουσιάζονται συνοπτικά ενδεικτικές πειραματικές δοκιμές εκτός επιπέδου καταπόνησης μη ενισχυμένων εμφανιζόμενων τοιχοπληρώσεων σε πλαίσια οπλισμένου σκυροδέματος.

Οι Koutas et al. (2019) εκπόνησαν πειραματική δοκιμή εκτός επιπέδου καταπόνησης μονώροφου πλαισίου οπλισμένου σκυροδέματος παρουσία τοιχοπλήρωσης. Για την εφαρμογή του φορτίου χρησιμοποιήθηκε υδραυλικό έμβολο το οποίο ασκούσε φορτίο μετακίνησης κάθετα στο επίπεδο της πλήρωσης. Η κατανομή του φορτίου διανεμήθηκε σε 4 σημεία του επιπέδου της πλήρωσης με στόχο την όσο το δυνατόν πιο ομοιόμορφη κατανομή των φορτίσεων στα δοκίμια.



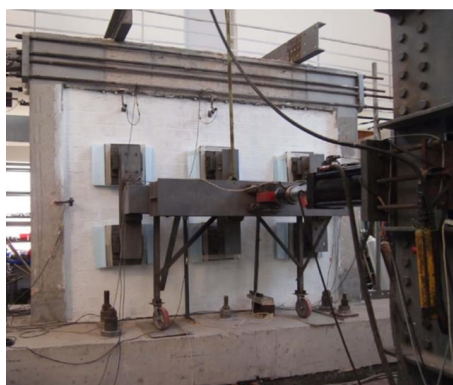
Σχήμα 2-39 Πειραματική διάταξη εκτός επιπέδου καταπόνησης (Koutas et al., 2018)

Οι πρώτες ρωγμές στο δοκίμιο ελέγχου εμφανίστηκαν σε πρώιμο στάδιο συγκριτικά με τα ενισχυμένα δοκίμια. Εμφανίστηκαν στην κεντρική παρειά της πλήρωσης στην πίσω όψη της και διαδόθηκαν προς τις 4 γωνίες του φανώματος. Στην μπροστινή όψη της πλήρωσης όπου τοποθετήθηκε και το υδραυλικό έμβολο, το επίπεδο της πλήρωσης αποκολλήθηκε από το γειτνιάζων πλαίσιο οπλισμένου σκυροδέματος.



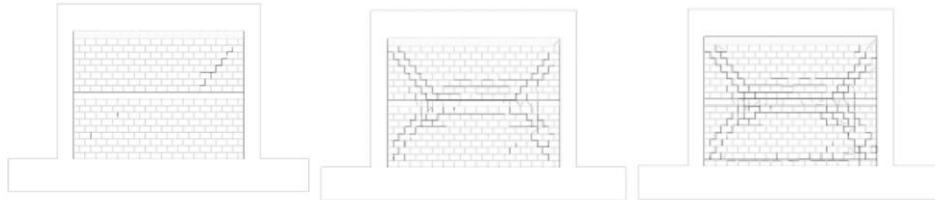
Σχήμα 2-40 Κατανομή ρωγμών στο επίπεδο της πλήρωσης (Koutas et al., 2018)

Αντίστοιχη πειραματική διάταξη ακολουθήθηκε και από τους Palieraki et al., (2018) οι οποίοι εκπόνησαν αντίστοιχη δοκιμή εκτός επιπέδου καταπόνησης σε πλαίσιο οπλισμένου σκυροδέματος παρουσία πλήρωσης.



Σχήμα 2-41 Πειραματική διάταξη εκτός επιπέδου καταπόνησης (Palieraki et al., 2018)

Για επιβαλλόμενη μετακίνηση ίση με μόλις 5mm εμφανίστηκε η πρώτη ρωγή με διεύθυνση παράλληλη στο άνοιγμα του πλαισίου ΟΣ. Όσο οι επιβαλλόμενες μετακινήσεις αυξάνονταν παρατηρήθηκε διασπορά των ρωγμών διαγώνια προς τις τέσσερις γωνίες επαφής. Επιπλέον, οι Palieraki et al. (2018) τόνισαν ότι οι αναπτυσσόμενες ρωγμές στην άνω και κάτω παρειά της τοιχοπλήρωσης δεν είναι ίδιες.



Σχήμα 2-42 Αναπτυσσόμενες ρωγμές στο επίπεδο της πλήρωσης για επιβαλλόμενες μετακινήσεις 5, 30 και 60 mm.

(Palieraki et al., 2018)

2.3.2.2 Συνδυασμός Καταπονήσεων

Μπορεί παραπάνω να περιεγράφηκαν πειραματικές διαδικασίες κατά τις οποίες εμφανιζόμενες τοιχοπληρώσεις σε πλαίσια οπλισμένου σκυροδέματος καταπονούνται είτε σε εκτός είτε σε εντός επιπέδου φορτίσεις, ωστόσο ο συνδυασμός των εν λόγω φαινομένων είναι συχνός στις κατασκευές και αντιπροσωπεύει επαρκέστερα τη λειτουργία και την επιρροή της σεισμικής δράσης. Ο συνδυασμός των φορτίσεων θέτει σε κίνδυνο την ακεραιότητα της κατασκευής και εξαρτάται από την διεύθυνση της σεισμικής δράσης.

Όπως επισήμαναν οι Vicente et al. (2012) οι τοιχοπληρώσεις δύναται να καταπονηθούν από συνδυασμό δράσεων με αποτέλεσμα να απειλείται πρόσθετα η ασφάλεια της κατασκευής. Πρακτικά υπογραμμίζεται ότι οι δυνάμεις αλληλοεπιδρούν καταπονώντας πρόσθετα τη κατασκευή μας. Τέλος τα δομικά προβλήματα των κατασκευών όπως η ελλειπής όπλιση και οι ανεπαρκείς αντισεισμικοί κανονισμοί εντείνονται αφού ο συνδυασμός των φορτίσεων ευνοεί την εκτός επιπέδου κατάρρευση των πληρώσεων και τις εντός επιπέδου βλάβες.

Λόγω της επικινδυνότητας του ενδεχομένου συνδυασμού των δράσεων για την ακεραιότητα της κατασκευής στη διεθνή βιβλιογραφία εντοπίζονται προσπάθειες ταυτόχρονης επιβολής εντός και εκτός επιπέδου φορτίσεων. Συνηθέστερα, τα μη ενισχυμένα δοκίμια ελέγχου καταπονούνται με εντός επιπέδου δυνάμεις μέχρι ένα εύρος μετακινήσεων και έπεται η καταπόνηση του ίδιου δοκιμίου με φορτία εκτός του επιπέδου της πλήρωσης. Η παραπάνω αλληλουχία δύναται να πραγματοποιηθεί αντίστροφα ωστόσο επειδή η εκτός

επιπέδου φθορά της πλήρωσης είναι μεγαλύτερη, η εντός επιπέδου φόρτιση προηγείται. Μέσω των συγκεκριμένων δοκιμών αποτυπώνεται η απόκριση του συστήματος έναντι διαφορετικών καταπονήσεων.

Πειραματική διαδικασία συνδυασμού των καταπονήσεων εκπονήθηκε από τους Palieraki et al. (2018). Επρόκειτο για προσπάθεια αξιολόγησης της επίδρασης διαδοχικών φορτίσεων στην απόκριση της πλήρωσης. Το πείραμα εκπονήθηκε σε δοκίμια εμφανιζόμενων τοιχοπληρώσεων σε πλαίσια ΟΣ. Στο συγκεκριμένο πείραμα η εκτός επιπέδου καταπόνηση προηγήθηκε των εντός επιπέδου επιβαλλόμενων φορτίσεων. Ενδεικτικά οι Palieraki et al. (2018) επισήμαναν ότι η απόκριση εντός του επιπέδου της πλήρωσης η οποία πρώτα υποβλήθηκε σε εκτός επιπέδου φόρτιση ήταν 20% χαμηλότερη από πλήρωση η οποία δοκιμάστηκε μόνο σε δυνάμεις εντός του επιπέδου. Επιπλέον επισημάνθηκε ότι η δυσκαμψία της πλήρωσης στην οποία επιβλήθηκαν και τα δύο είδη καταπόνησης ήταν αρκετά χαμηλότερη συγκριτικά με την καταπονούμενη μόνο στο επίπεδο πλήρωση. Σχολιάστηκε ότι όταν η εκτός επιπέδου φόρτιση προηγείται της εντός επιπέδου, δεν φάνηκε να επηρεάζεται η εντός επιπέδου απόκριση των πληρώσεων, αφού δεν εντοπίστηκε σύνθλιψη της τοιχοπλήρωσης στα 4 σημεία επαφής.



Σχήμα 2-43 Αποτελέσματα συνδυασμού καταπονήσεων σε τοιχοπλήρωση (Palieraki et al., 2018)

Πειραματική διαδικασία για συνδυαστική καταπόνηση τοιχοπλήρωσης εμφανιζόμενης σε πλαίσιο οπλισμένου σκυροδέματος εκπονήθηκε και από τους da Porto et al. (2015). Πραγματοποιήθηκαν συνδυαστικές δοκιμές εντός και εκτός επιπέδου σε ένα μη ενισχυμένο και επτά ενισχυμένα δοκίμια πλήρους κλίμακας. Στόχος της πειραματικής διαδικασίας ήταν η μελέτη της απόκρισης της τοιχοπλήρωσης και η εκτίμηση της εναπομένουσας αντοχής του συστήματος όταν αυτό υπόκειται σε εναλλασσόμενες εντός και εκτός επιπέδου δυνάμεις. Η καταπόνηση των δοκιμίων χωρίστηκε σε δύο ξεχωριστές φάσεις. Η εντός επιπέδου καταπόνηση προηγήθηκε της εκτός επιπέδου επιβολής φορτίσεων και οι

δοκιμές ολοκληρώθηκαν όταν επήλθε η εκτός επιπέδου κατάρρευση της πλήρωσης. Οι da Porto et al. (2015) επισήμαναν ότι το πλαίσιο οπλισμένου σκυροδέματος περιόριζε την εκτός επιπέδου αστοχία των πληρώσεων. Όλα τα δοκίμια είχαν υποβληθεί στο ίδιο εύρος επιβαλλόμενων μετατοπίσεων εντός του επιπέδου τους με αποτέλεσμα να έχουν ήδη υποστεί φθορές όταν ξεκίνησε η εκτός επιπέδου καταπόνηση. Υπογραμμίστηκε ότι το επίπεδο των ήδη υπαρχουσών βλαβών ήταν και αυτό που καθόρισε την εκτός του επιπέδου αντοχή των πληρώσεων. Το μη ενισχυμένο δοκίμιο είχε υποστεί σοβαρές ζημιές εξαιτίας της εντός επιπέδου καταπόνηση και παρουσίασε τη χαμηλότερη δυσκαμψία.



Σχήμα 2-44 Αποτέλεσμα συνδυαστικής καταπόνησης σε τοιχοπλήρωση (da Porto et al., 2015)

2.3.3 Υφιστάμενες Τεχνικές Ενίσχυσης Εμφατούμενων Τοιχοπληρώσεων

Μέσω των παραπάνω έγινε αντιληπτή η σεισμική τρωτότητα των τοιχοπληρώσεων. Η επιδιωκόμενη καλή δομική απόκριση των κατασκευών δεν έγκειται στη ενίσχυση μόνο των μελών οπλισμένου σκυροδέματος αφού η δομική αδυναμία των εμφατούμενων τοιχοπληρώσεων δύναται να συμπαρασύρει ολόκληρη τη κατασκευή στη κατάρρευση. Επιπλέον, όπως επισημάνθηκε παραπάνω, η εκτός επιπέδου αστοχία των τοιχοπληρώσεων θεωρείται ιδιαίτερα επικίνδυνη για την ασφάλεια των χρηστών αφού οδηγεί απότομα στη κατάρρευση.

Για αυτόν τον λόγο κρίνεται απαραίτητη η συνεισφορά των τοιχοπληρώσεων στην απόκριση του κτιριακού συνόλου. Στο σημείο αυτό αναλύονται τεχνικές ενίσχυσης των τοιχοπληρώσεων εμφατούμενων σε πλαίσια οπλισμένου σκυροδέματος. Στόχος των τεχνικών αναβάθμισης είναι η μετατροπή των τοιχοπληρώσεων σε αξιόπιστα στοιχεία παραλαβής φορτίων, η ελαχιστοποίηση των πιθανοτήτων δημιουργίας μηχανισμού "μαλακού ορόφου" και η μείωση του κινδύνου κατάρρευσης (Κούτας, 2015).

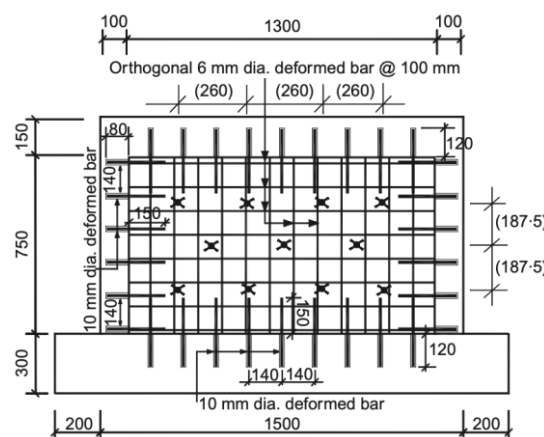
2.3.3.1 Συμβατικές Τεχνικές Ενίσχυσης

Όπως επισήμαναν οι Vicente et al. (2012) η αντιμετώπιση της δομικής τρωτότητας των τοιχοπληρώσεων αφορά τη μείωση της ευπάθειάς τους μέσω της αντιμετώπισης των

γεωμετρικών τους περιορισμών και της κακής ποιότητας μελέτης και σχεδιασμού στην πλειονότητα των παλαιότερων κατασκευών. Η ελλιπής όπλιση και η απουσία χειρισμού των πληρώσεων ως κομμάτι του φέροντα οργανισμού της κατασκευής ευνοεί τους υπάρχοντες ψαθυρούς μηχανισμούς αστοχίας και την πρόωρη εμφάνιση ρωγμών για χαμηλά επίπεδα φόρτισης. Οι λύσεις οι οποίες προτείνονται μέχρι σήμερα αφορούν την τοποθέτηση βλήτρων και άλλων λοιπών χαλύβδινων συνδέσμων. Επιπλέον ευρέως χρησιμοποιούμενοι είναι πρόσθετοι χαλύβδινοι οπλισμοί και η τοποθέτηση κονιαμάτων υψηλής απόδοσης.

Ο Κούτας (2015) επιβεβαίωσε τους παραπάνω ισχυρισμούς και επισήμανε ότι η πλειονότητα των εφαρμοσμένων λοιπών τεχνικών αναβάθμισης πληρώσεων αφορούν τη χρήση κονιαμάτων με βάση το τσιμέντο, για τη βέλτιστη απόδοση, και τη πρόσθετη χρήση χαλύβδινων βλήτρων τα οποία βελτιώναν τις συνθήκες σύνδεσης μεταξύ του φατνώματος της πλήρωσης και των γειτνιαζόντων στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος. Η τοποθέτηση των βλήτρων πραγματοποιείται στην άνω και κάτω παρειά μεταξύ της πλήρωσης και των δοκών οπλισμένου σκυροδέματος. Οι μέθοδοι ενίσχυσης συνοψίζονται στην τοποθέτηση πλέγματος χαλύβδινου οπλισμού, συγγενική μέθοδος των μανδύων ΟΣ, προσθήκη κονιάματος χαμηλής ή υψηλής απόδοσης και χρήση βλήτρων για τη βελτιστοποίηση της σύνδεσης.

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται ενίσχυση η οποία πραγματοποιήθηκε από τους Altin et al. (2010) σε εμφαντούμενη τοιχοπλήρωση σε πλαίσιο οπλισμένου σκυροδέματος. Όπως φαίνεται στο σχήμα, έχει γίνει χρήση χαλύβδινου πλέγματος και χαλύβδινων συνδέσεων τόσο με τη τοιχοπλήρωση όσο και με τα περιμετρικά μέλη ΟΣ. Τέλος, επι του χαλύβδινου πλέγματος επιστρώθηκε κονίαμα.

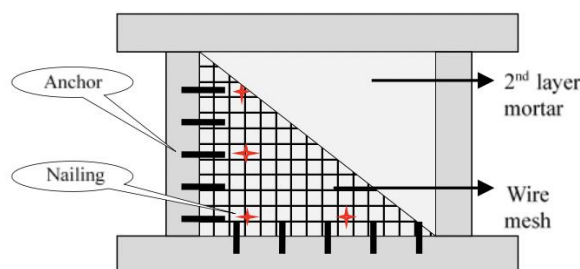


Σχήμα 2-45 Δοκίμιο ενισχυμένο με χαλύβδινο πλέγμα (Altin et al., 2010)

Η προσθήκη κονιάματος υψηλής αντοχής, ινοοπλισμένο ή μη, επισημάνθηκε ότι έχει την ικανότητα να αυξήσει τη πλευρική δυσκαμψία της εμφαντούμενης πλήρωσης. Η

τοποθέτηση κονιάματος σε συνδυασμός με χαλύβδινο πλέγμα κρίθηκε αποτελεσματική ωστόσο η εφαρμογή της δύναται να οδηγήσει σε φθορά της πλήρωσης στα σημεία επαφής με τα δομικά στοιχεία ΟΣ.

Η χρήση βλήτρων συμβάλλει στην παραλαβή της τέμνουσας δύναμης από τα οριζόντια δομικά στοιχεία αντί των υποστλωμάτων. Απαραίτητη προϋπόθεση για την καλή λειτουργία των βλήτρων είναι η ενεργοποίηση των υποστλωμάτων. Ανατρέχοντας στη βιβλιογραφία εντοπίζονται αναφορές για μη αποδοτική λειτουργία των συνδέσμων, γεγονός το οποίο οφειλόταν στο χαμηλής απόδοσης κονίαμα και στο μικρό πάχος της στρώσης. Φυσικά, με τη χρήση κονιάματος με βάση το τσιμέντο και παρουσία ιών, αλλά και με την αύξηση του πάχους της στρώσης τα παραπάνω προβλήματα αντιμετωπίζονται. Η σύνοψη της παραπάνω τεχνικής ενίσχυσης φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Αφορά ενίσχυση εμφανιζόμενης τοιχοπλήρωσης σε πλαίσιο ΟΣ και κάνει χρήση χαλύβδινου πλέγματος, χαλύβδινων βλήτρων και κονιάματος χαμηλής ή υψηλής αντοχής.



Σχήμα 2-46 Τεχνική ενίσχυσης εμφανιζόμενης τοιχοπλήρωσης (Alwashali et al., 2020)

Όπως επισήμανε ο Κούτας (2015) στη βιβλιογραφία εντοπίζεται και το ενδεχόμενο μη χρήσης βλήτρων. Η μη χρήση βλήτρων επιτυγχάνεται με τη διάνοιξη οπών στα περιμετρικά της τοιχοπλήρωσης μέλη οπλισμένου σκυροδέματος και με απευθείας αγκύρωση του χαλύβδινου πλέγματος. Μέσω της παραπάνω τεχνικής η αποτελεσματικότητα της ενίσχυσης αυξάνεται σημαντικά, ωστόσο η συγκεκριμένη επέμβαση είναι εκτενής και ενδέχεται να απαιτήσει τη διακοπή της λειτουργίας της κατασκευής.

Ενδεικτικά η σημασία σύνδεσης του χαλύβδινου πλέγματος με τα περιμετρικά μέλη ΟΣ τονίζεται μέσω πειράματος το οποίο εκπονήθηκε από τους Kyriakides et al. (2014). Εμφανιζόμενη τοιχοπλήρωση σε πλαίσιο οπλισμένου σκυροδέματος ενισχύθηκε με πλέγμα χαλύβδινου οπλισμού σε συνδυασμό με κονίαμα υψηλής αντοχής με πλαστικές ίνες. Η δοκιμή ενίσχυσης ελέγχθηκε με περιμετρική σύνδεση της πλήρωσης με τα μέλη ΟΣ και χωρίς. Χωρίς τη χρήση βλήτρων επισημάνθηκε αύξηση της τάξης του 20% σε όρους πλευρικής αντοχής και δυσκαμψίας, ωστόσο η προσθήκη βλήτρων ενίσχυσε πρόσθετα τη

τεχνική ενίσχυσης με αύξηση της αντοχής κατά 90%. Επιπλέον, χάριν της παρουσίας βλήτρων αποφεύχθηκε η διατμητική αστοχία των υποστρωμάτων ενώ η αστοχία επήλθε σε μετέπειτα στάδια λόγω της ανάπτυξης έντονων εφελκυστικών δυνάμεων, με επακόλουθη εκτίναξη των συνδέσμων.



Σχήμα 2-47 Ενισχυμένη τοιχοπλήρωση με χαλύβδινο πλέγμα (Koutromanos et al., 2011)

Γενικότερα οι λοιπές τεχνικές αναβάθμισης οι οποίες χαρακτηρίζονται από τα παραπάνω χαρακτηριστικά, κρίθηκαν ως αποτελεσματικές, αφού βελτίωσαν τη δυσκαμψία και τη πλευρική αντοχή της εμφανιζόμενης πλήρωσης. Η χρήση βλήτρων βελτιστοποιεί την απόδοση του δομικού σχήματος. Ανατρέχοντας στη βιβλιογραφία εντοπίζονται πολλές διαφορετικές μορφές αστοχίας και όπως επισήμανε ο Κούτας (2015) εξαρτώνται από το πάχος της ενίσχυσης, τους οπλισμούς του πρόσθετου χαλύβδινου πλαισίου, την υπάρχουσα αντοχή και τις υφιστάμενες ατέλειες του πλαισίου οπλισμένου σκυροδέματος και φυσικά τις συνθήκες σύνδεσης του πάνελ πλήρωσης με τα γειτνιάζοντα στοιχεία οπλισμένου σκυροδέματος.

2.3.3.2 Καινοτόμες Τεχνικές Ενίσχυσης Εμφανιζόμενων Τοιχοπληρώσεων

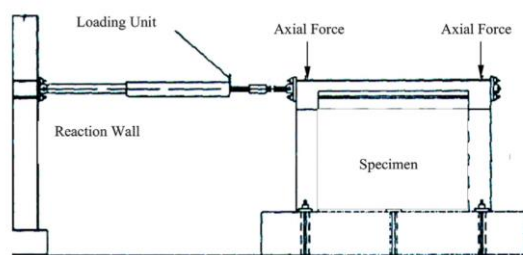
Η απαίτηση δομικής αναβάθμισης του υφιστάμενου κτιριακού αποθέματος ευνοεί την ανάπτυξη καινοτόμων υλικών και λύσεων. Αντίστοιχα με την καινοτομία η οποία παρατηρείται τα τελευταία χρόνια στα υλικά δομικής αναβάθμισης των μελών οπλισμένου σκυροδέματος, παρατηρείται η ανάπτυξη καινοτόμων λύσεων και τεχνικών σχετικά με τη βελτίωση της απόκρισης των εμφανιζόμενων τοιχοπληρώσεων. Παρακάτω αναλύονται καινοτόμες προσεγγίσεις η εφαρμογή των οποίων μειώνει την τρωτότητα των υφιστάμενων τοιχοπληρώσεων. Πρόκειται να γίνει αντιληπτό ότι οι μέθοδοι οι οποίες αναλύονται έχουν προαναφερθεί για τη δομική αναβάθμιση δομικών στοιχείων ΟΣ. Το γεγονός ότι υπάρχουν ενιαία σχήματα δομικής ενίσχυσης τα οποία δύναται να βελτιώσουν την απόκριση τόσο του φέροντα οργανισμού όσο και των τοιχοπληρώσεων οδηγεί σε μια ολιστικότερη προσέγγιση δομικής αναβάθμισης η οποία αφορά το σύνολο της κατασκευής και όχι απλά κάποια από τα στοιχεία της.

- **Ινοπλισμένα Πολυμερή (FRPs)**

Τόσο η συνεισφορά των τοιχοπληρώσεων στην απόκριση του συνόλου της κατασκευής όσο και οι ευνοϊκές ιδιότητες των υφασμάτων ινοπλισμένων πολυμερών έφεραν στο προσκήνιο τη χρήση των υφασμάτων για τη δομική αναβάθμιση εμφατούμενων τοιχοπληρώσεων σε πλαίσια οπλισμένου σκυροδέματος. Ανατρέχοντας στη βιβλιογραφία εντοπίζονται πληθώρα πειραματικών δοκιμών οι οποίες εξετάζουν την αποτελεσματικότητα της μεθόδου.

Η εξωτερικά επιβαλλόμενη εφαρμογή υφασμάτων γνωρίζει ευρεία απήχηση για τη δομική αναβάθμιση τοιχοπληρώσεων. Η επιτυχία της επέμβασης καθορίζεται από την άρτια εφαρμογή του σχήματος. Αναλυτικότερα πριν την εφαρμογή του υφάσματος απαιτείται ο καθαρισμός της τοιχοπλήρωσης και η εξομάλυνση της επιφάνειάς της (Κρεβαϊκάς, 2005). Επιπλέον, απαιτείται η απομάκρυνση υγρασίας που ενδέχεται να υπάρχει στον τοίχο. Κατά αυτόν τον τρόπο δημιουργείται ένα υπόστρωμα κατάλληλο για την τοποθέτηση των υφασμάτων. Η επιπεδότητα του υποστρώματος εξυπηρετεί τη συνάφεια μεταξύ υφάσματος και τοιχοπλήρωσης. Πρακτικά η συνάφεια των μανδύων και του σκυροδέματος εξυπηρετεί την μεταφορά την παραλαβή εφελκυστικών δυνάμεων από τα σύνθετα υλικά αντιμετωπίζοντας την τρωτότητα των δομικών στοιχείων.

Οι Erol et al. (2015) εξέτασαν την αποτελεσματικότητα της δομικής ενίσχυσης εμφατούμενων τοιχοπληρώσεων σε πλαίσια οπλισμένου σκυροδέματος χρησιμοποιώντας υφάσματα ινοπλισμένων πολυμερών αποτελούμενα από ίνες υάλου. Η πειραματική δοκιμή αφορούσε πέντε δοκίμια πλαισίου ενός ορόφου τα οποία καταπονήθηκαν υπό ανακυκλιζόμενη πλευρική φόρτιση στο επίπεδο. Η συμβολή της ενίσχυσης εξετάστηκε σε όρους αύξησης πλευρικής αντοχής και δυσκαμψίας, τεχνικών εφαρμογής και λεπτομερειών σύνδεσης. Από τα πέντε δοκίμια, τα τρία ενισχύθηκαν με ΙΟΠ ενώ δύο αποτέλεσαν τα δοκίμια ελέγχου. Για την ενίσχυση των τριών δοκιμών χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικές τεχνικές εφαρμογής των ΙΟΠ.



Σχήμα 2-48 Πειραματική διάταξη (Erol et al., 2015)

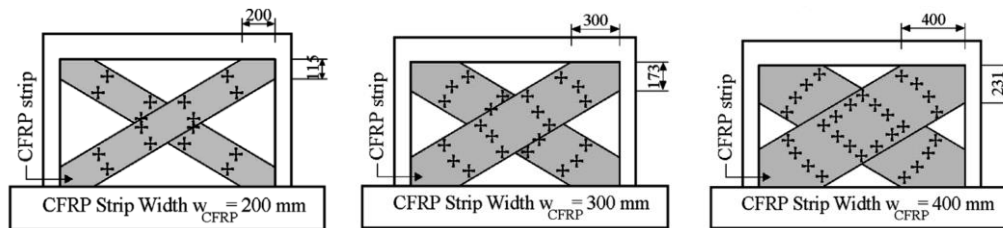
Όσον αφορά τα δοκίμια ελέγχου παρατηρήθηκε βλάβη στα ανώτερα τμήματα της πλήρωσης. Η ικανότητα παραλαβής φορτίων του μη ενισχυμένου δοκιμίου μειώθηκε σημαντικά αφότου εμφανίστηκε βλάβη στην άνω παρειά της πλήρωσης. Για την ενίσχυση των δοκιμίων χρησιμοποιήθηκαν χιαστί διαγώνιες λωρίδες ΙΟΠ οι οποίες τοποθετήθηκαν στο επίπεδο της πλήρωσης και εξετάστηκαν διαφορετικές τεχνικές αγκύρωσης τους με το πλαίσιο ΟΣ. Για όλα τα ενισχυμένα δοκίμια παρατηρήθηκε ικανότητα παραλαβής των πλευρικών φορτίσεων για υψηλότερα επίπεδα μετατόπισης συγκριτικά με τα δοκίμια ελέγχου. Οι Erol et al. (2015) επισήμαναν την αποτελεσματικότητα των λωρίδων ΙΟΠ για την παραλαβή φορτίσεων. Επιπλέον υπογραμμίστηκε ότι παρόλο που παρατηρήθηκε μερική αποκόλληση των υφασμάτων από τη πλήρωση, η ικανότητα παραλαβής φορτίσεων διατηρήθηκε για υψηλά επίπεδα μετατόπισης έως ότου επήλθε η αστοχία. Επιπρόσθετα επισημάνθηκε ότι για να αποφευχθεί η εμφάνιση τοπικών βλαβών στα υφάσματα θα πρέπει να διερευνηθεί ο κατάλληλος αριθμός των αγκυρίων και το επαρκές βάθος της αγκύρωσης έτσι ώστε να δημιουργηθεί μηχανισμός ομοιόμορφης παραλαβής δυνάμεων.

Συμπερασματικά οι Erol et al. (2015) αξιολόγησαν τη δομική ενίσχυση μέσω λωρίδων ΙΟΠ σε εμφαντούμενες τοιχοπληρώσεις. Ενδεικτικά επισήμαναν ότι η μέθοδος ενίσχυσης βελτίωσε την ικανότητα παραλαβής πλευρικών δυνάμεων από τα πλαίσια ΟΣ. Πιο συγκεκριμένα τα ενισχυμένα δοκίμια είχαν 1.8, 1.4 και 1.2 φορές μεγαλύτερη πλευρική αντοχή από το δοκίμιο ελέγχου, αντίστοιχα. Επιπλέον, παρατηρήθηκε και αύξηση της δυσκαμψίας των ενισχυμένων δοκιμίων. Η πρόωρη αστοχία αποτράπηκε χάριν της ενίσχυσης και αποφεύχθηκε η σύνθλιψη στο σημείο σύνδεσης πλαισίου-πλήρωσης. Τέλος, η αγκύρωση των λωρίδων και στις δύο πλευρές της πλήρωσης εμπόδισε την πρόωρη αστοχία και βελτίωσε την απόκριση πλαισίων με ελλειπείς λεπτομέρειες όπλισης.



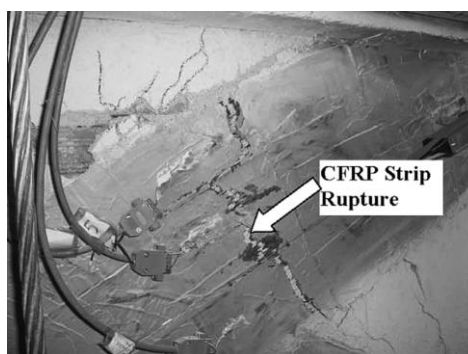
Σχήμα 2-49 Αστοχία ενισχυμένου δοκιμίου (Erol et al., 2015)

Οι Altin et al. (2006) εκπόνησαν πειραματικές δοκιμές σε πλαίσια οπλισμένου σκυροδέματος παρουσία εμφανιζόμενης τοιχοπλήρωσης ενισχυμένα με ινοπλισμένα πολυμερή. Στόχος τους ήταν η αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας της μεθόδου ενίσχυσης. Συνολικά χρησιμοποιήθηκαν 10 δοκίμια, ένα εκ των οποίων παρέμεινε μη ενισχυμένο και αποτέλεσε το δοκίμιο ελέγχου. Η ενίσχυση για τα 9 δοκίμια πραγματοποιήθηκε μέσω της τοποθέτησης διαγώνιων λωρίδων ΙΟΠ επι των τοιχοπληρώσεων. Οι παράμετροι αποτελεσματικότητας οι οποίες εξετάστηκαν αφορούσαν τα διαφορετικά πλάτη λωρίδων ΙΟΠ και την τοποθέτησή τους στην εσωτερική, στην εξωτερική ή και στις δύο πλευρές των τοιχοπληρώσεων.



Σχήμα 2-50 Ενισχυμένα δοκίμια με διαγώνιες λωρίδες ΙΟΠ διαφορετικού πλάτους (Altin et al., 2006)

Οι Altin et al. (2006) επισήμαναν ότι η τοποθέτηση διαγώνιων λωρίδων ΙΟΠ αύξησαν σημαντικά την πλευρική αντοχή και τη δυσκαμψία των δοκιμίων. Πιο συγκεκριμένα το δοκίμιο ελέγχου αστόχησε σε πρώιμο στάδιο φόρτισης, αφού παρατηρήθηκε ρηγμάτωση της τοιχοπλήρωσης στις άνω γωνίες σύνδεσης με το πλαίσιο οπλισμένου σκυροδέματος. Εξαιτίας της ρηγμάτωσης της πλήρωσης το δοκίμιο έχασε την ικανότητα παραλαβής πλευρικών φορτίσεων με αποτέλεσμα να αστοχήσει. Τα 3 δοκίμια τα οποία ενισχύθηκαν και στις δύο πλευρές του τοίχου πλήρωσης παρουσίασαν παρόμοια συμπεριφορά και τρόπους αστοχίας. Παρατηρήθηκε θραύση των λωρίδων ΙΟΠ λόγω εφελκυσμού. Επιπλέον παρατηρήθηκε θραύση της αγκύρωσης των λωρίδων ΙΟΠ στο άνω άκρο του πλαισίου λόγω διάτμησης. Μετά τη ρηγμάτωση και την αποκόλληση των λωρίδων ΙΟΠ το δοκίμιο έχασε την ικανότητα παραλαβής περαιτέρω φορτίσεων. Τα υπόλοιπα 6 δοκίμια τα οποία ενισχύθηκαν, στα οποία οι λωρίδες ΙΟΠ τοποθετήθηκαν σε μία από τις δύο πλευρές του τοίχου πλήρωσης, αστόχησαν λόγω θραύσης των λωρίδων στην άνω παρειά της πλήρωσης. Εξαιτίας της θραύσης των ΙΟΠ ακολούθησε αποκόλληση του υφάσματος και ρηγμάτωση των αρμών με αποτέλεσμα την αστοχία του δοκιμίου. Αξίζει να σημειωθεί ότι η αστοχία των λωρίδων επήλθε σε πιο πρώιμο στάδιο φόρτισης από ότι στα δοκίμια τα οποία ενισχύθηκαν εκατέρωθεν του τοίχου πλήρωσης.



Σχήμα 2-51 Θραύση λωρίδων ΙΟΠ (Altin et al., 2006)

Συμπερασματικά οι Altin et al. (2006) επισήμαναν την υπεροχή της συμμετρικής τοποθέτησης λωρίδων ΙΟΠ σε όρους πλευρικής αντοχής και δυσκαμψίας συγκριτικά με τα δοκίμια τα οποία ενισχύθηκαν μόνο στη μία πλευρά του τοίχου πλήρωσης. Εν συνεχεία, με την αύξηση του πλάτους λωρίδων ΙΟΠ παρατηρήθηκε περαιτέρω αύξηση της δυσκαμψίας. Εν κατακλείδι οι Altin et al. (2006) έκριναν την εφαρμογή λωρίδων ΙΟΠ ως μια αποτελεσματική μέθοδο για την δομική αναβάθμιση εμφανιζόμενων τοιχοπληρώσεων, αφού η εφαρμογή τους συντέλεσε στην αύξηση της δυσκαμψίας και της πλευρικής αντοχής των δοκιμίων. Παρόλα αυτά, όπως επισήμαναν, η αποτελεσματικότητα της εφαρμογής εξαρτάται από την επιτυχή αγκύρωση των υφασμάτων στο τοίχο και το πλαίσιο πλήρωσης

Η συνεισφορά της χρήσης ινοπλισμένων πολυμερών ως μέθοδος δομικής αναβάθμισης υφιστάμενων κατασκευών είναι αδιαμφισβήτητη. Με προαπαιτούμενο την άρτια εφαρμογή της μεθόδου, τα ΙΟΠ είχαν ευεργετικά αποτελέσματα στην απόκριση της κατασκευής έναντι σεισμικών φορτίσεων, αυξάνοντας την αντοχή, την πλευρική δυσκαμψία και την πλαστιμότητα των δομικών στοιχείων. Επιπλέον, οι μανδύες ΙΟΠ δεν επεμβαίνουν δραστικά στον σκελετό της κατασκευής και δεν αντιμετωπίζουν προβλήματα διάβρωσης όπως ο χάλυβας. Παρόλα αυτά η μέθοδος φάνηκε να αδυνατεί να προδώσει στα τοιχοπληρωμένα πλαίσια την ανάπτυξη μεγάλων παραμορφώσεων χωρίς σημαντική πτώση της αντοχής (Κούτσας, 2015).

- **Ινοπλέγματα σε Ανόργανη Μήτρα (TRMs)**

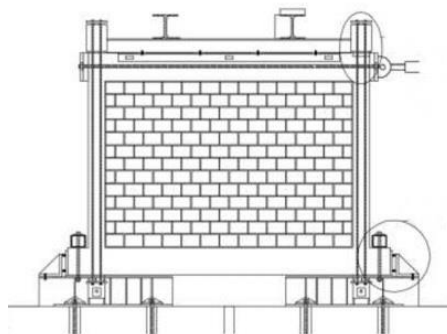
Η επαρκής συνεισφορά των ΙΑΜ για τη βελτίωση της απόκρισης κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος με τοιχοπληρώσεις, εκτός από την ενίσχυση δομικών στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος αφορά και την ενίσχυση των τοιχοπληρώσεων. Οι τοιχοπληρώσεις βρίσκονται σε άμεση επαφή με το πλαίσιο οπλισμένου σκυροδέματος για αυτό και η ενίσχυσή τους κρίνεται ζωτικής σημασίας. Στόχος την ενίσχυσης είναι η αύξηση της ικανότητας ανάληψης δυνάμεων εντός και εκτός επιπέδου. Γενικότερα επιδιώκεται η

αύξηση της αντοχής της πλήρωσης και η αποφυγή της ψαθυρής αστοχίας η οποία τη χαρακτηρίζει.

Η βέλτιστη εφαρμογή των IAM αφορά την τοποθέτησή τους σε πολλαπλές στρώσεις στη άνω και κάτω παρειά της πλήρωσης. Στη διεθνή βιβλιογραφία εντοπίζονται πληρώσεις καταπονούμενες με φορτία εντός, εκτός επιπέδου αλλά και με συνδυασμό αυτών. Επιπλέον, στη βιβλιογραφία εντοπίζονται πειραματικές δοκιμές άμεσης σύγκρισης μεταξύ δοκιμίων ενισχυμένων με IAM και ΙΟΠ, λόγω της συγγενικότητας των δύο μεθόδων.

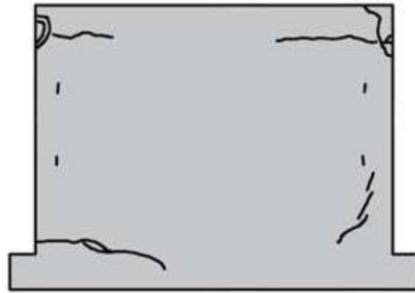
Γενικότερα η συνεισφορά των IAM κρίνεται ευεργετική στη βελτίωση της απόκρισης του επιπέδου της πλήρωσης με μικρές αυξήσεις σε αντοχή και δυσκαμψία, καλύτερη συμπεριφορά σε όρους πλευρικής δυσκαμψίας και πλαστιμότητας. Συγκριτικά οι μέθοδοι των ΙΟΠ και των IAM είχαν παραπλήσια αποτελέσματα με τα ΙΟΠ να υπερέχουν σε όρους αντοχής ενώ τα IAM να αντιμετωπίζουν επαρκέστερα το ζήτημα της ψαθυρότητας. Γενικότερα η αποτελεσματικότητα της ενίσχυσης είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με την άρτια εφαρμογή των μανδύων, την επαρκή αγκύρωσή του, τη κλειστή δομή μανδύα και τις πολλαπλές στρώσεις υφάσματος στις κρίσιμες περιοχές. Ακολουθεί αναφορά σε πειραματικές δοκιμές οι οποίες εκπονήθηκαν με στόχο την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας ενίσχυσης με ινοπλέγματα σε ανόργανη μήτρα.

Οι Akhoundi et al. (2017) πραγματοποίησαν πειραματική δοκιμή καταπόνησης εμφαντούμενης τοιχοπλήρωσης σε πλαίσιο ΟΣ. Συνολικά εξετάστηκαν δύο δοκίμια, το ένα εκ των οποίων παρέμεινε μη ενισχυμένο και αποτέλεσε το δοκίμιο αναφοράς ή δοκίμιο ελέγχου. Το δεύτερο δοκίμιο ενισχύθηκε με τη μέθοδο των IAM. Τα δοκίμια καταπονήθηκαν με ανακυκλιζόμενη φόρτιση εντός του επιπέδου της τοιχοπληρωσης. Η φόρτιση επιβλήθηκε στο δοκίμιο σε τρία σημεία, δύο από αυτά τοποθετήθηκαν στις κορυφές των υποστυλωμάτων και είχαν κατακόρυφη διεύθυνση, ενώ χρησιμοποιήθηκε και υδραυλικό έμβολο πλευρικά τοποθετημένο, όπως φαίνεται επαρκέστερα στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 2-52 Πειραματική διάταξη (Akhoundi et al., 2017)

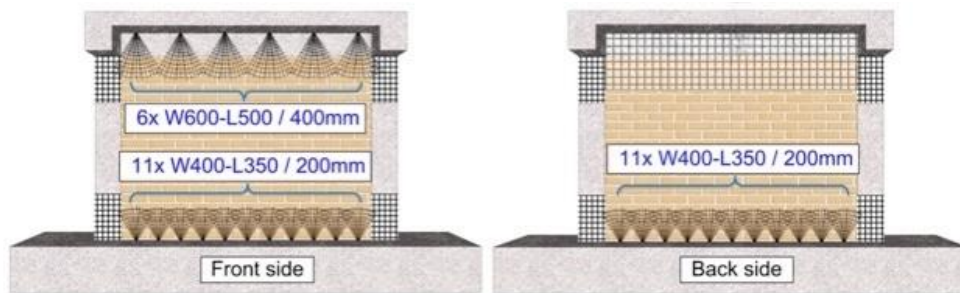
Όσον αφορά το μη ενισχυμένο δοκίμιο, όπως επισημαίνουν οι Akhoundi et al. (2017), σε πρώιμα στάδια φόρτισης παρατηρήθηκε ρηγματώση και διαχωρισμός της πλήρωσης από τα περιμετρικά στοιχεία ΟΣ. Επιπλέον, παρατηρήθηκε διαγώνια ρηγματώση της πλήρωσης και ρηγματώση των αρμών της άνω παρειάς της πλήρωσης στο σημείο επαφής με τη δοκό. Αξίζει να σημειωθεί, ότι παρατηρήθηκε ελεγχόμενη ρηγματώση των υποστρωμάτων ΟΣ γεγονός το οποίο οφείλεται στη παρουσία της εμφανιζόμενης τοιχοπλήρωσης. Για το ενισχυμένο δοκίμιο με IAM, η διασπορά των ρωγμών στην πλήρωση ήταν ελεγχόμενη, ενώ ρηγματώσεις παρατηρήθηκαν κυρίως στα σημεία της πλήρωσης όπου είχαν αστοχήσει οι διατμητικοί σύνδεσμοι. Στα σημεία όπου παρατηρήθηκε αστοχία των διατμητικών συνδέσμων επισημαίνεται και η αποκόλληση των υφασμάτων IAM. Τέλος, οι Akhoundi et al. (2017) υπογράμμισαν ότι δεν παρατηρήθηκε θραύση των αρμών στη πλήρωση παρά μόνο στα σημεία επαφής με το πλαίσιο ΟΣ.



Σχήμα 2-53 Μοτίβο ρωγμών ενισχυμένου δοκιμίου (Akhoundi et al., 2017)

Συμπερασματικά οι Akhoundi et al. (2017) επισήμαναν την αποτελεσματικότητα των IAM σε όρους αύξησης της δυσκαμψίας και της πλευρικής αντοχής. Σημαντικό ρόλο στην αποτελεσματικότητα της ενίσχυσης φαίνεται να παίζουν οι διατμητικοί σύνδεσμοι. Σύνδεσμοι υάλου οι οποίοι κυκλοφορούν στην αγορά φαίνεται να μην επαρκούν για την αποφυγή της αποκόλλησης των υφασμάτων. Παρόλα αυτά, η ενίσχυση κατάφερε να περιορίσει τη διασπορά των ρωγμών στη τοιχοπλήρωση των ενισχυμένων δοκιμίων συγκριτικά με το δοκίμιο ελέγχου.

Ιδιαίτερα καινοτόμα και αντιπροσωπευτική για την παρούσα εργασία είναι πειραματική δοκιμή η οποία εκπονήθηκε από τους Koutas et al. (2015) και η οποία αφορούσε την εντός επιπέδου καταπόνηση τριώροφου τοιχοπληρωμένου πλαισίου οπλισμένου σκυροδέματος, ενισχυμένο με ινοπλέγματα ανόργανης μήτρας. Το δοκίμιο ενισχύθηκε σύμφωνα με τις αρχές οι οποίες αναλύθηκαν εκτενώς παραπάνω, δηλαδή με κλειστή δομή μανδύα και τοποθέτηση πολλαπλών στρώσεων τόσο στα δομικά στοιχεία οπλισμένου σκυροδέματος όσο και επι της άοπλης τοιχοπλήρωσης.



Σχήμα 2-54 Ενισχυμένη εμφαντούμενη τοιχοπλήρωση σε πλαίσιο ΟΣ με IAM (Koutas et al., 2015)

Όσον αφορά το μη ενισχυμένο δοκίμιο ελέγχου οι Koutas et al. (2015) επισήμαναν ότι οι ρωγμές εμφανίστηκαν από τον πρώτο κύκλο φόρτισης στο επίπεδο της πλήρωσης. Επιπλέον, τονίστηκε ότι η μεγαλύτερη αποκόλληση λόγω της φόρτισης παρατηρήθηκε στα σημεία επαφής των υποστυλωμάτων με την πλήρωση. Το δοκίμιο αστόχησε εξαιτίας διατμητικής αστοχίας η οποία εκδηλώθηκε στην άνω γωνία σύνδεσης υποστυλώματος με την πλήρωση και η οποία εκδηλώθηκε σταδιακά. Τέλος, παρατηρήθηκε θραύση των αρμών επι της τοιχοπλήρωσης.

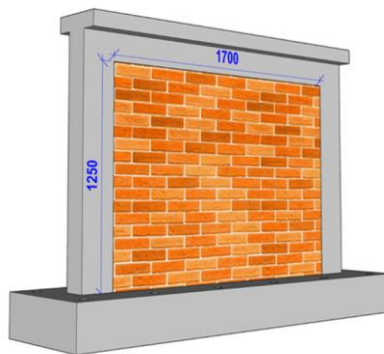


Σχήμα 2-55 Αστοχία δοκιμίου ελέγχου (Koutas et al., 2015)

Όσον αφορά το ενισχυμένο δοκίμιο οι πρώτες ρωγμές εμφανίστηκαν στον ίδιο κύκλο φόρτισης με το δοκίμιο ελέγχου. Οι Koutas et al. (2015) επισήμαναν ότι ρωγμές παρατηρήθηκαν κυρίως στους δύο πρώτους ορόφους ενώ στο πάνελ πλήρωσης του τρίτου ορόφου δεν σημειώθηκαν φθορές καθόλη τη διάρκεια της δοκιμής. Η αποκόλληση των υφασμάτων των IAM επήλθε στον 6ο κύκλο φόρτισης για την πλήρωση του 1ου ορόφου. Επιπλέον, στον δεύτερο και τον τρίτο όροφο δεν παρουσιάστηκε αποκόλληση των μανδυνών. Γενικότερα το ενισχυμένο δοκίμιο παρουσίασε εκτεταμένη ικανότητα παραμόρφωσης και πλευρικής αντοχής. Επιπρόσθετα, επισημάνθηκε ότι η ενίσχυση κρίθηκε ευεργετική για το αναβαθμισμένο δοκίμιο ενώ αποφεύχθηκε η εμφάνιση μαλακού ορόφου. Η εκτενής διατμητική αστοχία λόγω ελλιπούς εγκάρσιου οπλισμού επίσης αποφεύχθηκε χάριν των

IAM. Τονίστηκε η συνεισφορά της επαρκούς αγκύρωσης των υφασμάτων, ειδικά στα σημεία σύνδεσης πλήρωσης-πλασιού. Τέλος, η συνεισφορά των IAM έγκειται στη μετατροπή της άοπλης τοιχοποιίας σε αξιόπιστο στοιχείο ανάληψης δυνάμεων. Τα ενισχυμένα δομικά στοιχεία οπλισμένου σκυροδέματος παρουσίασαν καλύτερη απόκριση έναντι των φορτίσεων με άξιο σημασίας την ανάληψη μεγάλων διατμητικών παραμορφώσεων.

Σε συνέχεια της παραπάνω εργασίας εκπονήθηκε πείραμα από τους Koutas et al. (2019) το οποίο αφορούσε στην εκτός επιπέδου καταπόνηση μονόροφου πλασιού οπλισμένου σκυροδέματος. Εξετάστηκε η αποτελεσματικότητα της ενίσχυσης με IAM για την αύξηση της αντοχής και της ανθεκτικότητας των δοκιμίων. Όλα τα δοκίμια καταπονήθηκαν σε εκτός επιπέδου ανακυκλιζόμενη φόρτιση μέχρι να αστοχήσουν. Σημαντική παράμετρο για την παρούσα πειραματική δοκιμή αποτέλεσαν οι συνοριακές συνθήκες μεταξύ δομικών στοιχείων και τοίχων πλήρωσης. Μία ακόμη παράμετρος η οποία εξετάστηκε από τους Koutas et al. (2019) αφορούσε στο πάχος των τοιχοπληρώσεων. Τέλος, αξιολογήθηκε η επιτυχία της ενίσχυσης σε όρους αύξησης της εκτός επιπέδου αντοχής, της δυσκαμψίας και της πλαστιμότητας. Επιπρόσθετα εξετάστηκε η ικανότητα των IAM στη διάχυση ενέργειας και της παραμένουσας αντοχής.



Σχήμα 2-56 Δοκίμιο εμφαντούμενης τοιχοπλήρωσης σε πλαίσιο οπλισμένου σκυροδέματος (Koutas et al., 2019)

Η διαδικασία ενίσχυσης για όλα τα αναβαθμισμένα δοκίμια ήταν συγκεκριμένη και αποτελούταν από επτά διαδοχικά βήματα:

1. Εκτράχυνση σκυροδέματος και δημιουργία αυλακώσεων σε υποστρώματα και δοκό για την εφαρμογή της ενίσχυσης
2. Στρογγυλοποίηση των γωνιών των υποστρωμάτων για την αποφυγή συγκέντρωσης τάσεων στους μανδύες IAM
3. Καθαρισμός και λείανση των επιφανειών τόσο των δομικών στοιχείων όσο και της τοιχοπλήρωσης για την τοποθέτηση των υφασμάτων

4. Εφαρμογή πρώτης στρώσης κονιάματος
5. Τοποθέτησης πρώτης στρώσης υφάσματος IAM με χειροκίνητη επικόλληση
6. Εφαρμογή δεύτερης στρώσης κονιάματος για την πλήρη επικάλυψη του υφάσματος που είχε μόλις τοποθετηθεί
7. Εφαρμογή δεύτερης στρώσης υφάσματος IAM και επανάληψη της ίδιας διαδικασίας



Σχήμα 2-57 Εφαρμογή υφάσματος IAM (Koutas et al., 2019)

Στο σημείο αυτό παρουσιάζονται τα κυριότερα συμπεράσματα της πειραματικής δοκιμής με στόχο την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας της ενίσχυσης. Όπως επισημαίνουν οι Koutas et al. (2019), η ενίσχυση με IAM κρίθηκε αποτελεσματική στην αύξηση της ικανότητας μεταφοράς φορτίων εκτός επιπέδου, ιδίως για τις τοιχοπληρώσεις μονής επένδυσης. Επιπλέον, επισημάνθηκε ότι το μέγιστο φορτίο το οποίο παρέλαβαν τα ενισχυμένα δοκίμια καθορίστηκε από τις συνοριακές συνθήκες σύνδεσης και όχι από την καμπτική αντοχή της τοιχοπλήρωσης. Η σύνδεση της τοιχοπλήρωσης με τα περιμετρικά στοιχεία οπλισμένου σκυροδέματος αύξησε σημαντικά τη δυσκαμψία και την παραμένουσα αντοχή των ενισχυμένων δοκιμίων. Επιπρόσθετα, η ενίσχυση με IAM ήταν επιτυχής και σε όρους απορρόφησης ενέργειας για τα ενισχυμένα δοκίμια συγκριτικά με τα δοκίμια ελέγχου. Τέλος, σύμφωνα με τους Koutas et al. (2019), η συγκεκριμένη πειραματική δοκιμή ανέδειξε την αποτελεσματικότητα των IAM ως μέθοδο δομικής ενίσχυσης.

Η πληθώρα πειραματικών δοκιμών οι οποίες διενεργούνται ανά τα χρόνια έχει στόχο την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας της μεθόδου. Μονώροφα και πολυώροφα δοκίμια ενισχυμένα με ινοπλέγματα ανόργανης μήτρας εξετάζονται σε εντός και εκτός επιπέδου καταπονήσεις. Η επιτυχία της μεθόδου έγκειται στην αύξηση της δυσκαμψίας και της ικανότητας παραμόρφωσης. Επιπλέον, ειδικότερα για τα τοιχοπληρωμένα πλαίσια οπλισμένου σκυροδέματος μέσω των IAM καλείται να παρεμποδιστεί η ψαθυρή αστοχία της πλήρωσης και να αποφευχθεί η μερική ή ολική της κατάρρευσης και κατά επέκταση η αστοχία του συνόλου της κατασκευής. Μολονότι στη διεθνή βιβλιογραφία εντοπίζονται

προσεγγίσεις εφαρμογής των IAM σε νέες κατασκευές στη παρούσα εργασία αναλύθηκαν οι ευεργετικές τους ιδιότητες για την δομική αναβάθμιση υφιστάμενων κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος με εμφανιζόμενες τοιχοπληρώσεις.

Κεφάλαιο 3: Ενεργειακή Αναβάθμιση Υφιστάμενων Κατασκευών

3.1 Ενεργειακή Επάρκεια Κατασκευών

3.1.1 Ιστορική Αναδρομή

Η μεγάλη άνθηση της οικοδομής τις δεκαετίες 1960-1990, καθιστά σήμερα την πλειονότητα του υπάρχοντος κτιριακού αποθέματος μη ενεργειακά αποδοτική (Pohoryles et al., 2020). Οι πρώτοι ενεργειακοί κανονισμοί εμφανίστηκαν στις σκανδιναβικές χώρες τις αρχές της δεκαετίας του 1960 λόγω του πολύ ψυχρού κλίματος (Building Performance Institute BPIE, 2011). Οι συγκεκριμένοι κανονισμοί ωστόσο δεν υιοθετήθηκαν έγκαιρα από τις υπόλοιπες χώρες της Ευρώπης, με αποτέλεσμα οι πρώτες συμπαγείς διατάξεις να εισάγονται το 1980 όπου το μεγαλύτερο μέρος των σημερινών κτιρίων είχε ήδη κατασκευαστεί. Τα κτίρια που κατασκευάστηκαν μεταξύ 1945 και 1980 θεωρούνται τα λιγότερα αποδοτικά. Μετά το 1945 και το πέρας του δευτέρου παγκόσμιου πολέμου αναδομήθηκαν αστικά κέντρα και η Ευρώπη άρχισε να παίρνει τη μορφή που έχει σήμερα (Bournas, 2018). Η ευρωπαϊκή κοινότητα καθυστέρησε να αντιληφθεί τη σημασία της ενεργειακής απόδοσης των κατασκευών με τους πρώτους κανονισμούς να αποτελούν απόρροια της κρίσης του πετρελαίου στα τέλη του 1970.

Είτε λόγω αργοπορημένης υιοθέτησης των ενεργειακών οδηγιών είτε λόγω της μεγάλης κατασκευαστικής άνθησης τις δεκαετίες πριν την έναρξη της ισχύος τους, το μεγαλύτερο μέρος του υπάρχοντος κτιριακού αποθέματος έχει δομηθεί χωρίς να έχουν ληφθεί υπόψιν κανονισμοί ενεργειακής επάρκειας. Ενδεικτικά, αξίζει να αναφερθεί ότι ο κανονισμός ενεργειακής απόδοσης της χώρας μας, ο επονομαζόμενος ΚΕΝΑΚ, τέθηκε σε ισχύ το 2010, καθιστώντας μεγάλο ποσοστό των κτιρίων μη ενεργειακά αποδοτικό (Bournas, 2018).

Η γήρανση των κατασκευών αποτελεί κατασταλτικό παράγοντα στην ενεργειακή απόδοση. Με το πέρας δεκαετιών η υπάρχουσα θερμομόνωση, εάν έχει εφαρμοστεί, χάνει την αποτελεσματικότητά της. Το γεγονός ότι το μεγαλύτερο μέρος των υαρχουσών κατασκευών είναι 40-50 ετών με ελλιπή ή καθόλου θερμομόνωση, σε συνδυασμό με τους

φιλόδοξους στόχους που η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει θέσει, προετοιμάζουν το έδαφος για την ενεργειακή αναβάθμιση των κτιρίων (Pohoryles et al., 2020).

3.1.2 Γενικά για την θερμομόνωση κτιρίων

Η ενεργειακή απόδοση των κτιρίων είναι άρρηκτα συνδεδεμένη και εξαρτώμενη από τη θερμομόνωση. Ετησίως δαπανούνται υπέρογκα ποσά από τους χρήστες χάριν της υγιούς διαβίωσης, δηλαδή της ψύξης και θέρμανσης των εσωτερικών χώρων των κατασκευών. Η συνεχής κατανάλωση μη ανανεώσιμων πηγών θέρμανσης και ψύξης σε συνδυασμό με την απουσία ή την ελλιπή θερμομόνωση η οποία χαρακτηρίζει πληθώρα των κτιρίων, συντελεί στα υπέρογκα δαπανώμενα ποσά ενέργειας και στην αύξηση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα. Τα παραπάνω συντέλεσαν στην ένταξη των κτιριακών εγκαταστάσεων σε περίοπτη θέση στην ευρωπαϊκή περιβαλλοντική πολιτική και κατέστησαν την αναβάθμιση του κτιριακού αποθέματος απαραίτητη (Bournas, 2018).

Η αναβάθμιση και η βελτίωση της θερμομόνωσης ενδέχεται να μειώσει τόσο τα ποσά καταναλωμένης ενέργειας όσο και τις δαπάνες θέρμανσης και ψύξης, εξασφαλίζοντας την ίδια ή και καλύτερη ποιότητα διαβίωσης για τους ευρωπαϊούς πολίτες.

Στην πλειονότητα των κατασκευών οι οποίες απαρτίζουν το υπάρχον κτιριακό απόθεμα, την επιβράδυνση της μεταφοράς ενέργειας από τα θερμότερα στα ψυχρότερα σημεία, αναλάμβανε η θέρμανση, τα κλιματιστικά κ.ο.κ. Μετά το πέρας κάποιων δεκαετιών έγινε αντιληπτό, ότι οι συγκεκριμένες λύσεις, λαμβάνοντας υπόψιν την πλήρη απουσία θερμομόνωσης, είναι ιδιαίτερα δαπανηρές. Η βελτίωση δύναται να επέλθει με την εφαρμογή κατάλληλης θερμομόνωσης όπου εκλείπει και με την αναβάθμιση της όπου η αποτελεσματικότητά της έχει μειωθεί. Η εφαρμογή της θερμομόνωσης εστιάζει στα σημεία των κατασκευών, τα οποία θεωρούνται σύνορα επιφανειών διαφορετικής θερμοκρασίας. Πρόκειται για τμήματα του κτιρίου εκατέρωθεν των οποίων η διαφορετική θερμοκρασία προκαλεί την επακόλουθη ροή θερμότητας (Bournas, 2018). Σημεία ευάλωτα στη ροή θερμότητας θεωρούνται η στέγη, η τοιχοποιία, το πάτωμα και τα εξωτερικά κουφώματα.

Αξίζει να σημειωθεί ότι η αρχιτεκτονική μελέτη της κατασκευής κατέχει κομβικό ρόλο στην ύπαρξη θερμικών απωλειών. Η θέση και ο προσανατολισμός του κτιρίου είναι πολύ σημαντικός, για τον περιορισμό απώλειας ψύξης και θέρμανσης (Romano et al., 2020). Όσο πιο εκτεθειμένο είναι το κτίριο σε ανέμους τόσο μεγαλύτερες απώλειες θερμότητας παρατηρούνται, αντίθετα με κατασκευή η οποία δεν προστατεύεται από την ηλιακή ακτινοβολία. Σε αυτή την περίπτωση, η ψύξη των εσωτερικών χώρων είναι δυσκολότερη. Εν συνεχεία, μια άλλη έκφανση της θέσης της κατασκευής η οποία επηρεάζει τις θερμικές απώλειες, είναι το πόσο εκτεθειμένο είναι το κτίριο περιμετρικά. Κατασκευές οι οποίες είναι

μέρος συνεχόμενης δόμησης εμφανίζουν μικρότερα ποσοστά θερμικών απωλειών. Όσον αφορά τις εσωτερικές επιφάνειες της κατασκευής, ενιαίοι χώροι οι οποίοι δεν διακόπτονται μεταξύ των ορόφων συμβάλλουν δραστικά στην ροή της θερμότητας. Οι παραπάνω παράγοντες επηρεάζουν τόσο ευεργετικά όσο και καταστροφικά τις εκάστοτε ροές θερμότητας, ωστόσο αναφερόμαστε σε υπάρχουσες κατασκευές. Δεδομένου ότι η αντικατάσταση υπάρχουσών κατασκευών κρίθηκε απαγορευτική, καλούμαστε να εστιάσουμε στις εκφάνσεις των κατασκευών τις οποίες μπορούμε να αναβαθμίσουμε για να περιορίσουμε τη μεταφορά θερμικής ενέργειας (Romano et al., 2020). Για αυτόν τον λόγο εστιάζουμε στα εξωτερικά κουφώματα, στο πάχος τους, το πλήθος τους, τα υλικά που χρησιμοποιούνται και φυσικά τη θέση εφαρμογής τους.

Η απόδοση του θερμομονωτικού σχήματος δεν εξαρτάται μόνο από τις προσπάθειες της επιστημονικής κοινότητας για ανάπτυξη καινοτόμων και αποτελεσματικών υλικών και συστημάτων. Δεν πρέπει να λησμονείται η σημασία της σωστής εφαρμογής. Η διαδικασία εγκατάστασης και η εξειδίκευση των συνεργείων εφαρμογής είναι ιδιαίτερα σημαντική για την εξασφάλιση της απόδοσης του θερμομονωτικού συστήματος. Για την ύπαρξη θερμικών γεφυρών στις κατασκευές ευθύνεται η κακή τοποθέτηση της θερμομόνωσης (Bournas, 2018). Οι κρύες γέφυρες, συναντώνται στα σημεία ένωσης των επιφανειών στις κατασκευές τα οποία διέπονται από έντονη ροή θερμότητας. Πρόκειται για ένα πρόβλημα το οποίο εντοπίζεται συχνά στις κατασκευές και λόγω ελλιπούς ενημέρωσης ο κίνδυνος τον οποίο ενδέχεται να προκαλέσει αγνοείται. Οι ψυχρές γέφυρες είναι υπεύθυνες για την κατά το ήμισυ μείωση της θερμικής ενέργειας της κατασκευής (Romano et al., 2020). Επίσης προκαλούν ακόμη και ορατή ζημιά στην τοιχοποιία και εάν δεν αντιμετωπιστούν δύναται να μειώσουν δραστικά τον κύκλο ζωής του κτιρίου.

3.1.3 Ευάλωτα Κτιριακά Στοιχεία Κελύφους

Με τον όρο κελύφος στις κτιριακές κατασκευές αναφερόμαστε στο περίβλημα του κτιρίου. Το κτιριακό περίβλημα αποτελεί το κατασκευαστικό σύνορο μεταξύ του εσωτερικού και του εξωτερικού της κατασκευής. Πρόκειται για τις επιφάνειες οι οποίες χωρίζουν το εσωτερικό των κτιρίων από τον περιβάλλοντα χώρο. Τα στοιχεία κελύφους συνεισφέρουν δραστικά στην αξιολόγηση της θερμικής διαπερατότητας της κατασκευής και κατά επέκταση στα απαιτούμενα ποσά δαπανώμενης ενέργειας προς θέρμανση και ψύξη των εσωτερικών χώρων (Bournas, 2018). Η αποδοτική εφαρμογή της θερμομόνωσης εστιάζει στα στοιχεία κελύφους των κατασκευών για την επιβράδυνση της ροής θερμότητας από το εσωτερικό προς το εξωτερικό και αντίστροφα. Επιπροσθέτως, η σωστή εφαρμογή των κατάλληλων

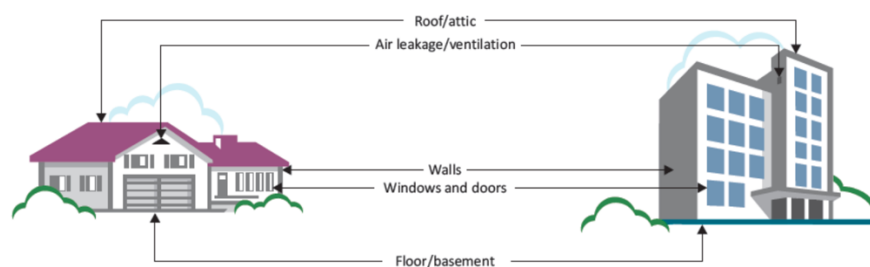
θερμομονωτικών υλικών συμβάλλει στον περιορισμό των δαπανών οι οποίες συνοδεύουν την αλόγιστη χρήση συστημάτων θέρμανσης και ψύξης στις κατασκευές. Στα κτιριακά στοιχεία κελύφους συμπεριλαμβάνονται, η εξωτερική τοιχοποιία, τα δάπεδα και οι οροφές. Επιπλέον, σημεία άξια προσοχής σε όρους θερμικής αγωγιμότητας είναι και κάποια δευτερεύοντα χαρακτηριστικά των κτιρίων, όπως οι πόρτες και τα παράθυρα. Μολονότι τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά συνδέουν τόσο το εσωτερικό με το εξωτερικό της κατασκευής όσο και τους εσωτερικούς χώρους μεταξύ τους, κοινώς επηρεάζουν τη ροή θερμότητας, δεν ανάγονται στην κατασκευαστική μελέτη και η αναβάθμιση τους δεν αφορά την εφαρμογή θερμομόνωσης στον φέροντα οργανισμό της κατασκευής.

Η ουσία της εγκατάστασης συστήματος θερμομόνωσης αφορά στον καθοριστικό περιορισμό των ενεργειακών απωλειών στη διεπιφάνεια του εσωτερικού και του εξωτερικού χώρου (Bournas, 2018). Εκτός από την ανάπτυξη καινοτόμων υλικών πραγματοποιούνται εκτενείς μελέτες ανάπτυξης αποτελεσματικών συστημάτων θερμομόνωσης για το κέλυφος της κατασκευής αφού οι θερμικές απώλειες οι οποίες οφείλονται στον φέροντα οργανισμό εξαρτώνται από ποικίλους παράγοντες. Κάποιοι από αυτούς τους παράγοντες είναι η γήρανση των κτιριακών χαρακτηριστικών, η τεχνοτροπία της εκάστοτε κατασκευής και οι τεχνικές εφαρμογής είτε αφορούν την θερμομόνωση είτε τη δομική απόκριση των στοιχείων (Pohoryles et al., 2020). Φυσικά, όπως προαναφέρθηκε, ο προσανατολισμός, η θέση, τα αρχιτεκτονικά λάθη, η συμπεριφορά και οι ανάγκες των χρηστών πάντοτε θα επηρεάζουν την ενεργειακή απόδοση της κατασκευής, ωστόσο είναι μη αναστρέψιμοι παράγοντες και δεν ανάγονται στο πλαίσιο της ενεργειακής αναβάθμισης.

Η αναθεώρηση των ενεργειακών κανονισμών είναι μείζονος σημασίας. Η συνεισφορά των στοιχείων κελύφους στην τελική θερμική αγωγιμότητα του συνόλου της κατασκευής έχει ως επακόλουθο τη συνεχή αυστηροποίηση των οδηγιών σχετικά με τα συγκεκριμένα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά. Τις τελευταίες δεκαετίες παρατηρείται συνεχής ανασύνταξη κανονισμών και η έκδοση νέων οδηγιών σχετικά με την ενεργειακή επάρκεια των κατασκευών, έτσι ώστε να καταστεί σαφής στην ευρωπαϊκή κοινότητα η ανάγκη της βελτίωσης των τωρινών ενεργειακών συνθηκών (Bournas, 2018). Οι απαιτήσεις σχετικά με τον φέροντα οργανισμό της κατασκευής βελτιώνονται με την πάροδο των χρόνων και η βελτίωση της ενεργειακής τους απόδοσης αποτελεί μονόδρομο. Η μείωση των ενεργειακών απωλειών προϋποθέτει την ανάπτυξη καινοτόμων συστημάτων, τα οποία αξιοποιούν νέα υλικά με χαμηλές τιμές θερμικής διαπερατότητας, πολύ αποδοτικότερα από τα ήδη υπάρχοντα. Η ροή της θερμότητας μετράται βάσει του συντελεστή θερμικής διαπερατότητας ή U Value, ο οποίος υπολογίζεται ως το πηλίκο του ρυθμού ροής

θερμότητας από μια επιφάνεια σε μια άλλη προς την επικρατούσα διαφορά θερμοκρασία μεταξύ των δύο επιφανειών (Bournas, 2018). Ο συγκεκριμένος συντελεστής αξιολογεί την ενεργειακή απόκριση της κατασκευής αφού όσο χαμηλότερη είναι η τιμή τόσο πιο αποδοτικό είναι το εκάστοτε θερμομονωτικό σχήμα. Η σημασία της αποτελεσματικής θερμομόνωσης έγκειται στον καθοριστικό περιορισμό των ενεργειακών και χρηματικών απωλειών.

Ακολουθεί αναφορά στα κτιριακά στοιχεία κελύφους, όπου εστιάζει η εφαρμογή των θερμομονωτικών σχημάτων. Στο φέροντα οργανισμό εντάσσονται υποστυλώματα, δοκοί και πληρώσεις. Η συνολική θερμομόνωση της κατασκευής ολοκληρώνεται με την εγκατάσταση του σχήματος σε στέγες και περιμετρικά των κουφωμάτων.



Σχήμα 3-1 Κτιριακά στοιχεία τα οποία επηρεάζουν την ενεργειακή επάρκεια της κατασκευής (Bournas, 2018)

3.1.3.1 Φέρων Οργανισμός

Η τοιχοποιία αποτελεί το κατασκευαστικό σύνορο του εσωτερικού του κτιρίου με τον περιβάλλοντα χώρο. Στις ευρωπαϊκές κατασκευές συναντώνται ποικίλα είδη εξωτερικών τοίχων, τοίχοι με βάση το ξύλο, το μέταλλο καθώς και διάφορες μορφές μπατικής τοιχοποιίας (Building Performance Institute BPIE, 2011). Επιπλέον, οι εξωτερικοί τοίχοι καταλαμβάνουν το μεγαλύτερο μέρος του κελύφους της κατασκευής.

Δεδομένου ότι η συνεισφορά της εξωτερικής τοιχοποιίας στην ενεργειακή επάρκεια των κατασκευών έχει γίνει πλέον αντιληπτή έχουν δημιουργηθεί διαφορετικές προσεγγίσεις εφαρμογής της θερμομόνωσης στους εξωτερικούς τοίχους. Η εφαρμογή της θερμομόνωσης δύναται να εφαρμοστεί τόσο στις εσωτερικές όσο και στις εξωτερικές επιφάνειες, αρκετά συνήθης είναι η χρήση θερμομονωτικών τούβλων για την αύξηση της ενεργειακής επάρκειας των κοιλοτήτων του σκελετού (Romano et al., 2020). Οποιαδήποτε προσέγγισή και εάν εφαρμοστεί στην κατασκευή, το θερμομονωτικό σχήμα καλείται να πληροί συγκεκριμένα χαρακτηριστικά. Καλούμαστε να παρέχουμε στην κατασκευή μας επαρκή θερμική αντίσταση με όσο το δυνατόν μεγαλύτερο βαθμό περιορισμού της μεταφοράς θερμότητας μεταξύ των επιφανειών (Romano et al., 2020). Επιπλέον το θερμομονωτικό σχήμα οφείλει να ακολουθεί

τις ελάχιστες απαιτήσεις θερμομόνωσης, οι οποίες καθορίζονται από τους ενεργειακούς κανονισμούς ανάλογα με τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά. Στη συνέχεια η θερμομόνωση της τοιχοποιίας, των δοκών και των υποστυλωμάτων πρέπει να γίνει μέσω άρτιας εφαρμογής προς αποφυγή των θερμικών γεφυρών οι οποίες δύνανται να μειώσουν την απόδοση του θερμομονωτικού σχήματος (Bournas, 2018). Τέλος, τα υλικά τα οποία χρησιμοποιούνται για τη θερμομόνωση των κατασκευών πρέπει να προστατεύονται καταλλήλως για τη διατήρηση των ευεργετικών ιδιοτήτων τους. Το θερμομονωτικό στρώμα πρέπει να είναι προστατευμένο από διείσδυση νερού η οποία θα αυξήσει τα ποσοστά της υγρασίας στο εσωτερικό με αποτέλεσμα τη βραχυπρόθεσμη μείωση της ενεργειακής απόδοσης του σχήματος (Bournas, 2018). Η κυριότερη διάκριση την οποία μπορούμε να κάνουμε για τη σφαιρική αξιολόγηση των υφιστάμενων θερμομονωτικών σχημάτων και των προσεγγίσεων οι οποίες δύνανται να εφαρμοσθούν, είναι η εφαρμογή της θερμομόνωσης στις εξωτερικές και τις εσωτερικές παρειές των στοιχείων κελύφους.



Σχήμα 3-2 Εφαρμογή θερμομόνωσης στην εξωτερική τοιχοποιία (Bournas, 2018).

A. Εσωτερική Θερμομόνωση

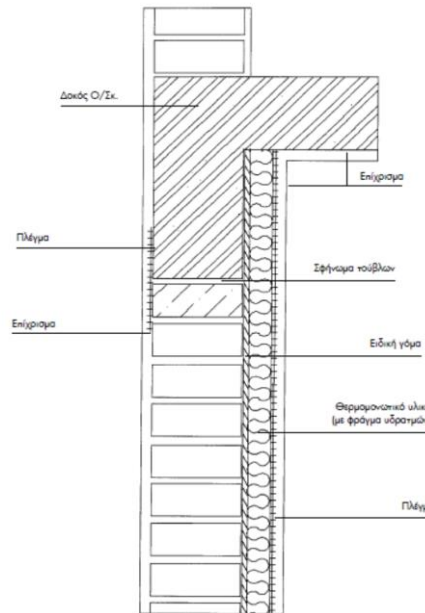
Η εσωτερική θερμομόνωση εφαρμόζεται σε κατασκευές στις οποίες προτεραιότητα είναι η σύντομη ψύξη και θέρμανση των εσωτερικών χώρων . Σε τέτοιου είδους κατασκευές δεν αξιολογείται και δεν επιδιώκεται η σφαιρική ενεργειακή απόδοση της κατασκευής όταν διακοπεί η λειτουργία των μηχανημάτων θέρμανσης και ψύξης. Φυσικά τέτοιου είδους θερμομόνωση δεν ευδοκιμεί σε οικιστικές κατασκευές, δηλαδή κτίρια μόνιμης κατοικίας, ωστόσο πρόκειται για μια αποδοτική λύση για εξοχικές κατοικίες και εγκαταστάσεις οι οποίες δεν λειτουργούν καθόλη την διάρκεια της ημέρας αλλά συγκεκριμένες ώρες, όπως τα σχολεία και τα γραφεία (Buildings Performance Institute BPIE, 2011).

Η εσωτερική θερμομόνωση εστιάζει στα στοιχεία του φέροντα οργανισμού της κατασκευής και εφαρμόζεται εξ ολοκλήρου στον εσωτερικό χώρο, έχει συνήθως μορφή υφάσματος το οποίο επικολλάται στην επιφάνεια μέσω συνδετικού υλικού και καλύπτεται με

ψευδοκατασκευή, όπως γυψοσανίδα, για αισθητικούς λόγους. Πρόκειται για μια μορφή θερμομόνωσης με ευεργετικά χαρακτηριστικά. Αρχικά έχει ταχεία εφαρμογή και δεν χρήζει ιδιαίτερης εξειδίκευσης των συνεργειών. Κατά αυτόν τον τρόπο ελαχιστοποιείται ο κίνδυνος της ελαττωματικής εφαρμογής, η οποία μπορεί να αποβεί καταστροφική για την απόδοση του θερμομονωτικού σχήματος. Επιπλέον, αποτελεί οικονομικότερη προσέγγιση συγκριτικά με την εξωτερική θερμομόνωση η οποία θα αναλυθεί εκτενέστερα παρακάτω. Η λειτουργία του συγκεκριμένου σχήματος είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με τη χωρίς χρονική καθυστέρηση απόδοση των συστημάτων θέρμανσης και ψύξης. Μέσω της εσωτερικής θερμομόνωσης δημιουργούνται κατάλληλες συνθήκες αξιοποίησης της απόδοσης των κλιματιστικών και των συστημάτων θέρμανσης τα οποία συναντώνται στις κατασκευές. Τέλος, το εν λόγω θερμομονωτικό σχήμα δεν χρήζει προστασίας από ακραία καιρικά φαινόμενα, υγρασία και έκθεση σε ηλιακή ακτινοβολία δεδομένου ότι το σχήμα εγκαθίσταται στην εσωτερική επιφάνεια της κατασκευής.

Μολονότι η εσωτερική θερμομόνωση παρουσιάζει κάποια ευεργετικά ενεργειακά χαρακτηριστικά, παρουσιάζει και σημαντικά μειονεκτήματα τα οποία είναι άξια αναφοράς. Δεδομένου ότι οι εξωτερικές κοιλότητες χαρακτηρίζονται από απουσία θερμομόνωσης, ενώ στους εσωτερικούς χώρους παρατηρείται θερμομονωτικό ύφασμα, δημιουργούνται συνθήκες εμφάνισης θερμικών γεφυρών στα σημεία τομής των εσωτερικών και των εξωτερικών τοίχων (Ruggeri et al., 2020). Εν συνεχεία, λόγω της απουσίας θερμομόνωσης στο περίβλημα της κατασκευής, τα δομικά στοιχεία παραμένουν απροστάτευτα εξαιτίας των θερμικών μεταβολών. Εκατέρωθεν της ίδιας επιφάνειας παρατηρείται ύπαρξη και μη θερμομονωτικού υφάσματος, γεγονός το οποίο εντείνει την εκδήλωση θερμικών μεταβολών στις εξωτερικές κοιλότητες με επακόλουθη τη συστολή και τη διαστολή των δομικών στοιχείων (Ruggeri et al., 2020). Οι κατασκευές στις οποίες συναντάται εγκατάσταση εσωτερικής θερμομόνωσης είναι άρρηκτα συνδεδεμένες με την έντονη και συνεχή λειτουργία των συστημάτων ψύξης και θέρμανσης, κατά τη διάρκεια χρήσης του κτιρίου. Για αυτόν τον λόγο υπάρχει μεγάλη πιθανότητα συμπύκνωσης υδρατμών στις εσωτερικές κοιλότητες της κατασκευής, με πιθανή την εκδήλωση επιφανειακής υγρασίας. Η υγρασία στο εσωτερικό της κατασκευής έχει σοβαρές επιπτώσεις στον κύκλο ζωής του κτιρίου, για αυτό και το σχήμα της εσωτερικής θερμομόνωσης πρέπει να συνοδεύεται από φράγμα υδρατμών στις επιφάνειες κοντά στα κλιματιστικά και στις μονάδες θέρμανσης (Ruggeri et al., 2020). Τέλος, έχουν επισημανθεί οι παράμετροι αξιολόγησης των σχημάτων αναβάθμισης υφιστάμενων κατασκευών. Μια πολύ σημαντική παράμετρος είναι η μέθοδος αναβάθμισης να μην διακόπτει την λειτουργία του κτιρίου. Πιο συγκεκριμένα, είναι προφανές ότι η εφαρμογή της εσωτερικής θερμομόνωσης

απαιτεί τη διακοπή της λειτουργίας της κατασκευής και την απομάκρυνση των χρηστών. Τέλος, για λόγους κάλυψης του θερμομονωτικού υφάσματος, τις περισσότερες φορές εγκαθίστανται γυψοσανίδες, οι οποίες μειώνουν το αξιοποιούμενο ωφέλιμο εμβαδόν του εσωτερικού χώρου.



Σχήμα 3-3 Εσωτερική θερμομόνωση κατασκευής (Vitouladitis, 2012)

B. Εξωτερική Θερμομόνωση

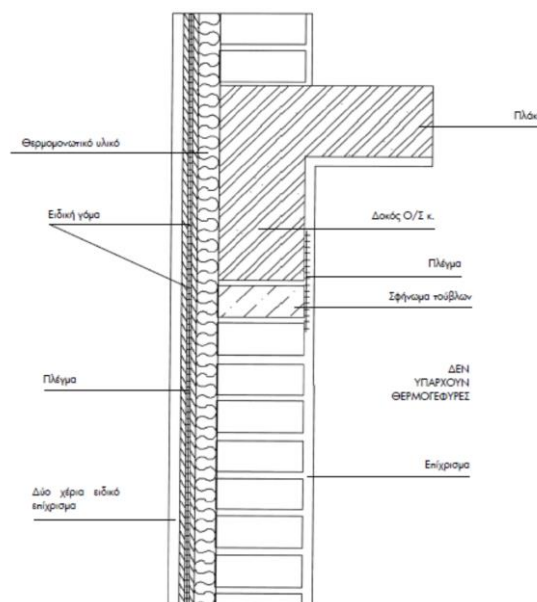
Σε αντίθεση με την εσωτερική θερμομόνωση, η θερμομόνωση των εξωτερικών παρειών της κατασκευής δεν αφορά τη βελτιστοποίηση της απόδοσης των συστημάτων θέρμανσης και ψύξης. Για αυτόν τον λόγο εγκαθίσταται σε κατασκευές οι οποίες χρησιμοποιούνται από τους χρήστες καθόλη την διάρκεια της ημέρας. Δεδομένου ότι οι χρήστες δεν παύουν να χρησιμοποιούν τέτοιου είδους κατασκευές σε συνδυασμό με το γεγονός ότι οι μονάδες θέρμανσης και ψύξης είναι αδύνατον να λειτουργούν συνεχώς, καλούμαστε να εφαρμόσουμε κάποιο θερμομονωτικό σχήμα το οποίο θα περιορίζει τη μεταφορά θερμότητας μεταξύ των εσωτερικών χώρων και του εξωτερικού περιβάλλοντος της κατασκευής. Η βέλτιστη επιλογή θερμομονωτικού σχήματος το οποίο πληροί τα παραπάνω χαρακτηριστικά είναι η φιλοσοφία της εξωτερικής θερμομόνωσης. Πρόκειται για το αποδοτικότερο σχήμα, με πολλές διαφορετικές μορφές, διαφορετικά υλικά και τεχνοτροπία και συναντάται σε κατασκευές των οποίων η χρήση είναι συνεχής όπως οι κατοικίες και τα νοσοκομεία. Η εξωτερική θερμομόνωση θεωρείται η αποδοτικότερη λύση για την εξασφάλιση της ενεργειακής επάρκειας της κατασκευής, ωστόσο πρόκειται για ένα

απαιτητικό σχήμα το οποίο χρήζει άρτιας εφαρμογής και χαρακτηρίζεται από μεγάλο κόστος (Bournas, 2018). Τέλος, η εφαρμογή και η εξασφάλιση της απόδοσης της εξωτερικής θερμομόνωσης δυσχεραίνεται ακόμα παραπάνω, όταν δεν εφαρμόζεται κατά την ανέγερση της κατασκευής αλλά χρησιμοποιείται ως μέθοδος αναβάθμισης της υφιστάμενης ενεργειακής απόκρισης.

Η εξωτερική θερμομόνωση δεν θεωρείται αυθαίρετα ως η βέλτιστη φιλοσοφία θερμομόνωσης τόσο υφιστάμενων όσο και νέων κατασκευών. Αρχικά, δεδομένου ότι εφαρμόζεται στις σημαντικότερες κατασκευές, όπως οι κατοικίες, καταφέρει να ελαχιστοποιήσει τη μεταφορά θερμικής ενέργειας μεταξύ των χώρων ακόμη και τη διακοπή λειτουργίας του κλιματιστικού ή της μονάδας θέρμανσης. Κατά αυτόν τον τρόπο, δεδομένου ότι λόγω της εξωτερικής θερμομόνωσης, οι εσωτερικοί χώροι διατηρούν σταθερή της θερμοκρασία τους για κάποιο χρονικό διάστημα, με αποτέλεσμα να μην είναι απαραίτητη η συνεχής λειτουργία μονάδων θέρμανσης και ψύξης (Bournas, 2018). Είναι προφανές ότι μέσω της εφαρμογής επαρκούς εξωτερικής θερμομόνωσης επιτυγχάνεται τόσο περιορισμός των οικονομικών δαπανών προς εκπλήρωση των αναγκών των χρηστών, όσο και περιορισμός του περιβαλλοντικού αντίκτυπου. Η εξωτερική θερμομόνωση καταφέρει να απαντήσει έμπρακτα στα μειονεκτήματα της μεθόδου της εσωτερικής θερμομόνωσης. Αρχικά, μέσω της επαρκούς εξωτερικής θερμομόνωσης αποφεύγονται οι θερμικές μεταβολές εκατέρωθεν των επιφανειών και ελαχιστοποιείται ο κίνδυνος δημιουργίας ψυχρών γεφυρών (Ruggeri et al., 2020). Εν συνεχεία, δεν λησμονείται η καταλληλότητα της εξωτερικής θερμομόνωσης εάν επιλεγεί ως μέθοδος ενεργειακής αναβάθμισης υφιστάμενης κατασκευής, αφού η εφαρμογή της δεν εμποδίζει τη λειτουργία του κτιρίου και δεν απαιτεί την απομάκρυνση των χρηστών. Τέλος, λόγω της εφαρμογής της στο εξωτερικό περίβλημα της κατασκευής και πιο συγκεκριμένα στα δομικά στοιχεία του φέροντα οργανισμού με επακόλουθη αύξηση του πάχους τους, δύναται να προσφέρει περαιτέρω προστασία στην έκθεση του κτιρίου σε ακραία καιρικά φαινόμενα και δυνατούς ανέμους (Bournas, 2018).

Μολονότι η εξωτερική θερμομόνωση προσδίδει στην κατασκευή ενεργειακή επάρκεια και παρουσιάζει πολυάριθμα πλεονεκτήματα συγκριτικά με την εσωτερική θερμομόνωση, υπάρχουν κάποια σημεία της εν λόγω φιλοσοφίας τα οποία χρήζουν βελτίωσης. Αρχικά η απόδοση του θερμομονωτικού σχήματος στην περίπτωση της εξωτερικής θερμομόνωσης, απαιτεί άρτια εφαρμογή. Πρόκειται για απαιτητική εφαρμογή η οποία χρήζει εξειδικευμένα συνεργεία (Bournas, 2018). Επιπλέον, όλες οι κατασκευές δεν είναι πανομοιότυπες, έχουν διαφορετικά δομικά χαρακτηριστικά, για αυτόν τον λόγο πρέπει να γίνει σωστή επιλογή υλικών σύμφωνα με τις ανάγκες της κάθε κατασκευής. Η απαίτηση

εξειδίκευσης για σωστή εφαρμογή, η δημιουργία και η επιλογή ενεργειακών αποδοτικών υλικών χαμηλής ενεργειακής αγωγιμότητας, η πρόσθετη προστασία των εν λόγω υλικών δεδομένου ότι θα αποτελούν το περίβλημα της κατασκευής συντελούν στο μεγάλο κόστος της εφαρμογής εξωτερικής θερμομόνωσης. Άξια αναφοράς είναι η δυσκολία εφαρμογής εξωτερικής θερμομόνωσης σε υφιστάμενες κατασκευές με ιδιαίτερη αρχιτεκτονική και περίτεχνη μορφολογία. Τέλος, η εξωτερική θερμομόνωση, δεδομένου ότι αυξάνει το πάχος του φέροντα οργανισμού εγκυμονεί προβλήματα αρχιτεκτονικού περιεχομένου ως μέθοδος ενεργειακής αναβάθμισης (Ruggeri et al., 2020).



Σχήμα 3-4 Εξωτερική θερμομόνωση κατασκευής (Vitouladitis, 2012)

3.1.3.2 Στέγες-Οροφές

Οι στέγες συμβάλλουν στην ενεργειακή επάρκεια του συνόλου της κατασκευής δεδομένου ότι αποτελούν το ανώτατο κατασκευαστικό σύνορο εκατέρωθεν του οποίου γειτνιάζουν οι εσωτερικοί χώροι με το περιβάλλον εξωτερικά της κατασκευής. Λόγω της λειτουργίας τους, η ενεργειακή τους αναβάθμιση διαφοροποιείται από αυτή των δοκών και των υποστυλωμάτων.

Το μέγεθος και το σχήμα της στέγης εξαρτάται από την αρχιτεκτονική. Οι στέγες είναι υπαίτιες για υπέρογκες ενεργειακές απώλειες οι οποίες μεγιστοποιούνται στις περιπτώσεις οροφών με μεγάλη επιφάνεια (Bournas, 2018). Η εγκατάσταση θερμομόνωσης στη στάθμη της στέγης δύναται να είναι αποτελεσματική στην περίπτωση χαμηλών κτιρίων με μεγάλο εμβαδόν (Bournas, 2018). Σε πολυώροφες κατασκευές, κοινώς ψηλά κτίρια, το μεγαλύτερο μέρος του κελύφους καταλαμβάνεται από παράθυρα και εξωτερικούς τοίχους,

καθιστώντας τη συμμετοχή της οροφής στην ενεργειακή επάρκεια του συνόλου της κατασκευής οριακά αμελητέα.

Αξίζει να σημειωθεί ότι σε βάθος είκοσι ετών, το διάστημα 1965-1985, η απαιτούμενη τιμή U για τις στέγες έπεσε κατά μία ολόκληρη μονάδα, με αποτέλεσμα το 1985 η απαιτούμενη τιμή του U για τις στέγες να είναι $0.35 \text{ W/m}^2\text{k}$ ή και λιγότερο (Bournas, 2018). Τέλος, στα περισσότερα κράτη μέλη οι τελευταίες οδηγίες συνιστούν για τις νεόδμητες κατασκευές τιμή U ίση με $0.25 \text{ W/m}^2\text{k}$ (Building Performance Institute BPIE, 2011).

Οι στέγες οπλισμένου σκυροδέματος βρίσκουν ευρεία απήχηση στον ευρωπαϊκό νότο. Πρόκειται για ανθεκτικό υλικό με καλή αντισεισμική λειτουργία, ωστόσο η εφαρμογή του στις στέγες εγκυμονεί προβλήματα. Στα θερμά κλίματα του ευρωπαϊκού νότου οι οροφές οπλισμένου σκυροδέματος αγγίζουν θερμοκρασίες άνω των 50°C κατά τους καλοκαιρινούς μήνες (Buildings Performance Institute, 2011). Επιπλέον, εξαιτίας της μεγάλης θερμοχωρητικότητας του υλικού η χρήση συστημάτων ψύξης δεν σταματά ούτε κατά τη διάρκεια της νύχτας. Προτείνεται η επίστρωση αντηλιακών μεμβρανών στην επιφάνεια της οροφής. Μέσω των αντηλιακών μεμβρανών βελτιώνεται η θερμική συμπεριφορά των στεγών με τον συντελεστή θερμικής διαπερατότητας να μειώνεται κατά $2.5 \text{ W/m}^2\text{k}$ (Bournas, 2018). Η ιδανικότερη εφαρμογή των αντηλιακών μεμβρανών με τα πιο άμεσα αποτελέσματα αφορά την εγκατάστασή τους σε θερμά κλίματα με έντονη ηλιακή ακτινοβολία. Τέλος, οι αντηλιακές μεμβράνες θεωρούνται αποδοτική μέθοδος, χαμηλού κόστους η οποία βελτιώνει την ενεργειακή επάρκεια των οροφών.

3.1.3.3 Κουφώματα-Παράθυρα

Τα κουφώματα συμβάλλουν σε μεγάλο βαθμό στη μεταφορά θερμικής ενέργειας. Δεδομένου ότι τα μεγαλύτερα ποσοστά θερμικής ενέργειας μεταφέρονται μέσω των κουφωμάτων, η διαστασιολόγησή τους δεν γίνεται να εξαρτάται μόνο από τον αρχιτεκτονικό σχεδιασμό της κατασκευής (Bournas, 2018). Η θέα, ο φυσικός φωτισμός και η αισθητική είναι παράγοντες οι οποίοι επηρεάζουν την εγκατάσταση, ωστόσο ο ενεργειακός σχεδιασμός καλείται να συνυπολογίσει την επιρροή των κουφωμάτων.

Παλαιότερα, ειδικά στον ευρωπαϊκό βορρά, παρατηρούνταν εκτενής χρήση τριπλών υαλοπινάκων. Οι τριπλοί υαλοπίνακες πλέον κατέχουν μικρό ποσοστό της παγκόσμιας αγοράς αφού οι κατασκευαστές κατάφεραν να πετύχουν τον ίδιο συντελεστή θερμικής διαπερατότητας με διπλό υαλοπίνακα και πρόσθετη επίστρωση (Gkournelos et al., 2019). Πρόκειται για λύση αντίστοιχής ενεργειακής απόδοσης με χαμηλότερο κόστος παραγωγής

και διάθεσης. Η πρόσθετη επίστρωση συμβάλλει στην προστασία του εσωτερικού αφού αφήνει το φως να περάσει τον υαλοπίνακα και να θερμάνει τους εσωτερικούς χώρους ενώ ταυτόχρονα περιορίζει τις υπεριώδεις ακτινοβολίες (Gkournelos et al., 2019). Η αυστηροποίηση των ενεργειακών κανονισμών ωστόσο εμποδίζει την καθολική εφαρμογή των διπλών υαλοπινάκων. Τα τελευταία χρόνια το ενδιαφέρον παρουσιάζεται για τους τριπλούς υαλοπίνακες με διπλή επίστρωση (Gkournelos et al., 2019). Το συγκεκριμένο σχήμα εμποδίζει κατασταλτικά τη θερμική μεταφορά εκατέρωθεν των κουφωμάτων. Η συγκεκριμένη λύση μπορεί να πληροί τους κανονισμούς ωστόσο έχει αυξημένο κόστος με αποτέλεσμα το μεγαλύτερο μέρος της αγοράς να καταλαμβάνεται από τα διπλά τζάμια (Gkournelos et al., 2019).

Με την πάροδο των χρόνων, οι υαλοπίνακες εξελίσσονται και τα κουφώματα χρησιμοποιούν καινοτόμα υλικά, ωστόσο σημαντικό ρόλο στον περιορισμό της μεταφοράς θερμικής ενέργειας κατέχει η σωστή εγκατάσταση των κουφωμάτων χωρίς κενά και χαραμάδες (Bournas, 2018). Μέσω των χαραμάδων εντείνεται η μεταφορά θερμικής ενέργειας ανεξαρτήτως της καινοτομίας του επιλεγμένου υαλοπίνακα. Επιπλέον όσον αφορά τα προς χρήση υλικά, τα ξύλινα κουφώματα και τα κουφώματα από σύνθετα πλαστικά φαίνεται να έχουν τον χαμηλότερο συντελεστή θερμικής διαπερατότητας (Bournas, 2018). Τέλος, για τη σωστή εγκατάσταση των κουφωμάτων δεν λαμβάνεται υπόψιν το πάχος της τοιχοποιίας.

3.1.4 Παθητικά Ενεργειακά Συστήματα

Τα παθητικά ενεργειακά συστήματα αποτελούν μια διαφορετική προσέγγιση η οποία έχει τον ίδιο στόχο με την εφαρμοσμένη θερμομόνωση στους εξωτερικούς τοίχους, τα κουφώματα, τις δοκούς και τα υποστυλώματα. Ο βιοκλιματικός σχεδιασμός αποσκοπεί στη μείωση των δαπανών από τους χρήστες για τις ανάγκες θέρμανσης και ψύξης των κατασκευών και στον περιορισμό των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Η ειδοποιός διαφορά μεταξύ της θερμομόνωσης και των παθητικών ενεργειακών συστημάτων είναι ότι στον βιοκλιματικό σχεδιασμό των κατασκευών δεν γίνεται χρήση νέων υλικών και καινοτόμων μεθόδων εφαρμογής αλλά αξιοποιούνται οι επικρατούσες κλιματολογικές συνθήκες στην περιοχή της εκάστοτε κατασκευής (Lewis, 1992). Αξιοποιούνται διαφορετικές τεχνικές ανά εποχή και διαφοροποιείται από περιοχή σε περιοχή με σχεδιασμό κατάλληλο για την πλήρη εκμετάλλευση των περιβαλλοντικών πηγών.

Ο στόχος των παθητικών ενεργειακών συστημάτων είναι η αντικατάσταση των μονάδων θέρμανσης και ψύξης. Τα παθητικά ενεργειακά συστήματα προμηθεύονται την

ενέργεια από το περιβάλλον και τη διοχετεύουν στους εσωτερικούς χώρους. Επιπροσθέτως, τα δομικά στοιχεία του κτιρίου μετατρέπονται σε εργαλεία για την ικανοποίηση των αναγκών των χρηστών και την έμμεση εξοικονόμηση ενέργειας (Lewis, 1992). Αξίζει να σημειωθεί ότι μέχρι σήμερα τα παθητικά ενεργειακά συστήματα δεν είναι πλήρως αυτόνομα και θεωρούνται υποβοηθούμενα από κάποιου είδους μηχανική υποστήριξη και για αυτόν τον λόγο εντοπίζονται στην βιβλιογραφία ως υβριδικά (Bournas, 2018). Μπορεί τα παθητικά ενεργειακά συστήματα να έχουν δυναμική και με την πάροδο του χρόνου να καταλαμβάνουν όλο και μεγαλύτερο μερίδιο της αγοράς, αφού εγκαθίστανται σχεδόν σε όλες τις νέες κατασκευές, ωστόσο η θεώρηση πλήρους αντικατάστασης των μονάδων θέρμανσης και ψύξης θεωρείται προς το παρόν ουτοπική. Η πιο συνήθης εγκατάσταση παθητικών ενεργειακών συστημάτων είναι τα ηλιακά συστήματα τα οποία θεωρούνται ιδιαίτερα διαδεδομένα και χρησιμοποιούνται για να καλύψουν ανάγκες τόσο θέρμανσης όσο και ψύξης. Τα ηλιακά συστήματα εγκαθίστανται σε σημεία των κατασκευών με νότιο προσανατολισμό, δύναται να τοποθετηθούν και στην δυτική και ανατολική πλευρά με όσο το δυνατόν μικρότερη απόκλιση από τον άξονα του καθαρού Νότου (Lewis, 1992).

Η ενεργειακή επάρκεια των κατασκευών σχετίζεται με τα διοχετευόμενα και με τα εκλυόμενα ποσά ενέργειας προς την κάλυψη των αναγκών των χρηστών. Δαπανούνται υπέρογκα ποσά ενεργειακών αποθεμάτων για την επίτευξη της άνετης διαβίωσης των χρηστών. Ο βιοκλιματικός σχεδιασμός των κατασκευών αντιλαμβάνεται τις απαιτήσεις και για αυτόν τον λόγο είναι άρρηκτα συνδεδεμένος με τη θερμική λειτουργία της κατασκευής στην οποία εφαρμόζεται. Ο κατάλληλος βιοκλιματικός σχεδιασμός δεν ακολουθεί κανόνες, καλείται να λάβει υπόψιν την παράμετρο των επικρατουσών περιβαλλοντικών συνθηκών, όπως ο βαθμός ηλιοφάνειας, οι μέσες θερμοκρασίες, τα ποσοστά υγρασίας κλπ. (Lewis, 1992). Επιπροσθέτως, αφού λάβει υπόψιν την τοποθεσία της κατασκευής, η οποία επηρεάζει και την αποδοτικότητά του, αξιοποιεί τα δομικά στοιχεία κάνοντας χρήση της εν δυνάμει ενεργειακής απόδοσης που μπορούν να προσφέρουν στο σύνολο της κατασκευής. Συνοψίζοντας, σχεδιάζοντας ή αναβαθμίζοντας μια κατασκευή σύμφωνα με τα πρότυπα του βιοκλιματικού σχεδιασμού, λαμβάνεται υπόψιν το ενεργειακό προφίλ του εκάστοτε κτιρίου και οι στόχοι του ενεργειακού σχεδιασμού.

Πολλοί θεωρούν ότι ο βιοκλιματικός σχεδιασμός αφορά περισσότερο το περιβάλλον και την οικολογία παρά την εξοικονόμηση της ενέργειας. Ωστόσο, τα οφέλη του έχουν αποκτήσει ευρεία αναγνώριση ανά την Ευρώπη, αφού πλέον αποτελεί παράμετρο σχεδιασμού νέων κατασκευών. Το βασικότερο κίνητρο του ενεργειακού σχεδιασμού αφορά τον περιορισμό των χρηματικών δαπανών, τα κόστη ενέργειας μειώνονται δραστικά αφού

δημιουργούνται συνθήκες θερμικής άνεσης χωρίς την χρήση μονάδων θέρμανσης και ψύξης. Τέλος, ο βιοκλιματικός σχεδιασμός δεν δημιουργεί προβλήματα αρχιτεκτονικής, δεν εμποδίζει τις παράξενες γεωμετρίες αλλά αποσκοπεί στην αξιολόγηση της κάθε κατασκευής ξεχωριστά και στην βελτίωση της ενεργειακής της απόδοσης.

3.1.4.1 Παθητικά Συστήματα Θέρμανσης

Η λειτουργία των παθητικών ηλιακών συστημάτων θέρμανσης έγκειται στη συλλογή ηλιακής ενέργειας και στην αποθήκευσή της αποσκοπώντας στη δημιουργία συνθηκών θερμικής άνεσης. Η τοποθέτηση των ηλιακών συστημάτων θέρμανσης γίνεται με νότιο προσανατολισμό έτσι ώστε να αξιοποιηθούν τα μεγαλύτερα δυνατά ποσά προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας (Lewis, 1992). Η ιδανικότερη εφαρμογή των παθητικών συστημάτων αφορά κατασκευές οι οποίες είναι ήδη θερμομονωμένες. Μέσω των ηλιακών συστημάτων αυξάνεται η θερμοχωρητικότητα των δομικών στοιχείων. Με τον όρο θερμοχωρητικότητα περιγράφεται η ικανότητα των δομικών στοιχείων να αποθηκεύσουν τη θερμότητα από τη προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία και να την αποδώσουν με χρονική υστέρηση στους εσωτερικούς χώρους δημιουργώντας συνθήκες θερμικής άνεσης για τους χρήστες (Lewis, 1992). Αξίζει να σημειωθεί ότι κατά τους καλοκαιρινούς μήνες προτείνεται η προστασία των ηλιακών συστημάτων από την ηλιακή ακτινοβολία έτσι ώστε να διατηρηθεί η θερμοκρασία του εσωτερικού σε χαμηλά επίπεδα. Ακολουθεί σύντομη αναφορά σε κάποια από τα πιο διαδεδομένα παθητικά συστήματα θέρμανσης.

- **Τοίχοι Θερμικής Μάζας**

Στη συγκεκριμένη κατηγορία εντάσσεται η εσωτερική τοιχοποιία η οποία αποθηκεύει ποσά θερμικής ενέργειας και τα αποδίδει στους εσωτερικούς χώρους. Οι εν λόγω τοίχοι είναι κατασκευασμένοι από υλικά υψηλής θερμικής μάζας όπως το σκυρόδεμα και τα τούβλα αυξάνοντας τη θερμοχωρητικότητα της τοιχοποιίας (Lewis, 1992). Μια ακόμη υποκατηγορία τοίχων θερμικής μάζας είναι οι τοίχοι Trombe-Michel. Βασικό τους χαρακτηριστικό είναι οι θυρίδες τις οποίες φέρουν στο πάνω μέρος τους επιτρέποντας τη συνεχή κυκλοφορία αέρα από και προς τους εσωτερικούς χώρους (Lewis, 1992). Συναντώνται στον βορρά της Ευρώπης συνήθως σε μαύρο χρώμα για αύξηση της αγωγιμότητας.

- **Θερμοσιφωνικά Πάνελ**

Η εγκατάσταση θερμοσιφωνικών πάνελ πραγματοποιείται στις στέγες των κατασκευών και ακολουθούν τη λειτουργία του θερμοσιφωνικού τοίχου. Πρόκειται για συστήματα συλλογής της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας τα οποία τοποθετούνται

πάνω από μεταλλικές πλάκες για βελτίωση της θερμικής αγωγιμότητας του συστήματος (Lewis, 1992). Τέλος διαθέτουν θυρίδες οι οποίες επιτρέπουν τη διέλευση θερμού αέρα από και προς τους εσωτερικούς χώρους.



Σχήμα 3-5 Θερμοσιφωνικά πάνελ σε στέγη κατασκευής
(<https://hellasnrg.gr/passivesolar.html>)

- **Συστήματα Αερισμού και Θέρμανσης**

Τα συστήματα αερισμού και θέρμανσης εντάσσονται στην οικογένεια των παθητικών συστημάτων. Η εγκατάστασή τους γίνεται επί του κελύφους της κατασκευής και λειτουργούν καθόλη τη διάρκεια του έτους. Για αυτόν τον λόγο η σωστή τοποθέτηση των εν λόγω συστημάτων εξασφαλίζεται από τις κατάλληλες συνθήκες σκίασης και αερισμού (Bournas, 2018).

3.1.4.2 Παθητικά Συστήματα Ψύξης

Μέσω των παθητικών συστημάτων θέρμανσης και ψύξης αξιοποιούνται οι ισχύουσες περιβαλλοντικές συνθήκες στο περίβλημα της κατασκευής. Η λειτουργία των παθητικών συστημάτων δροσισμού αφορά την προσπάθεια περιορισμού των θερμικών κερδών του περιβλήματος της κατασκευής (Lewis, 1992). Επιπλέον τα εν λόγω συστήματα λειτουργούν ώστε η αποθηκευμένη θερμική ενέργεια της εξωτερικής τοιχοποιίας να μην διοχετευτεί στο εσωτερικό της κατασκευής.

Δεδομένου ότι τα παθητικά συστήματα είναι τοποθετημένα καθόλη τη διάρκεια του χρόνου, συνοδεύονται από ηλιοπροστασία και σκίαση. Η ηλιοπροστασία εφαρμόζεται με τη μορφή καλυμμάτων τα οποία εμποδίζουν την αποθήκευση υπέρογκων ποσών θερμότητας με αποτέλεσμα να μην διοχετεύονται στο εσωτερικό της κατασκευής (Lewis, 1992). Όσον αφορά τη σκίαση, στην αγορά υπάρχουν πληθώρα λύσεων τόσο μόνιμης όσο και μερικής σκίασης με την χρήση κινούμενων περσίδων. Επιπλέον, τα τελευταία χρόνια παρατηρείται η εφαρμογή επιχρισμάτων στις στέγες με την ιδιότητα ανάκλασης της ηλιακής ακτινοβολίας με αποτέλεσμα οι εσωτερικοί χώροι να μην κινδυνεύουν με αύξηση της θερμοκρασίας (Lewis,

1992). Τέλος, τα τελευταία έτη ευρεία απήχηση αποκτά η δημιουργία υποσκαφών ως μέθοδος φυσικού δροσισμού. Πρακτικά γίνεται λόγος για σύνδεση του κελύφους με το υπέδαφος. Η συγκεκριμένη προσέγγιση δεν είναι μέθοδος αναβάθμισης και αφορά νεόδμητες κατασκευές.



Σχήμα 3-6 Περσίδες μερικής σκίασης (<http://www.kamxis.gr>)

Η χρήση παθητικών συστημάτων ψύξης και θέρμανσης εντάσσεται στο γενικό πλαίσιο του βιοκλιματικού σχεδιασμού των κατασκευών και αποσκοπεί στην σταθεροποίηση των θερμοκρασιών μεταξύ των εσωτερικών χώρων και του εξωτερικού περιβάλλοντος. Όσο σταθερότερη η θερμοκρασία εκατέρωθεν τόσο μικρότερη και η μεταφορά θερμικής ενέργειας.

3.2 Μέθοδοι Ενεργειακής Αναβάθμισης Κατασκευών

Όπως επισημάνθηκε παραπάνω υπάρχουν ποικίλες προσεγγίσεις βελτίωσης της ενεργειακής επάρκειας των υφιστάμενων κατασκευών. Το κτιριακό απόθεμα πρέπει να αναβαθμιστεί, δεδομένου ότι η πλειονότητα των υπαρχουσών κατασκευών δεν υπακούει σε αυστηρούς ενεργειακούς κανονισμούς. Ενδεικτικά αξίζει να αναφερθεί ότι το 45,6% των οικιστικών κατασκευών στην Ελλάδα χαρακτηρίζεται από απουσία θερμομονωτικού υλικού στο κέλυφος (Γκουρνέλος et al., 2019). Το γεγονός αυτό επιδεικνύει την τάση της θερμοκρασίας του εσωτερικού προσπαθεί να φτάσει την θερμοκρασία του εξωτερικού περιβάλλοντος της κατασκευής. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στη συνεχή ροή θερμικής ενέργειας μεταξύ σημείων διαφορετικής θερμοκρασίας.

Δεδομένου ότι η αναβάθμιση των κατασκευών απευθύνεται στην πλειονότητα του κτιριακού αποθέματος το οποίο χαρακτηρίζεται από πλήρη απουσία μονωτικού υλικού καλούμαστε να εντοπίσουμε τη βέλτιστη μέθοδο αναβάθμισης της ενεργειακής επάρκειας των κτιρίων. Η καλύτερη λύση φαίνεται να είναι η εφαρμογή εξωτερικής θερμομόνωσης στο κέλυφος της κατασκευής. Κατά αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται η βελτίωση του κελύφους

μέσω της εφαρμογής μονωτικού υλικού στους εξωτερικούς τοίχους και την πρόσθετη τοποθέτηση στρώσης επιχρίσματος (Bournas, 2018).

Η βελτίωση της ενεργειακής επάρκειας της κατασκευής επέρχεται μέσω της εφαρμογής μονωτικού υλικού στο περίβλημα. Γίνεται χρήση υλικών και μονωτικών σχημάτων τα οποία χαρακτηρίζονται από μεγάλη θερμική αντίσταση, πετυχαίνοντας μικρή ροή θερμότητας μεταξύ των εξωτερικών χώρων και των χώρων διαβίωσης. Τα μονωτικά υλικά τοποθετούνται σε επιφάνειες οι οποίες αποτελούν κατασκευαστικά σύνορα μεταξύ των εσωτερικών χώρων και του εξωτερικού περιβάλλοντος και τοποθετούνται τόσο στην εσωτερική όσο και στην εξωτερική του επιφάνεια επιτυγχάνοντας την ελαχιστοποίηση της αμφίδρομης ροής θερμότητας (Bournas, 2018). Χάριν της αύξησης των ενεργειακών απαιτήσεων και της επιτακτικής ανάγκης ελαχιστοποίησης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, τα μονωτικά υλικά εξελίσσονται, βελτιώνονται και δοκιμάζονται στις απαιτήσεις των χρηστών. Λόγω της πληθώρας των θερμομονωτικών σχημάτων, έχει δημιουργηθεί συγκεκριμένο πλατό αξιολόγησης της απόδοσής τους. Η εφαρμογή τους σε χώρους εργασίας και διαβίωσης των χρηστών καθιστά απαραίτητη την αξιολόγηση της ασφάλειάς τους σε περιπτώσεις εκδήλωσης τυχηματικών φαινομένων, όπως οι πυρκαγιές. Επιπλέον, προσδιορίζεται ο περιβαλλοντικός τους αντίκτυπος κατά τη διάρκεια της παραγωγής και της εφαρμογής τους στο υπάρχον κτιριακό απόθεμα. Δεν λησμονείται, η υγειονομική τους απόκριση τόσο για τους πληθυσμούς στο εσωτερικό της κατασκευής όσο και για τα συνεργεία εγκατάστασης. Τέλος, ένας ακόμη σημαντικός παράγοντας για την αξιολόγηση των μονωτικών υλικών είναι το κόστος. Η εφαρμογή θερμομόνωσης στο κέλυφος υπάρχουσας κατασκευής έχει μεγάλο κόστος το οποίο δύναται να μειωθεί με την ανάπτυξη καινοτόμων υλικών. Η βελτίωση της ενεργειακής επάρκειας του κελύφους της κατασκευής θεωρείται επένδυση με βραχυπρόθεσμη αποπληρωμή, για αυτό και η Ευρωπαϊκή Ένωση θεσμοθετεί προγράμματα χρηματοδότησης τέτοιων ενεργειών με έως και μηδενικά επιτόκια (Pohoryles et al., 2020).

Ακολουθεί ανασκόπηση τόσο των υπάρχοντων μονωτικών σχημάτων όσο και καινοτόμων τεχνικών και έξυπνων υλικών τα οποία δύναται να έχουν ευρεία εφαρμογή τα προσεχή έτη. Αξιολογείται η λειτουργία των υλικών, η αποδοτικότητά τους και το κατά πόσο δύναται να εφαρμοστούν στις υφιστάμενες κατασκευές.

3.2.1 Συνοπτική Περιγραφή Μονωτικών Υλικών

3.2.1.1 Μονωτικά Υλικά Ευρείας Χρήσης

1. Πετροβάμβακας

Ο ορυκτοβάμβακας συναντάται στις κατασκευές με τη μορφή στρωμάτων και υφασμάτων ενώ δύναται να εφαρμοστεί και ως συνδετικό υλικό (Bournas, 2018). Πρόκειται για υλικό με καλές θερμικές και ηχομονωτικές ιδιότητες. Ο μαλακός ορυκτοβάμβακας εφαρμόζεται στο κέλυφος της κατασκευής και λόγω της αφρώδους σύστασής του μπορεί να εφαρμοστεί σε κελύφη με περίτεχνες γεωμετρίες. Τα σκληρά στρώματα ορυκτοβάμβακα εφαρμόζονται σε οροφές και δάπεδα, αφού η πυκνότητα του υλικού τα καθιστά ικανά για την παραλαβή φορτίων (Jelle, 2011). Επιπλέον πραγματοποιείται εμποτισμός των ινών με ρητίνη για πρόσθετη απομείωση του συντελεστή θερμικής διαπερατότητας. Δεδομένου ότι οι ίνες θεωρούνται υδρόφοβες, τα υφάσματα ορυκτοβάμβακα παραδίδονται με εξωτερικό περίβλημα το οποίο προστατεύει το υλικό από την υγρασία και την επαφή με νερό (Bournas, 2018). Άξιο σημασίας είναι ότι ο ορυκτοβάμβακας δύναται να τροποποιηθεί στο εργοστάσιο σύμφωνα με τις απαιτήσεις της εκάστοτε κατασκευής. Τέλος, πρόκειται για υλικό με χαμηλό κόστος και μικρό περιβαλλοντικό αποτύπωμα κατά τις διαδικασίες παραγωγής (Bournas, 2018).



Σχήμα 3-7 Θερμομονωτικό στρώμα ορυκτοβάμβακα (<https://www.encon.co.uk>)

2. Διογκωμένη Πολυστερίνη (EPS)

Η διογκωμένη πολυστερίνη ή φελιζόλ αποτελείται από μικρά σφαιρίδια πολυστερενίου και αργό πετρέλαιο (Bournas, 2018). Για τη διαδικασία παραγωγής απαιτείται παρουσία διογκωτικού αερίου. Ως προωθητικός παράγοντας στη διαδικασία παραγωγής της πολυστερίνης χρησιμοποιείται το πεντάνιο, το οποίο δίνει αφρώδη σύσταση στο υλικό και μέσω της διόγκωσης μετατρέπει τα μικρά σφαιρίδια σε σφαίρες μεγαλύτερης πυκνότητας (Jelle, 2011). Τα σφαιρίδια ενώνονται μεταξύ τους κρίνοντας μη αναγκαία την χρήση πρόσθετου συνδετικού υλικού. Η τελική μορφή της διογκωμένης πολυστερίνης είναι σε σκληρά στρώματα στο εσωτερικό των οποίων περικλείονται τα σφαιρίδια. Η θερμική διαπερατότητα του υλικού εξαρτάται από την υγρασία και τις επικρατούσες θερμοκρασίες

στις επιφάνειες εφαρμογής (Bournas, 2018). Το υλικό δύναται να τροποποιηθεί στο εργοτάξιο διευκολύνοντας τις διαδικασίες εφαρμογής. Τέλος πρόκειται για υλικό με περιορισμένο κόστος αγοράς ωστόσο οι διαδικασίες παραγωγής του έχουν ανυπολόγιστες περιβαλλοντικές επιπτώσεις (Bournas, 2018).



Σχήμα 3-8 Στρώμα διογκωμένης πολυστερίνης (<https://ewistore.co.uk>)

3. Εξηλασμένη Πολυστερίνη (XPS)

Η παραγωγή της εξηλασμένης πολυστερίνης βασίζεται στην εξώθηση και ως πρώτη ύλη χρησιμοποιείται το πολυμερισμένο στυρένιο το οποίο παράγεται μέσω του αργού πετρελαίου. Μέσω της διαστολής της μάζας το υλικό αποκτά μια κλειστή δομή χάριν στην οποία επιτυγχάνεται χαμηλή θερμική αγωγιμότητα και ανθεκτικότητα του θερμομονωτικού σχήματος (Bournas, 2018). Στην αγορά συναντάται με τη μορφή συμπαγών στρωμάτων τα οποία αποτελούν ένα ανθεκτικό περίβλημα. Το κυριότερο πλεονέκτημα της XPS είναι η κλειστή κυψελοειδής δομή. Αντίθετα με τις ανοικτές δομές οι οποίες αποτελούνται από εύκαμπτο αφρό με χαμηλή πυκνότητα πυρήνα (Jelle, 2011). Λόγω των κλειστών δομών η μεταφορά θερμικής ενέργειας περιορίζεται δραστικά. Τέλος, πρόκειται για υλικό το οποίο δύναται να εφαρμοστεί τόσο σε νέες όσο και σε υπάρχουσες κατασκευές και έχει χαμηλό κόστος. Βέβαια, οι διαδικασίες παραγωγής της έχουν σοβαρές περιβαλλοντικές επιπτώσεις οι οποίες πρέπει να αντιμετωπιστούν (Bournas, 2018).



Σχήμα 3-9 Στρώμα εξηλασμένης πολυστερίνης
(<https://www.theunderfloorheatingstore.com>)

4. Πολυσακχαρίτης-Κυτταρίνη

Η κυτταρίνη παράγεται από νερό, ίνες ξύλου και πρόσθετα ανόργανα υλικά. Συναντάται τόσο ως υλικό πλήρωσης διαφόρων κοιλοτήτων αλλά και με την μορφή συμπαγών στρωμάτων (Bournas, 2018). Για τη διαδικασία παραγωγής γίνεται χρήση διαλύτη ο οποίος αποτελείται από υδροξείδιο του νατρίου, θειούχες προσμίξεις και νερό (Hurtado et al., 2015). Ακολουθείται διεργασία ξήρανσης μέσω ψύξης σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες. Πρόκειται για θερμομονωτικό σχήμα με χαμηλό κόστος και αμελητέες περιβαλλοντικές επιπτώσεις συγκριτικά με τα υπόλοιπα θερμομονωτικά υλικά ευρείας χρήσης, ωστόσο πρόκειται για υλικό το οποίο χρήζει επίπεδο εξειδίκευσης κατά την εφαρμογή, χαρακτηριστικό το οποίο τα περισσότερα συνεργεία δεν διαθέτουν (Bournas, 2018). Επιπροσθέτως η διάταξη φαίνεται να είναι ευαίσθητη σε εξωγενείς παράγοντες με κίνδυνο απώλειας των θερμικών ιδιοτήτων του υλικού (Hurtado et al., 2015). Τέλος, λόγω της υψηλής της αναφλεξιμότητας, το μέλλον της κυτταρίνης ως θερμομονωτικό υλικό κρίνεται δυσοίωνο (Bournas, 2018).



Σχήμα 3-10 Πήκτη κυτταρίνης (<https://ritewayinsulationcompany.com>)

5. Πολυουρεθάνη (PUR)

Οι πολυουρεθάνες ανήκουν στην ευρύτερη οικογένεια των πλαστικών και σχηματίζονται μέσω χημικής αντίδρασης μεταξύ ισοκυανικών ενώσεων και πολυολών (Bournas, 2018). Στην αγορά κυκλοφορούν θερμοσκληρυντικές πολυουρεθάνες οι οποίες έχουν την ιδιότητα να μην λιώνουν καθώς θερμαίνονται γεγονός το οποίο τους προσδίδει ευνοϊκές θερμικές ιδιότητες (Jelle, 2011). Ανάλογα με τον διογκωτικό παράγοντα ο οποίος θα χρησιμοποιηθεί κατά τις διαδικασίες παραγωγής συναντάμε πιο εύκαμπτα και πιο δύσκαμπτα θερμομονωτικά στρώματα. Το μεγαλύτερο μερίδιο της αγοράς ωστόσο

καταλαμβάνεται από πολυουρεθάνες με τη μορφή αφρού (Bournas, 2018). Μολονότι πρόκειται για θερμομονωτικό υλικό με πολύ χαμηλό συντελεστή θερμικής διαπερατότητας, παρατηρούνται καρκινογόνες εκπομπές κατά τις διαδικασίες παραγωγής. Τέλος οι πολυουρεθάνες παρουσιάζουν έντονη αναφλεξιμότητα. Τα παραπάνω χαρακτηριστικά οδηγούν στην ανάγκη δημιουργίας καινοτόμων υλικών φιλικότερων προς τους χρήστες.

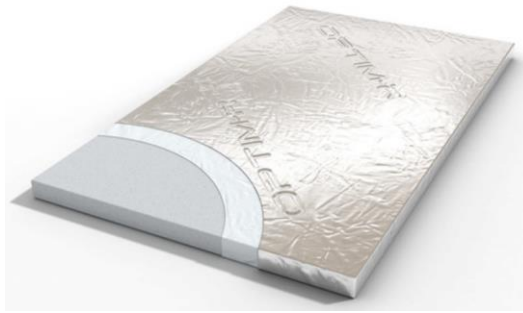


Σχήμα 3-11 Αφρός πολυουρεθάνης (<https://www.indiamart.com>)

3.2.1.2 Καινοτόμα Μονωτικά Υλικά

1. Μονωτικά Πάnel Κενού Αέρος (VIPs)

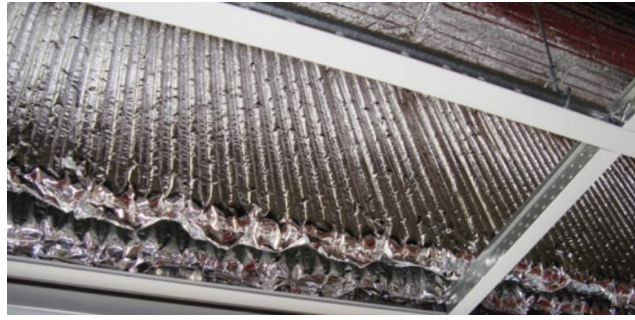
Πρόκειται για φατνώματα τα οποία χαρακτηρίζονται από πλήρη απουσία αέρα στο εσωτερικό τους. Λόγω της απουσίας αέρα, η μεταφορά θερμικής ενέργειας κρίνεται αδύνατη προσδίδοντας στο υλικό καλές θερμικές ιδιότητες (Baetens, 2010). Το κενό αέρος στο εσωτερικό των φατνωμάτων καθιστά τη διάταξη επιρρεπή στην προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία. Πρόκειται για υλικό το οποίο κάνει χρήση ολιγάριθμων και ελαφρών υλικών χωρίς να αυξάνει την διάσταση του πάχους στις επιφάνειες εφαρμογής (Bournas, 2018). Επιπλέον δεδομένου ότι η εφαρμογή του υλικού δεν επηρεάζει την υπάρχουσα γεωμετρία θεωρείται υλικό κατάλληλο για αναβάθμιση υφιστάμενων κατασκευών. Αξίζει να σημειωθεί ότι η γήρανση του υλικού ενδέχεται να μειώσει την ενεργειακή του απόδοση. Επιπροσθέτως, λόγω της πλήρους ανοικτής δομής πόρων στο εσωτερικό του φατνώματος οποιαδήποτε τροποποίηση εκτός της γραμμής παραγωγής θεωρείται απαγορευτική (Bournas, 2018). Η δομή στο εσωτερικό των φατνωμάτων εξαρτάται από το μέγεθος των πόρων σύμφωνα με το φαινόμενο Knudsen (Baetens, 2010). Η διάταξη ήδη κρίνεται ενεργειακά αποτελεσματική, με βραχυπρόθεσμο διάστημα απόσβεσης της αρχικής επένδυσης και φιλικότητα τόσο προς το περιβάλλον όσο και προς τους χρήστες. Μολονότι το υλικό θεωρείται ιδιαίτερα καινοτόμο, η διάταξη θεωρείται ευαίσθητη στη διήθηση υδρατμών και στην ηλιακή ακτινοβολία, για αυτό και επιδέχεται διορθώσεων, με την προσθήκη ανθεκτικού περιβλήματος και εκ νέου μείωση του μεγέθους των πόρων (Baetens, 2010).



Σχήμα 3-12 Μονωτικό πάνελ κενού αέρος (<https://www.kingspan.com>)

2. Πάνελ Ευγενών Αερίων (GFPs)

Τα φατνώματα περιέχουν μεμβράνες στο εσωτερικό των οποίων περικλείεται κάποιο ευγενές αέριο (Gustavsen et al., 2010). Ο χαμηλός συντελεστής θερμικής διαπερατότητας του υλικού είναι άρρηκτα συνδεδεμένος με την παρουσία ευγενών αερίων στο εσωτερικό των μεμβρανών. Η επιλογή των ευγενών αερίων έγινε χάριν της χαμηλής τους αναφλεξιμότητας, του ανεπαίσθητου περιβαλλοντικού αποτυπώματος και του γεγονότος ότι τα αδρανή αέρια είναι μονοατομικά, άρα διαθέτουν χαμηλότερη θερμική αγωγιμότητα από τα πολυατομικά του ίδιου μοριακού βάρους (Gustavsen et al., 2010). Στο εσωτερικό των φατνωμάτων εντοπίζεται κλειστή κυψελοειδής δομή συγκράτησης των μεμβρανών με τις εξαγωνικές μεμβράνες να θεωρούνται η βέλτιστη γεωμετρία (Gustavsen et al., 2010). Πρόκειται για υλικό με χαμηλό συντελεστή θερμικής διαπερατότητα, ωστόσο η διάταξη θεωρείται ιδιαίτερα ευαίσθητη σε εξωγενείς παράγοντες και στην παραλαβή φορτίων του κελύφους (Bournas, 2018). Αρχικά, η απουσία ποσότητας αιθυλενίου στο εσωτερικό της διάταξης καθιστά το μονωτικό σχήμα ευαίσθητο στην υγρασία (Gustavsen et al., 2010). Επιπροσθέτως μέσω παρατήρησης, υπολογίζεται απώλεια 0.1% τον χρόνο, δηλαδή 2% σε διάστημα 20 ετών γεγονός το οποίο δημιουργεί ερωτηματικά για τη μακροπρόθεσμη εφαρμογή των GFPs (Gustavsen et al., 2010). Κλείνοντας, η διάταξη έχει αποτελεσματικές θερμικές ιδιότητες ωστόσο παραμένει ιδιαίτερα ευαίσθητη για εφαρμογή στο κέλυφος της κατασκευής. Εξετάζεται ο συνδυασμός της μονωτικής διάταξης με ανθεκτικά δομικά υλικά (Bournas, 2018).



Σχήμα 3-13 Πάνελ ευγενών αερίων (<https://www.buildinggreen.com>)

3. Αεροπηκτώματα- Διοξειδία του Πυριτίου

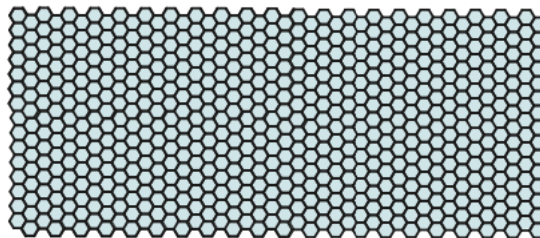
Τα αεροπηκτώματα αποτελούν μια ιδιαίτερα καινοτόμα θερμομονωτική λύση. Τα αερογελή έχουν συγκεκριμένη πυκνότητα και μικρό δείκτη διάθλασης, περιορίζοντας τις θερμικές μεταφορές εξαιτίας της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας. Οι θερμικές ιδιότητες του υλικού οφείλονται στην περίτεχνη χημική του σύσταση (Bournas, 2018). Για τη δημιουργία των αερογελών ακολουθούνται διεργασίες sol-gel κατά τις οποίες υγρά νανοσωματίδια διαλύονται μέσω υγρού διαλύτη. Δημιουργείται ένα συμπαγές δίκτυο σωματιδίων εντός του υγρού και μετά τη διαδικασία της ξήρανσης εκ νέου θέρμανση φέρνει το υγρό σε υπερκρίσιμη κατάσταση, όπου δεν υφίσταται διαφοροποίηση μεταξύ της αέριας και της υγρής του κατάστασης (Jelle et al., 2010). Λόγω των μικρών τιμών πυκνότητας του υλικού, η διάταξη έχει μικρή εφελκυστική αντοχή γεγονός το οποίο γεννά ερωτηματικά για την εφαρμογή της μόνωσης στο κέλυφος της κατασκευής. Για την αντιμετώπιση του παραπάνω προβλήματος εξετάζεται η ενσωμάτωση των αεροπηκτωμάτων σε πολυστρωματικά ινώδη υφάσματα (Jelle et al., 2010). Αναγκαία κρίνεται επίσης η τοποθέτηση ανθεκτικού περιβλήματος λόγω της υδρόφοβης σύστασης του εσωτερικού. Η παρουσία μεθυλικού κατιόντος καθιστά τη σύσταση υδρόφοβη και ταυτόχρονα της προσδίδει μηδενική αναφλεξιμότητα (Jelle et al., 2010). Η παρουσία πληθώρας χημικών ενώσεων δεν καθιστά το υλικό μη ασφαλές αφού φαίνεται ότι οι ενώσεις δεν συμμετέχουν σε εξωγενείς αντιδράσεις. Τέλος πρόκειται για αρκετά υποσχόμενο μονωτικό υλικό το οποίο δύναται να συνδυαστεί με ανθεκτικά δομικά υλικά και να τοποθετηθεί στο κέλυφος, ανοίγοντας τον δρόμο για την ολιστική αντιμετώπιση των προβλημάτων των κατασκευών (Bournas, 2018).



Σχήμα 3-14 Ύφασμα αεροπηκτωμάτων (<https://www.intdit.com>)

4. Υλικά Νανομόνωσης

Για τα υλικά νανομόνωσης αξιοποιείται η νανοτεχνολογία για τη δημιουργία καινοτόμου μονωτικού υλικού με καλές θερμικές ιδιότητες. Η σύσταση του εσωτερικού κυμαίνεται σε διαστάσεις μεταξύ 0,1 nm και 100 nm (Jelle et al., 2010). Μέσω της νανοτεχνολογίας, η μείωση του μεγέθους των πόρων κάτω από ένα επίπεδο καθιστά την διαδρομή των μορίων του αέρα να είναι μεγαλύτερης διαμέτρου από το μέγεθος των πόρων (Jelle et al., 2010). Κατά αυτόν τον τρόπο, η θερμική μεταφορά μέσω αερίων εξαλείφεται και η θερμική αγωγιμότητα του υλικού μειώνεται δραστικά. Αξίζει να σημειωθεί ότι στο εσωτερικό της διάταξης μπορεί να εντοπιστεί ευγενές αέριο ή αέρας. Επιπλέον, δεν απαιτείται η τοποθέτηση σκληρού περιβλήματος καθιστώντας δυνατή την επεξεργασία εκτός της γραμμής παραγωγής (Bournas, 2018). Εν κατακλείδι πρόκειται για καινοτόμο μονωτικό υλικό, με αποτελεσματικές θερμικές ιδιότητες, φιλικό προς τους χρήστες, ωστόσο με ιδιαίτερα αυξημένο κόστος. Δεδομένου ότι βρίσκεται ακόμη σε πειραματικό στάδιο, με τις βελτιώσεις τις οποίες επιδέχεται ενδέχεται να είναι το μονωτικό υλικό του μέλλοντος (Bournas, 2018).



Σχήμα 3-15 Δομή υλικού νανομόνωσης (Jelle et al., 2010)

3.2.2 Τεχνικές Εφαρμογής Θερμομόνωσης

1. Πετροβάμβακας

Οι πλάκες πετροβάμβακα εφαρμόζονται εξωτερικά στην τοιχοποιία της κατασκευής και χρησιμοποιούνται ως μόνωση τόσο σε νεόδμητες κατασκευές όσο και σε ήδη υπάρχουσες με ανεπαρκή θερμομόνωση. Επιπροσθέτως, λόγω της εύκολης εφαρμογής τους δύναται να εφαρμοστούν ως πρόσθετη μόνωση. Οι ιδιότητες των στρωμάτων πετροβάμβακα πετυχαίνουν πυροπροστασία, διαθέτουν καλές ηχοακουστικές ιδιότητες και εξασφαλίζουν χαμηλή θερμική διαπερατότητα (Knauf, 2016). Πρόκειται για ένα σύνθετο μονωτικό σχήμα, το οποίο απαιτεί την πρόσθετη εφαρμογή επιχρίσματος. Η αποτελεσματικότητα του μονωτικού σχήματος δεν εξαρτάται μόνο από τις ιδιότητες του υλικού, αλλά απαιτεί και τη σωστή εφαρμογή (Knauf, 2016). Η διαδικασία που ακολουθείται περιγράφεται παρακάτω.

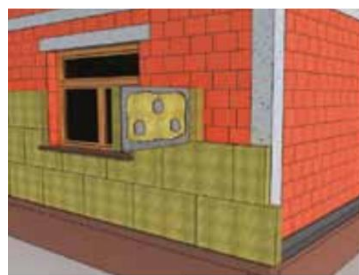
Η βέλτιστη εφαρμογή της μόνωσης, πραγματοποιείται στις εξωτερικές επιφάνειες του κελύφους και εφαρμόζεται σε σκληρές, καθαρές και στεγνές επιφάνειες. Εάν η μόνωση εφαρμόζεται σε παλιά κατασκευή, αφαιρείται το υπάρχον κονίαμα και επαλείφεται απλός τυπικός σοβάς στις επιφάνειες (Knauf, 2016). Οι πληρώσεις στις παλαιές κατασκευές από μπετόν χρίζουν καθαρισμού με πιεστικό νερού. Τα βήματα εφαρμογής είναι τα εξής :

- Η τοποθέτηση των πλακών ξεκινά από το κάτω μέρος της τοιχοποιίας όπου και αγκυρώνεται με το πολύ τρία αγκύρια ανά τρέχον μέτρο (Knauf, 2016). Με αυτόν τον τρόπο, το κάτω άκρο της πλάκας προστατεύεται και εξασφαλίζεται καλή εφαρμογή στην πρόσοψη της κατασκευής.
- Η συνδεσιμότητα των πλακών εξασφαλίζεται μέσω της χρήσης ειδικής κόλλας η οποία εφαρμόζεται περιμετρικά στην πλάκα και σε τυχαία σημεία στην επιφάνεια της πλήρωσης. Η κόλλα πρέπει να έχει εφαρμοστεί τουλάχιστον στο 40% στη πλάκα και δεν πρέπει να εισχωρεί στις ενώσεις μεταξύ των πλακών (Knauf, 2016).
- Η εγκατάσταση των πλακών στον τοίχο γίνεται από το κάτω μέρος προς το πάνω. Οι πλάκες επικολλώνται η μία μετά την άλλη κατά τον διαμήκη άξονα της πλήρωσης (Knauf, 2016). Η επόμενη σειρά πλακών επικολλάται σε απόσταση μισής πλάκας από τη κάτω σειρά. Κοντά στα κουφώματα τοποθετούνται άκαμπτες πλάκες για την αποφυγή ρηγματώσεων. Δεν λησμονείται η εξέταση της επιπεδότητας των θερμομονωτικών πλακών, μετά την εφαρμογή.
- Για τη σωστή συνάφεια μεταξύ των πλακών και την απόδοση της μόνωσης, χρησιμοποιούνται αγκύρια αποτελούμενα από ατσάλινες βίδες. Εφαρμόζονται

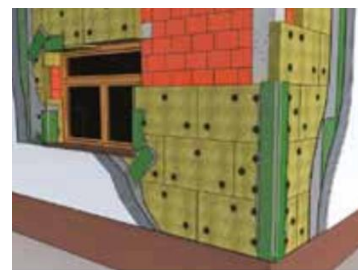
τρία αγκύρια για κάθε πλάκα, στις γωνίες της εξωτερικής τοιχοποιίας γίνεται εφαρμογή πρόσθετων αγκυρίων για τη βέλτιστη συνδεσιμότητα (Knauf, 2016).

- Στις γωνίες της εξωτερικής τοιχοποιίας και περιμετρικά των κουφωμάτων στα ανοίγματα τοποθετείται υαλόπλεγμα. Το υαλόπλεγμα τοποθετείται υπό γωνία 45° (Knauf, 2016).
- Αφού έχει εφαρμοστεί το πρώτο στρώμα κόλλας και έχει τοποθετηθεί το υαλόπλεγμα, εφαρμόζεται ακόμη ένα στρώμα κόλλας. Το υαλόπλεγμα πρέπει να είναι στο ένα τρίτο του εξωτερικού πάχους κόλλας (Knauf, 2016).
- Τέλος εφαρμόζεται το τελικό στρώμα της πρόσοψης. Τοποθετείται σύμφωνα με τις οδηγίες του κατασκευαστή αστάρι επι της τελευταίας στρώσης κόλλας η οποία βρίσκεται σε στεγνή κατάσταση. Συνιστάται η πρόσθετη εφαρμογή κονιάματος επι του μονωτικού σχήματος.

Τέλος σύμφωνα με τις οδηγίες του κατασκευαστή, δεν δύναται να πραγματοποιηθεί κανένα βήμα της παραπάνω εφαρμογής σε θερμοκρασίες κάτω των 5°C και άνω των 25°C (Knauf, 2016).



(α)



(β)

Σχήμα 3-16 Εξωτερικά τοποθετούμενα στρώματα πετροβάμβακα (Knauf, 2016)

2. Διογκωμένη Πολυστερίνη

Τα στρώματα διογκωμένης πολυστερίνης εφαρμόζονται εξωτερικά του κελύφους της κατασκευής. Λόγω των καλών θερμικών ιδιοτήτων του υλικού δύναται να εφαρμοστούν σε υφιστάμενες κατασκευές. Για την επίτευξη της βέλτιστης εφαρμογής της μόνωσης, ιδιαίτερα στις υπάρχουσες κατασκευές, πρέπει να γίνει κατάλληλη προετοιμασία. Γενικότερα επιδιώκεται ο καθαρισμός των επιφανειών στις οποίες θα εφαρμοστεί η μόνωση. Απομακρύνονται πλήρως οι αστάθειες από τις παλαιότερες επιστρώσεις και εφαρμόζεται σοβάς όπου αυτό απαιτείται (Knauf, 2017-03). Γίνεται χρήση πιεστικού νερού για απομάκρυνση σκόνης από τις επιφάνειες εξαιτίας του σκυροδέματος και του παλαιότερου σοβά. Μετά τον καθαρισμό των επιφανειών, επαλείφεται ειδικό αστάρι για λείανση (Knauf, 2017-03). Η εφαρμογή της μόνωσης πραγματοποιείται σε καθαρές και στεγνές επιφάνειες.

Το στέγνωμα για την κατάλληλη εφαρμογή της μόνωσης μπορεί να διαρκέσει έως και 12 ώρες. Στο μεσοδιάστημα οι επιφάνειες πρέπει να προστατεύονται από την έκθεση σε ηλιακή ακτινοβολία και ακραίες καιρικές συνθήκες.

Η επικόλληση των μονωτικών υλικών πραγματοποιείται από το κάτω προς το πάνω μέρος της εξωτερικής τοιχοποιίας και με μια ευθύγραμμη διαμήκη πορεία από το αριστερό προς το δεξί άκρο των επιφανειών. Το πάχος του μονωτικού υλικού υπολογίζεται στα 0.3m και δεν χρήζει πρόσθετης αυλάκωσης στις γωνίες (Knauf, 2017-03). Η εφαρμογή των πλακών στις επιφάνειες πραγματοποιείται χειροκίνητα από τα συνεργεία με δυο είδη κόλλας. Οι πλάκες διαθέτουν κορδέλα κόλλας στο πίσω μέρος και για καλύτερη συνδεσιμότητα με την τοιχοποιία εφαρμόζεται πρόσθετη στρώση κόλλας στο πίσω μέρος της μόνωσης. Γίνεται χρήση ειδικού συγκολλητικού κονιάματος κεντρικά στην πλάκα μόνωσης. Σύμφωνα με τις οδηγίες του κατασκευαστή πρέπει να 40% του μονωτικού υλικού να καλύπτεται από συγκολλητικό υλικό (Knauf, 2017-03). Τέλος η εφαρμογή του συγκολλητικού κονιάματος πραγματοποιείται χειροκίνητα από το συνεργείο με χρήση οδοντωτής σπάτουλας (Knauf, 2017-03).



Σχήμα 3-17 Τοποθέτηση στρώματος διογκωμένης πολυστερίνης (Knauf, 2017-03)

3. Εξηλασμένη Πολυστερίνη

Η εξηλασμένη πολυστερίνη εφαρμόζεται σε μορφή πλακών ως θερμομονωτικό σχήμα. Οι πλάκες εφαρμόζονται σε καθαρές στεγνές επιφάνειες επι της εξωτερικής τοιχοποιίας και όπου συναντώνται ηλεκτρολογικές ή υδραυλικές εγκαταστάσεις, κουφώματα και γωνίες οι μονωτικές πλάκες κόβονται στο εργοτάξιο έτσι ώστε να επιτευχθεί η βέλτιστη συνδεσιμότητα (GreenGuard, 2016). Στις κοιλότητες όπου οι μονωτικές πλάκες κόβονται χρησιμοποιείται πρόσθετος αφρός στεγανοποίησης (GreenGuard, 2016).

Οι μονωτικές πλάκες εφαρμόζονται χειροκίνητα και χρησιμοποιείται ειδική κόλλα για πλήρη συνάφεια με την πλήρωση. Η εφαρμογή κόλλας πραγματοποιείται είτε περιμετρικά

της ορθογωνικής μονωτικής πλάκας είτε με τη μορφή χαντρών στον διαμήκη άξονά της (GreenGuard, 2016). Το συγκολλητικό υλικό καθορίζεται από τις οδηγίες του εκάστοτε κατασκευαστή. Η εφαρμογή ξεκινά από το κάτω μέρος της επιφάνειας και η πρώτη πλάκα τοποθετείται στην γωνία του υποστυλώματος. Στην συνέχεια τοποθετούνται οι υπόλοιπες πλάκες ευθύγραμμα στις προηγούμενες. Δεν χρησιμοποιείται συγκολλητικό υλικό μεταξύ των πλακών, παρά μόνο μεταξύ μόνωσης και τοιχοποιίας. Τέλος, αφού έχουν τοποθετηθεί οι μονωτικές πλάκες στην επιφάνεια της κατασκευής, εφαρμόζεται τελική στρώση κονιάματος η οποία καλύπτει όλο το μονωτικό σχήμα. Το τελικό στρώμα προστατεύει το μονωτικό σχήμα από τις εξωγενείς περιβαλλοντικές συνθήκες, χρησιμοποιείται και για αισθητικούς λόγους (GreenGuard, 2016).



Σχήμα 3-18 Εσωτερικά τοποθετούμενο στρώμα εξηλασμένης πολυστερίνης (GreenGuard, 2016)

4. Κυτταρίνη

Η εφαρμογή κυτταρίνης ως μονωτικό σχήμα δεδομένου ότι δεν είναι σε μορφή στρωμάτων όπως τα υπόλοιπα μονωτικά σχήματα, καθιστά την τοποθέτησή της απαιτητικότερη. Για αυτόν τον λόγο πρέπει να πραγματοποιηθεί έλεγχος της κατασκευής πριν την εφαρμογή της μόνωσης (The Cellulose Insulation Manufacturers Association). Οπές σε οροφές και τοιχώματα θα πρέπει να σφραγίζονται πριν την εφαρμογή του μονωτικού σχήματος. Επιπλέον οι κοιλότητες οι οποίες χρησιμοποιούνται από τα συστήματα ψύξης και θέρμανσης δεν θα πρέπει να μονωθούν για να μην περιορίζεται η απαιτούμενη ροή αέρα (The Cellulose Insulation Manufacturers Association). Θα πρέπει να πραγματοποιείται έλεγχος της εξωτερικής τοιχοποιίας για ενδείξεις υγρασίας, αφού το πέρασμα των υδρατμών δύναται να καταστρέψει την μόνωση (The Cellulose Insulation Manufacturers Association).

Η εφαρμογή της κυτταρίνης πραγματοποιείται με ειδικό μηχάνημα σύμφωνα με τις διατάξεις του κατασκευαστή. Στο άκρο του μηχανήματος βρίσκεται ειδικό ακροφύσιο μέσω του οποίου ψεκάζεται η πήκτη της κυτταρίνης. Πριν τον ψεκάσμο της μόνωσης πρέπει να διανοιχτούν οπές στις επιφάνειες εφαρμογής. Λόγω των συγκεκριμένων οπών απαιτείται προμελέτη της εφαρμογής για αποφυγή καταστροφής του μηχανολογικού και πυροσβεστικού εξοπλισμού της κατασκευής. Επιπροσθέτως βάση της εν λόγω μελέτης και των οπών οι οποίες θα διανοιχτούν στις κοιλότητες υπολογίζεται και η απαιτούμενη ποσότητα μόνωσης (The Cellulose Insulation Manufacturers Association).

Διανοίγονται οπές διαμέτρου 1.59-5.08cm, σύμφωνα με τις οδηγίες του κατασκευαστή, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας εφαρμογής (The Cellulose Insulation Manufacturers Association). Η κατακόρυφη απόσταση δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 1.52 m. Επιπλέον η κατακόρυφη απόσταση των διαδοχικών πλακών κατακόρυφα δεν θα υπερβαίνει τα 0.62 m (The Cellulose Insulation Manufacturers Association). Η τοποθέτηση της κυτταρίνης γίνεται με χρήση σωλήνα και κάθε κοιλότητα εφαρμογής διαθέτει μόνο μία οπή εισόδου. Εν συνεχεία ο σωλήνας εφαρμογής πρέπει να φτάνει σε απόσταση σχεδόν 50 cm από την πλάκα που βρίσκεται πιο μακριά από την οπή εισόδου (The Cellulose Insulation Manufacturers Association). Τέλος στην αγορά, κυκλοφορούν διαφορετικοί σωλήνες πλήρωσης, η κατάλληλη διάμετρος του σωλήνα εξαρτάται από τις απαιτήσεις της εκάστοτε κατασκευής (The Cellulose Insulation Manufacturers Association).



Σχήμα 3-19 Τοποθέτηση κυτταρίνης μέσω ακροφυσίου σε στέγη (US GreenFiber, LLC)

5. Πολυουρεθάνη

Η πολυουρεθάνη εντοπίζεται στην αγορά ως μονωτικό υλικό με την μορφή αφρού ο οποίος ψεκάζεται στις εξωτερικές κοιλότητες της κατασκευής και τις στέγες. Η επιφάνεια στην οποία θα εφαρμοστεί η μόνωση πρέπει να είναι στεγνή και απαλλαγμένη από τη σκόνη για τη καλύτερη τοποθέτηση του μονωτικού αφρού (Elastogran GmbH). Η εφαρμογή του

αφρού πολυουρεθάνης δεν προϋποθέτει την τοποθέτηση ασταριού όπως τα περισσότερα μονωτικά σχήματα. Επιπλέον δεν απαιτείται η προσθήκη υφασμάτινης στρώσης προς αύξηση του πάχους του μονωτικού σχήματος (Elastogran GmbH). Δύναται να τοποθετηθεί αστάρι ως τελευταία στρώση για να επιτευχθεί η μέγιστη προστασία της μόνωσης. Σε κατασκευές οπλισμένου σκυροδέματος όπου η πλήρωση αποτελείται από τούβλα ο αφρός δύναται να εκχυλιστεί στο εσωτερικό της τοιχοποιίας μέσω μικρών οπών οι οποίες διανοίγονται στην επιφάνεια της πλήρωσης (Elastogran GmbH). Τέλος, ο αφρός πολυουρεθάνης παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα ως μέθοδος μόνωσης υφιστάμενης κατασκευής η οποία χρήζει ανακαίνισης. Μέσω του συγκεκριμένου σχήματος τα δομικά στοιχεία παραμένουν προστατευμένα από καιρικές συνθήκες και η απουσία πρόσθετου επιχρίσματος και ασταριού, δεν εμποδίζουν τον αρχιτεκτονικό σχεδιασμό της κατασκευής (Elastogran GmbH).



Σχήμα 3-20 Θερμοπρόσοψη με εξωτερικά τοποθετημένο αφρό πολυουρεθάνης (Elastogran GmbH)

4. Ταυτόχρονη Δομική και Ενεργειακή Αναβάθμιση Υφιστάμενων Κατασκευών

4.1 Ολιστική Προσέγγιση Αναβάθμισης

Η δομική τρωτότητα του μεγαλύτερου μέρους του υπάρχοντος κτιριακού αποθέματος έχει γίνει πλέον αισθητή. Δυστυχώς η σεισμική ευαισθησία των κτιρίων έγινε αντιληπτή μέσω των καταστρεπτικών επιπτώσεων της έντονης σεισμικής δραστηριότητας στις χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Ταυτοχρόνως, έχει πλέον έντονα επισημανθεί η συνεισφορά του κτιριακού τομέα στις συνολικές παγκόσμιες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα.

Λόγω της πράσινης Ευρωπαϊκής πολιτικής η οποία τείνει να εφαρμοστεί καθολικά, τη τελευταία δεκαετία παρατηρείται ευρύ κύμα ενεργειακής αναβάθμισης υαρχουσών κατασκευών (Pohoryles et al., 2020). Μολονότι οι ενεργειακές αναβαθμίσεις έχουν θετικό αντίκτυπο, περιορίζοντας τόσο τα υπέρογκα κόστη θέρμανσης και ψύξης όσο και το περιβαλλοντικό αποτύπωμα, φαίνεται να μην επαρκούν. Οι επεμβάσεις παρατηρούνται κυρίως σε κατασκευές οπλισμένου σκυροδέματος με τοιχοπληρώσεις, οι οποίες χαρακτηρίζονται από ελλιπή όπλιση, ανεπαρκή αντισεισμικό σχεδιασμό και απουσία κανόνων φιλικής προς το περιβάλλον ανέγερσης. Φυσικά, οι ενεργειακές επεμβάσεις περιορίζουν την κατανάλωση ενέργειας ωστόσο αδυνατούν να επιμηκύνουν την ζωή της κατασκευής (Manganelli et al., 2021). Μάλιστα από τους Manganelli et al. (2021) επισημαίνεται ότι η μεμονωμένη ενεργειακή αναβάθμιση ενδέχεται να εντείνει τη σεισμική ευπάθεια του κτιρίου. Τέλος, ένας έντονος σεισμός ο οποίος θα δράσει σε κατασκευή η οποία έχει αναβαθμιστεί μόνο ενεργειακά, δύναται να καταστρέψει το ενεργειακό σχήμα, καταστρέφοντας μαζί και την επένδυση του ιδιοκτήτη.

Τα προβλήματα τα οποία ταλανίζουν τις υπάρχουσες κατασκευές είναι μείζονος σημασίας και η κατεδάφιση μεγάλου όγκου υαρχουσών κατασκευών ή η ανοικοδόμηση των αστικών κέντρων δεν θεωρούνται λύσεις. Η καινοτόμα λύση η οποία προτείνεται είναι μια ολιστική προσέγγιση αναβάθμισης η οποία συνδυάζει τόσο τη δομική όσο και την ενεργειακή αναβάθμιση της υφιστάμενης κατασκευής. Κατά αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται τόσο η δομική προστασία της κατασκευής όσο και ο περιορισμός της κατανάλωσης ενέργειας.

Οι φιλόδοξοι στόχοι της Ευρωπαϊκής Ένωσης για την απαλλαγή από τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα μέχρι το έτος 2030 και η μείωση της καταναλισκόμενης της ενέργειας κατά 35% δύναται να επιτευχθούν μόνο μέσω της αναβάθμισης των κατασκευών όσον αφορά τον κτιριακό τομέα. Οι τελευταίες ευρωπαϊκές οδηγίες εντάσσουν στο πλαίσιο

τους και την απαιτούμενη σεισμική προστασία των κατασκευών έτσι ώστε να μην λησμονείται η δομική αναβάθμιση. Μολονότι η αποτελεσματικότητα των αναβαθμίσεων έχει γίνει πλέον αισθητή, ο ετήσιος ρυθμός αναβάθμισης κυμαίνεται μεταξύ 0.4% και 1.2% (Pohoryles et al., 2020). Άξιο αναφοράς είναι ότι για να γίνουν οι στόχοι της Ε.Ε. πραγματικότητα πρέπει η επιτευχθεί ετήσιος ρυθμός αναβάθμισης της τάξης του 3%. Η απαιτούμενη ραγδαία αύξηση του ετήσιου ρυθμού αναβάθμισης είναι ακόμη ένας λόγος για τον οποίο οι ερευνητές καταφεύγουν στην ολιστική προσέγγιση ενίσχυσης υφιστάμενων κατασκευών. Ανατρέχοντας στη διεθνή βιβλιογραφία εντοπίζονται εργασίες σχετικά με το καινοτόμο συνδυασμό της δομικής και της ενεργειακής επέμβασης. Μέσω πολυάριθμων προσεγγίσεων σφαιρικής αξιολόγησης της ταυτόχρονης αναβάθμισης διαπιστώθηκε ότι η συνδυαστική αναβάθμιση των κατασκευών είναι αποδοτικότερη σε όρους κόστους και οφέλους από ότι οι μεμονωμένες επεμβάσεις (Pohoryles et al., 2020).

Ένα ισχυρό επερχόμενο κύμα αναβαθμίσεων μεγάλου μέρους του ευρωπαϊκού κτιριακού αποθέματος δύναται να δώσει λύση στα προαναφερθέντα προβλήματα τα οποία ταλανίζουν τις κατασκευές. Την τελευταία δεκαετία παρατηρήθηκε έντονη επιθυμία των πολιτών να επέμβουν στις κατασκευές βελτιώνοντας μόνο την ενεργειακή τους απόδοση. Ενδεικτικά οι Pohoryles et al. (2020) σε πρόσφατη δημοσιευμένη μελέτη τους ενημέρωσαν το κοινό για την ενδεχόμενη υπερεκτίμηση της ενεργειακής απόδοσης της ανακαινισμένης κατασκευής όταν αγνοείται ο σεισμικός κίνδυνος και κατά επέκταση η επιτακτική ανάγκη της δομικής της προστασίας.

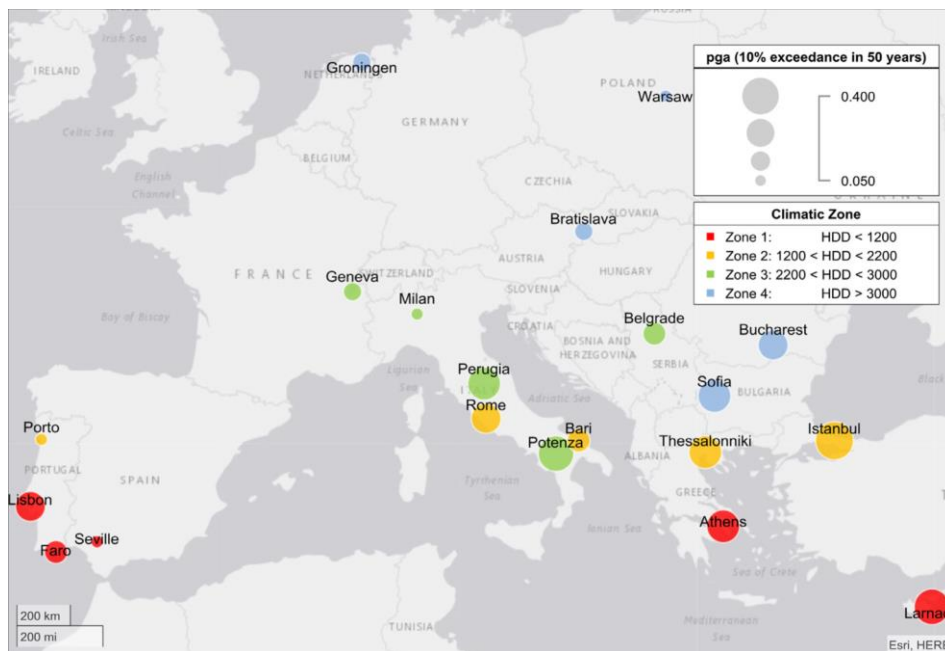
Εκ του αποτελέσματος, η τρωτότητα του μεγαλύτερου μέρους των υαρχουσών κατασκευών εξαιτίας των λόγων που αναλύθηκαν στην εκτενή ανάλυση του υπάρχοντος κτιριακού αποθέματος (Κεφάλαιο 1), σε συνδυασμό με τις νεότερες ευρωπαϊκές πολιτικές, οδήγησε την επιστημονική κοινότητα στην εύρεση καινοτόμων λύσεων για τη συνολική προστασία των κατασκευών. Στον όρο συνολική προστασία βασίζεται η ολιστική προσέγγιση της ενίσχυσης η οποία συνδυάζει τη δομική προστασία με τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης. Στη διεθνή βιβλιογραφία εντοπίζονται μέθοδοι των οποίων η εφαρμογή δύναται να προσφέρει τον απαιτούμενο εκσυγχρονισμό του κτιριακού αποθέματος. Αξίζει να αναφερθεί ότι μελετάται η εφαρμογή καινοτόμων μεθόδων δομικής και ενεργειακής βελτίωσης και σε νεόδμητες κατασκευές ωστόσο η συγκεκριμένη εργασία περιορίζεται στο επίπεδο των αναβαθμίσεων.

Εν κατακλείδι, δεδομένου ότι το κόστος θεωρείται ο κυριότερος ανασταλτικός παράγοντας σχετικά με την ευρεία απήχηση των αναβαθμίσεων, οι Pohoryles et al. (2020) τόνισαν ότι η συνδυαστική αναβάθμιση πρόκειται να είναι πιο συμφέρουσα από οποιαδήποτε

μεμονωμένη επέμβαση παρόλο που το αρχικό της κόστος είναι μεγαλύτερο. Η συγκεκριμένη θεώρηση λόγω της μεγάλης σημασίας της για το κύμα αναβαθμίσεων αναλύεται παρακάτω.

4.2 Επίδραση Ταυτόχρονης Αναβάθμισης

Δεδομένου ότι οι μέθοδοι αναβάθμισης της παρούσας εργασίας αφορούν το ευρωπαϊκό κτιριακό απόθεμα, η αξιολόγηση της ταυτόχρονης αναβάθμισης δεν είναι ενιαία αλλά καθορίζεται από ποικίλες παραμέτρους. Λόγω της μεγάλης έκτασης της Ε.Ε η αποτελεσματικότητα της ταυτόχρονης αναβάθμισης εξαρτάται από τις κλιματικές συνθήκες ανά την ευρωπαϊκή επικράτεια. Επιπλέον, οι ευρωπαϊκές χώρες χαρακτηρίζονται από διαφορετική σεισμικότητα. Για αυτόν τον λόγο η αξιολόγηση των ολιστικών προσεγγίσεων αναβάθμισης βασίζεται στις κλιματικές και σεισμικές ζώνες στις οποίες είναι χωρισμένη η Ευρώπη. Τέλος, γίνεται λόγος για τις διάφορες τυπολογίες κτιρίων, ωστόσο το αντικείμενο της παρούσας εργασία περιορίζεται σε κατασκευές οπλισμένου σκυροδέματος με τοιχοπληρώσεις.



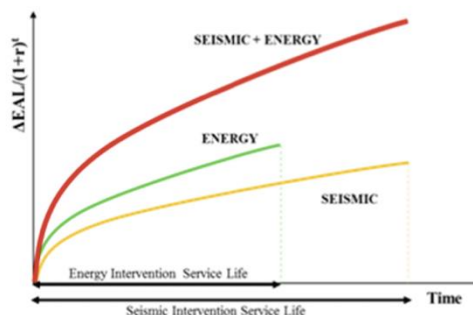
Σχήμα 4-1 Χάρτης κλιματικών ζωνών (Bournas et al., 2020)

Το παραπάνω σχήμα αφορά στις κλιματικές ζώνες της σημερινής Ευρωπαϊκής επικράτειας. Το υπόμνημα στο άνω δεξιό μέρος αφορά δείκτη, βάση του οποίου κατανέμονται οι κλιματικές ζώνες. Αναλυτικότερα, ο δείκτης HDD υπολογίζεται βάση της θερμοκρασίας σε βαθμούς Κελσίου. Πρακτικά πρόκειται για συντελεστή ο οποίος χρησιμοποιεί επικρατούσες θερμοκρασίες ανά περιοχή. Η μία θερμοκρασία αφορά την αναφερόμενη στη βιβλιογραφία ως θερμοκρασία βάσης ή θερμοκρασία "άνεσης" ενώ η δεύτερη τιμή αναφέρεται στη μέση θερμοκρασία ανά περιοχή κατά τη διάρκεια μίας ημέρας

(Pohoryles et al., 2020). Όπως επισημαίνουν οι Pohoryles et al. (2020) με τον όρο θερμοκρασία βάσης γίνεται αναφορά σε θερμοκρασία εξωτερικού αέρα για την οποία δεν χρειάζεται χρήση κλιματισμού στους εσωτερικούς χώρους της κατασκευής. Η συγκεκριμένη θερμοκρασία ορίζεται κατά κανόνα στους 18°C. Όσον αφορά τις σεισμικές ζώνες δηλαδή τη σεισμική επικινδυνότητα ανά περιοχή, ο καταμερισμός της επικράτειας γίνεται βάση του συντελεστή εδαφικής επιτάχυνσης (PGA) ο οποίος εντοπίζεται στη κάθε περιοχή. Τέλος, οι μεγαλουπόλεις οι οποίες έχουν επισημανθεί αφορούν περιοχές διαφορετικών κλιματικών συνθηκών και διαφορετικής σεισμικής επικινδυνότητας, το κτιριακό απόθεμα των οποίων χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση της συνδυαστικής αναβάθμισης.

4.2.1 Όφελος Ταυτόχρονης Αναβάθμισης

Η ευεργετική ή μη επίδραση της ταυτόχρονης αναβάθμισης είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με την έννοια του οφέλους της αναβάθμισης. Ο χαρακτήρας του οφέλους έχει οικονομική χροιά δεδομένου ότι η επέμβαση στις κατασκευές έχει κόστος και δύναται να λάβει επενδυτικό χαρακτήρα. Λόγω της επενδυτικής χροιάς την οποία λαμβάνει η επέμβαση στο κέλυφος των κατασκευών, το όφελος της ολιστικής προσέγγισης έγκειται στο χρονικό διάστημα απόσβεσης της αρχικής επένδυσης. Για να γίνει καλύτερα αντιληπτή η καταλληλότητα της ταυτόχρονης αναβάθμισης, το χρονικό διάστημα της απόσβεσής της είναι άμεσα συγκρίσιμο με την απόσβεση μεμονωμένων επεμβάσεων. Η ειδοποιός διαφορά μεταξύ της ολοκληρωμένης σεισμικής και ενεργειακής αναβάθμισης και των μεμονωμένων επεμβάσεων έγκειται στη συνδυαστική σεισμική προστασία της κατασκευής και στον περιορισμό των καταναλωμένων ποσών ενέργειας στον υπολειπόμενο χρόνο ζωής της κατασκευής μετά την ενίσχυση (Manganelli et al., 2021).



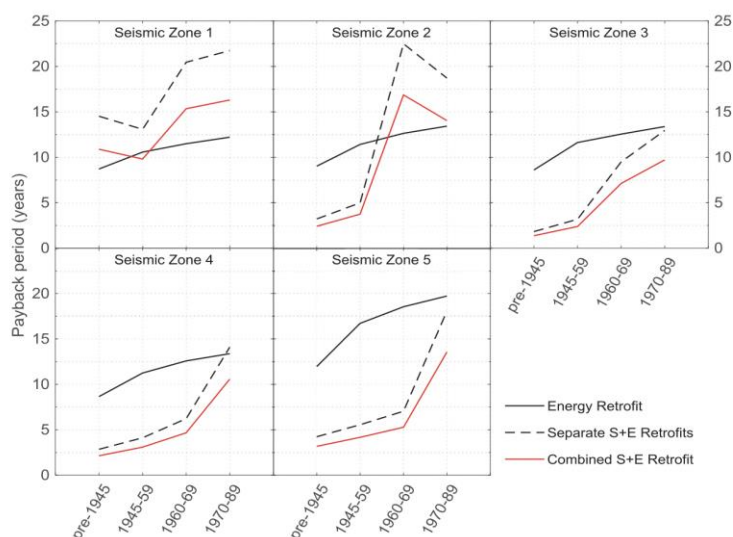
Σχήμα 4-2 Οφέλη ταυτόχρονης αναβάθμισης (Manganelli et al., 2021).

Το παραπάνω σχήμα συγκρίνει άμεσα τα οφέλη της συνδυαστικής αναβάθμισης συγκριτικά με αυτά των μεμονωμένων αναβαθμίσεων. Οι Manganelli et al. (2021), ενδεικτικά σχολίασαν ότι η κόκκινη καμπύλη αντιπροσωπεύει τα ευεργετικά οφέλη της

ταυτόχρονης αναβάθμισης και προκύπτει μέσω της άθροισης των μεμονωμένων επεμβάσεων. Το όφελος της ολιστικής προσέγγισης επέμβασης ωστόσο δεν περιορίζεται εκεί αφού όπως γίνεται αντιληπτό μέσω του παραπάνω σχήματος επιτυγχάνεται η σεισμική προστασία της κατασκευής, ο περιορισμός των ενεργειακών δαπανών και η ταυτόχρονη επιμήκυνση της ζωής της προς αναβάθμιση κατασκευής. Το διάστημα ζωής επιμηκώνεται και στη διάρκειά του η λειτουργία είναι επαρκέστερη συντελώντας στην πρόωμη απόσβεση του αρχικού δαπανώμενου ποσού.

Μολονότι η απόσβεση της επένδυσης αποτελεί βασικό παράγοντα αξιολόγησης της συνδυαστικής επέμβασης, η συνεισφορά της δεν περιορίζεται στο διάστημα αποπληρωμής. Το κυριότερο όφελος της ταυτόχρονης αναβάθμισης έγκειται στην ανάκτηση του αρχικού ποσού σε εύλογο χρονικό διάστημα και η εγγύηση για την οικονομική λειτουργία της κατασκευής για το εναπομένον διάστημα ζωής της (Manganelli et al., 2021). Το δεδομένο αυτό δεν αντικατοπτρίζει τη λειτουργία των μεμονωμένων αναβαθμίσεων αφού η δομική αναβάθμιση προστατεύει την κατασκευή από ενδεχόμενα τυχηματικά φαινόμενα ωστόσο δεν εγγυάται για την οικονομική της λειτουργία, κοινώς για τον περιορισμό των δαπανών. Αντίστοιχα, η μεμονωμένη ενεργειακή αναβάθμιση ενδέχεται να βελτιώσει την απόκριση της κατασκευής σε όρους εξοικονόμησης ωστόσο ένας ενδεχόμενος σεισμός στο διάστημα ζωής πρόκειται να καταστρέψει το σχήμα της ενίσχυσης, με αποτέλεσμα να χαθεί το χρηματικό ποσό της επένδυσης. Μέσω των παραπάνω γίνεται αντιληπτό ότι η ολοκληρωμένη αναβάθμιση των κατασκευών εγγυάται για τη ποιοτικότερη αναβάθμισή τους και για τη μετέπειτα λειτουργία της αλλά και την ασφαλέστερη επένδυση των χρημάτων των ιδιοκτητών.

Αντιπροσωπευτική μελέτη για την απόκριση των υπό ταυτόχρονη αναβάθμιση κατασκευών εκπονήθηκε από τους Pohoryles et al. (2020). Και σε αυτή τη περίπτωση η αξιολόγηση της επέμβασης πραγματοποιήθηκε συγκριτικά με την περίοδο απόσβεσης. Παρακάτω παρατίθεται διάγραμμα το οποίο αφορά τη μεμονωμένη ενεργειακή αναβάθμιση, τις χωριστές μεμονωμένες αναβαθμίσεις και τη συνδυαστική αναβάθμιση, για τις πέντε σεισμικές ζώνες της Ευρώπης, όπως αυτές αναλύθηκαν παραπάνω. Τα αποτελέσματα δίνονται βάση του έτους ανέγερσης των κατασκευών όπως και της περιόδου αποπληρωμής.



Σχήμα 4-3 Περίοδος αποπληρωμής αναβαθμίσεων κατασκευών ανά την Ευρώπη (Pohoryles et al., 2020)

Αναφορικά στο παραπάνω διάγραμμα, αξίζει να σημειωθεί ότι παρατίθενται αποτελέσματα σχετικά με κατασκευές με έτος ανέγερσης πριν το 1989. Πρόκειται λοιπόν για εφαρμοσμένες μεθόδους αναβαθμίσεις σε απαρχαιωμένες κατασκευές, οι οποίες αποτελούν το μεγαλύτερο μέρος του ευρωπαϊκού κτιριακού αποθέματος και χαρακτηρίζονται από ελλιπή ή παντελώς απύσα θερμομόνωση σε συνδυασμό με την απώλεια αυστηρών αντισεισμικών κανονισμών κατά την ανέγερση.

Όσον αφορά την περίοδο αποπληρωμής της επένδυσης, παρατηρούνται διαφορές ανάλογα με τις σεισμικές ζώνες. Αρχικά, σχετικά με τις πρώτες δύο σεισμικές ζώνες, όπου η ανάπτυξη εδαφικών επιταχύνσεων είναι ηπιότερη, παρατηρείται συντομότερο διάστημα αποπληρωμής για τη μεμονωμένη ενεργειακή αναβάθμιση. Συμπερασματικά, για τις ζώνες αυτές, η συνεισφορά της ταυτόχρονης αναβάθμισης φαίνεται να είναι η λιγότερη επωφελής αφού συμβάλλει στην προσθήκη τριών με τεσσάρων ετών στην περίοδο αποπληρωμής. Αυτό δεν σημαίνει πως μια ενδεχόμενη επέμβαση δομικής προστασίας δεν θα κριθεί αποτελεσματική για κάποιες κατασκευές.

Αντίθετα στις υπόλοιπες τρεις σεισμικές ζώνες, οι οποίες αφορούν περιοχές έντονης σεισμικότητας, το ενδεχόμενο της ολιστικής αναβάθμισης κρίνεται ιδιαίτερα αποτελεσματικό. Για περιοχές οι οποίες εντάσσονται στις σεισμικές ζώνες τρία έως και πέντε, η συνεισφορά της ταυτόχρονης αναβάθμισης γίνεται ξεκάθαρη μέσω του παραπάνω διαγράμματος. Ενδεικτικά αξίζει να αναφερθεί ότι ενώ η μεμονωμένη ενεργειακή αναβάθμιση έχει χαμηλότερο κόστος από τη συνδυασμένη ενίσχυση, παρουσιάζει μεγαλύτερο απαιτούμενο διάστημα αποπληρωμής. Η δομική αναβάθμιση κρίνεται απαραίτητη, ωστόσο ο συνδυασμός της με την ενεργειακή αναβάθμιση φαίνεται να αποτελεί

τη βέλτιστη λύση με το συντομότερο διάστημα απόσβεσης της επένδυσης και για τις τρεις σεισμικές ζώνες, με διαφορά τουλάχιστον τεσσάρων ετών από τις υπόλοιπες λύσεις.

Η αναβάθμιση του κτιριακού αποθέματος δύναται να είναι μέσο επίτευξης των στόχων της Ευρωπαϊκής Ένωσης, με τον σημαντικότερο εκ των οποίων να είναι η απαλλαγή από τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου μέχρι το έτος 2030. Ωστόσο ο υπάρχον ρυθμός αναβάθμισης, περίπου 1%, με τη πλειονότητα εκ των οποίων να είναι μεμονωμένες αναβαθμίσεις, κυρίως ενεργειακές, οι ευρωπαϊκοί στόχοι ενδέχεται να καθυστερήσουν. Με ετήσιο ρυθμό αναβάθμισης περί του 3%, η στροφή προς ένα πιο "πράσινο" μέλλον ενδέχεται να υλοποιηθεί, με την ταυτόχρονη αναβάθμιση να αποτελεί τη βέλτιστη λύση. Εκτός από τα υπέρογκα καταναλωμένα ποσά ενέργειας, η δομική τρωτότητα του κτιριακού αποθέματος δεν πρέπει να λησμονηθεί. Η ολιστική προσέγγιση αναβάθμισης αρχίζει να παρουσιάζει τα ευεργετικά της οφέλη ιδιαίτερα για περιοχές με έντονη σεισμική δραστηριότητα. Ο απαιτούμενος ρυθμός αναβάθμισης και τα ευεργετικά οφέλη της ταυτόχρονης αναβάθμισης συνδυάζονται, αξιοποιώντας καινοτόμες λύσεις επέμβασης, ανοίγοντας τον δρόμο για ένα λειτουργικότερο και αποδοτικότερο κτιριακό απόθεμα, το οποίο θα απαρτίζει την Ευρώπη του αύριο.

4.3 Τεχνικές Ταυτόχρονης Αναβάθμισης

Η ολοκληρωμένη προστασία του κτιριακού αποθέματος ενεργειακά και δομικά, σε συνδυασμό με την απαιτούμενη αύξηση του ετήσιου ρυθμού αναβάθμισης, συντελούν στην ολιστική προσέγγιση αναβάθμισης του κτιριακού αποθέματος.

Γίνεται λόγος για συνδυαστική επέμβαση στο κέλυφος των κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος οι οποίες απαρτίζουν το μεγαλύτερο μέρος του ευρωπαϊκού κτιριακού αποθέματος. Πρόκειται για προσέγγιση ιδιαίτερα απαιτητική η οποία χρήζει άρτιας εξειδίκευσης. Για να γίνει υπαρκτό το ολιστικό πλάνο απαιτείται αποτελεσματικός συνδυασμός των καινοτόμων συστημάτων τα οποία αναλύθηκαν παραπάνω. Για αυτόν τον λόγο η επιστημονική κοινότητα καλείται να απαντήσει στα ερωτήματα που δημιουργούνται σχετικά με τον συνδυασμό των καινοτόμων συστημάτων και των νεόφερτων τεχνικών.

Η ολιστική αναβάθμιση των υπαρχουσών κατασκευών δύναται να χαρακτηριστεί ως ένα διεπιστημονικό ζήτημα. Ζήτημα το οποίο εμπλέκει τόσο την εφαρμογή όσο και την επιστήμη της φύσης των υλικών. Πρόκειται για μια σειρά διαδικασιών η οποία αφορά τις διαδικασίες παραγωγής, τους μελετητές, τους μηχανικούς και τα συνεργεία εφαρμογής. Εν τέλει αναζητούνται απαντήσεις στα ερωτήματα τα οποία προκύπτουν σχετικά με το κατά πόσο είναι δυνατή η ταυτόχρονη αντιμετώπιση των προβλημάτων τα οποία ταλανίζουν τις

υφιστάμενες κατασκευές. Επιπλέον, η επιστημονική κοινότητα διερωτάται σχετικά με την οικονομική εφαρμοσιμότητα της εν λόγω προσέγγισης.

Λόγω της εκτεταμένης ανάγκης αναβάθμισης του κτιριακού αποθέματος τα τελευταία χρόνια έχει σημειωθεί πρόοδος στην εξέλιξη και λειτουργία των μεθόδων ταυτόχρονης επέμβασης. Παρακάτω αναλύονται οι σημαντικότερες και πιο ελπιδοφόρες μέθοδοι ταυτόχρονης αναβάθμισης όπως αυτές αναλύονται στη διεθνή βιβλιογραφία.

- **Εξωσκελετός-Διπλό Κέλυφος**

Όπως επισημάνθηκε από τους Kouris et al. (2019) η ταυτόχρονη αναβάθμιση υφιστάμενης κατασκευής δύναται να επιτευχθεί μέσω της τοποθέτησης εξωσκελετού ή εναλλακτικά μέσω της δημιουργίας διπλού κελύφους. Μέσω των συγκεκριμένων τεχνικών πραγματοποιείται η τοποθέτηση νέων στρωμάτων, εξωτερικά του κελύφους της υπάρχουσας κατασκευής. Τα νέα αυτά πάνελ κάνουν χρήση καινοτόμων υλικών τα οποία δύναται να βελτιώσουν τόσο τη δομική απόκριση του κτιρίου όσο και την ενεργειακή της απόδοση.

Σύμφωνα με τους Caverzan et al. (2016), πρόσφατα στην Κίνα διαμορφώθηκε ένας νέος μηχανισμός ταυτόχρονης αναβάθμισης ο οποίος κάνει χρήση πολυστρωματικών πάνελ εξωτερικά τοποθετούμενων. Πιο συγκεκριμένα τα πάνελ απαρτίζονται από 5 διαδοχικές στρώσεις. Οι εξωτερικές στρώσεις των πάνελ χρησιμεύουν ως ξυλότυπος διευκολύνοντας τη χύτευση των υλικών στο εσωτερικό των επιφανειών. Το εσωτερικό του πάνελ αποτελείται από λεπτό, αφρώδες σκυρόδεμα το οποίο βελτιώνει τη δομική απόκριση της κατασκευής και έχει χαμηλό συντελεστή θερμικής διαπερατότητας, περιορίζοντας τις μεταφορές θερμικής ενέργειας. Επιπλέον, το χυτευμένο σκυρόδεμα στο εσωτερικό των πάνελ συγκρατείται από χαλύβδινο συρματόπλεγμα το οποίο προσδίδει στο πάνελ ικανότητα παραμόρφωσης. Τέλος σε δοκιμές οι οποίες εκπονήθηκαν για διαφορετικές διαστάσεις πάνελ και οι οποίες καταπονήθηκαν σε στατική φόρτιση, εξήχθη το συμπέρασμα περιορισμού της απώλειας ενέργειας από το εσωτερικό της κατασκευής καθώς και η πλαστιμότητα η οποία διέπει τα πάνελ.

Σύμφωνα με τους Pertile et al. (2021) διαμορφώθηκε ακόμη ένα σχήμα ταυτόχρονης αναβάθμισης το οποίο κάνει χρήση του λεγόμενου εξωσκελετού. Πρόκειται για δομικό στρώμα εξωτερικά επιβαλλόμενο του κελύφους το οποίο απαρτίζεται από λεπτή στρώση οπλισμένου σκυροδέματος και δύο στρώσεις μονωτικού υλικού. Όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό, η στρώση οπλισμένου σκυροδέματος αφορά στη βελτίωση της δομικής απόκρισης ενώ οι στρώσεις μονωτικών υλικών στην ελαχιστοποίηση της μεταφοράς θερμικής ενέργειας.

Το σχήμα ταυτόχρονης αναβάθμισης προστατεύεται από εξωτερικό περίβλημα το οποίο στην ιδανικότερη μορφή του συνδέεται με τα κατακόρυφα δομικά στοιχεία και τις οριζόντιες δοκούς. Μέσω της εφαρμογής του εξωσκελετού, κατά τη διάρκεια σεισμικής διέγερσης, οι δονήσεις μεταφέρονται από το έδαφος στα δομικά στρώματα και έπειτα στη θεμελίωση.



Σχήμα 4-4 Χύτευση σκυροδέματος στο εσωτερικό ICF πάνελ

(<https://www.octaform.com>)

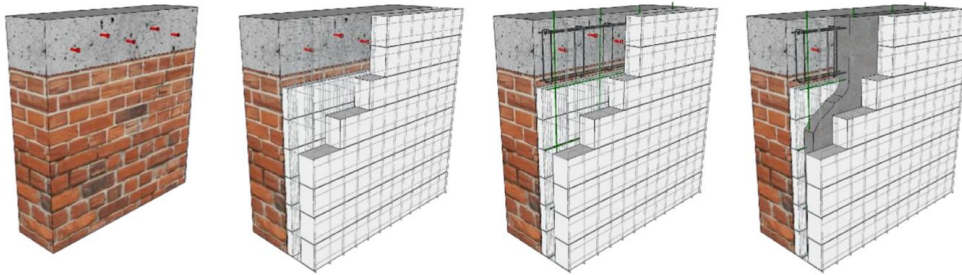
Όπως επισημαίνουν οι Pertile et al. (2021) η τοποθέτηση δομικού στρώματος ως μέθοδος ταυτόχρονης αναβάθμισης παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα. Κατά κανόνα τα δομικά στρώματα τοποθετούνται στη περίμετρο της κατασκευής και συντελούν στη δημιουργία συστήματος με μεγάλη μεταφορική και στρωφική δυσκαμψία. Μέσω της τοποθέτησης των δομικών στρωμάτων οι απαιτήσεις παραμόρφωσης μειώνονται σημαντικά για τα τρωτά δομικά στοιχεία, περιορίζοντας αντίστοιχα και τις ζημιές. Επιπροσθέτως, επισημαίνεται η ικανότητα των δομικών στρωμάτων να συγκρατούν τις τοιχοπληρώσεις σε περίπτωση σεισμικής δόνησης, στοιχείο ιδιαίτερα ευεργετικό για τη δομική απόκριση του συνόλου της κατασκευής.

Αξίζει να αναφερθεί η σημασία σύνδεσης των δομικών πάνελ με το διάφραγμα της κατασκευής. Μέσω της επαρκούς σύνδεσης με το διάφραγμα του κτιρίου, δημιουργείται μηχανισμός αποτελεσματικότερης απορρόφησης των οριζόντιων πλευρικών φορτίων, προσδίδοντας μεγάλη εντός επιπέδου δυσκαμψία στο σύνολο της κατασκευής.

Αξίζει να γίνει αναφορά στην διαδικασία εφαρμογής των δομικών στρωμάτων ή αλλιώς του εξωσκελετού και πιο συγκεκριμένα στα αποκαλούμενα ICF πάνελ, όπως αυτή παρατίθεται μέσω των Pertile et al. (2021).

Αρχικά τα ICF πάνελ χαρακτηρίζονται από το μικρό τους βάρος, γεγονός το οποίο καθιστά την εφαρμογή στο εργοτάξιο ευκολότερη. Ποικίλες εφαρμογές των πάνελ ενδέχεται να απαιτούν την διεύρυνση της βάσης θεμελίωσης για την βέλτιστη απόδοση του σχήματος. Αρχικά εξασφαλίζεται η σύνδεση των πάνελ με τα δομικά στοιχεία μέσω της τοποθέτησης

χαλύβδινων δεσμών. Μετά την τοποθέτησή τους επι των πληρώσεων πραγματοποιείται επιπρόσθετη προσθήκη ειδικών αγκυρίων, για να αποτραπεί η μετατόπιση του εξωτερικού ξυλότυπου. Έπειτα της επαρκούς στερέωσης του ξυλότυπου χυτεύονται το χαλύβδινο πλέγμα και τα μονωτικά υλικά στο εσωτερικό του. Γενικότερα η τοποθέτηση των δομικών στρωμάτων πραγματοποιείται από τη χαμηλότερη στάθμη της κατασκευής προς τις ψηλότερες. Ακολουθεί σχήμα περιγραφής των διαδοχικών διαδικασιών εφαρμογής ICF στρωμάτων.



Σχήμα 4-5 Διαδικασία εφαρμογής ICF πάνελ (Pertile et al, 2021)

Η παρούσα μέθοδος προσφέρει στη κατασκευή δομική προστασία και πρόσθετη θερμομόνωση μέσω μιας ολιστικής προσέγγισης. Επιπλέον κάνει χρήση προκατασκευασμένων ξυλότυπων, επιταχύνοντας τις διαδικασίες εφαρμογής. Οι εξωσκελετοί εφαρμόζονται εξωτερικά του κελύφους της κατασκευής, οπότε δεν απαιτείται η διακοπή λειτουργίας του κτιρίου κατά τη διάρκεια της εγκατάστασης. Τα δομικά στρώματα μονωμένου σκυροδέματος παρουσία χαλύβδινου πλέγματος κρίθηκαν ως αποτελεσματικά προσδίδοντας στα δομικά στοιχεία ολκιμότερο τρόπο αστοχίας, ενώ ταυτόχρονα περιόρισαν τη μεταφορά θερμικής ενέργειας. Μολονότι τα πάνελ δεν αυξάνουν τη μάζα της κατασκευής και αντιμετωπίζουν ταυτόχρονα το δομικό και ενεργειακό πρόβλημα της κατασκευής, επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό την υπάρχουσα αρχιτεκτονική. Τέτοιου είδους προσεγγίσεις δεν φαντάζουν κατάλληλες για παλαιές κατασκευές με εκτενή ιστορικό και πολιτιστικό χαρακτήρα. Τέλος, αναζητούνται αποτελεσματικότερες μέθοδοι αντίστοιχης λειτουργίας οι οποίες δεν επεμβαίνουν εκτεταμένα στο κέλυφος του κτιρίου.

- **Ινοπλισμένα Πολυμερή Υάλου + Θερμοκονιάματα**

Πολλά πλεονεκτήματα απορρέουν από τη χρήση καινοτόμων υλικών και τεχνικών για την αναβάθμιση του υφιστάμενου κτιριακού αποθέματος. Σταδιακά, όπως επισημάνθηκε στα κεφάλαια 2 και 3, τα καινοτόμα υλικά αντικαθιστούν τα συμβατικά δομικά υλικά προσδίδοντας στη κατασκευή τόσο δομική προστασία όσο και ενεργειακή απόδοση. Οι εξωσκελετοί και τα δομικά στρώματα θεωρήθηκαν αποτελεσματική προσέγγιση ταυτόχρονης

αναβάθμισης, ωστόσο δημιουργήθηκε η ανάγκη αναζήτησης τρόπων αξιοποίησης των καινοτόμων υλικών για την επίτευξη μιας ολιστικής προσέγγισης αναβάθμισης.

Μια τέτοια προσέγγιση διατυπώνεται από τους Borri et al. (2015) η οποία αφορά στον συνδυασμό των ινοπλισμένων πολυμερών με θερμομονωτικά κονιάματα. Όπως επισημάνθηκε στο Κεφάλαιο 2 της παρούσας εργασίας, η χρήση των FRPs αντιμετωπίζει το ζήτημα της δομικής τρωτότητας των κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος βελτιώνοντας την απόκρισή τους. Το κυριότερο μειονέκτημα του εν λόγω υλικού έγκειται στον εμποτισμό των ινών της υφασματοειδούς διάταξης με εποξειδική ρητίνη. Οι ρητίνες είναι υπεύθυνες για την κακή συμπεριφορά του σχήματος τόσο σε υψηλές θερμοκρασίες όσο και σε συνθήκες υγρασίας, μειώνοντας την αποτελεσματικότητα της διάταξης. Επιπλέον, οι ρητίνες χαρακτηρίζονται από τις επιπτώσεις που προκαλούν στην ανθρώπινη υγεία. Τα παραπάνω αποτέλεσαν σημαντικά εμπόδια στην εκτεταμένη χρήση των ινοπλισμένων πολυμερών.

Η προσέγγιση των Borri et al. (2015) αντιμετωπίζει τα παραπάνω προβλήματα ενώ ταυτόχρονα ανοίγει τον δρόμο της ταυτόχρονης αναβάθμισης με τη χρήση καινοτόμων υλικών. Πιο συγκεκριμένα οι Borri et al. (2015) πρότειναν τη χρήση των ινοπλισμένων πολυμερών με ίνες υάλου και την αντικατάσταση των εποξειδικών ρητινών από ειδικά θερμοκονιάματα. Κατά αυτόν τον τρόπο δύναται να αξιοποιηθούν οι ευεργετικές δομικές ιδιότητες των FRPs, αντιμετωπίζοντας τις σημαντικότερες αδυναμίες τους οι οποίες πηγάζαν από την εκτεταμένη χρήση ρητινών. Επιπλέον, πρόκειται για τη πρώτη προσέγγιση η οποία κάνει χρήση υφασμάτων ινοπλισμένων πολυμερών, η τοποθέτηση των οποίων αποσκοπεί στη βελτίωση της ενεργειακής επάρκειας της κατασκευής.

Πρόκειται για μέθοδο τα χαρακτηριστικά της οποίας καταφέρνουν να αντιμετωπίσουν τα σημαντικότερα μειονεκτήματα των προαναφερθέντων τεχνικών. Αρχικά, για τη δομική προστασία της κατασκευής επιστρατεύονται τα ινοπλισμένα πολυμερή, δηλαδή σύνθετα υλικά με αποτελεσματικές ιδιότητες αντικαθιστώντας τα συμβατικά δομικά υλικά, όπως ο χάλυβας, τα οποία προσθέτουν βάρος στη κατασκευή, αυξάνουν τις σεισμικές μάζες και είναι ευάλωτα στη διάβρωση. Επίσης, η χρήση θερμοκονιαμάτων, η σύσταση των οποίων είναι ανόργανη, αντιμετωπίζει τα προβλήματα των ρητινών και μειώνει σημαντικά το κόστος της αναβάθμισης, αφού δεν χρειάζεται ξεχωριστό σχήμα θερμικής μόνωσης του κελύφους.

Σύμφωνα με τους Borri et al. (2015) η εφαρμογή της συγκεκριμένης τεχνικής δεν διαφέρει κατά πολύ σε σχέση με την τοποθέτηση μανδύων οπλισμένου σκυροδέματος. Η διαδικασία εφαρμογής προϋποθέτει τον καθαρισμό των επιφανειών του κελύφους και της πλήρωσης από παλαιότερους σοβάδες. Η συγκεκριμένη διαδικασία ακολουθείται για την επίτευξη της μέγιστης συνάφειας μεταξύ της πλήρωσης και των υφασμάτων. Έπειτα

πραγματοποιείται καθαρισμός των επιφανειών μέσω ψεκασμού με νερό. Αφού ολοκληρωθεί ο καθαρισμός των επιφανειών, τοποθετείται η πρώτη στρώση θερμοκονιάματος και ακολουθεί η χειροκίνητη εφαρμογή του υφάσματος. Η διαδικασία ολοκληρώνεται με τη δεύτερη και τελευταία στρώση θερμοκονιάματος, όταν η προηγούμενη βρίσκεται ακόμη σε νωπή κατάσταση.

Οι Borri et al. (2015) αξιολόγησαν την αποτελεσματικότητα της συγκεκριμένης τεχνικής σύμφωνα με πειραματική δοκιμή την οποία εκπόνησαν. Αρχικά επισήμαναν ότι με τη χρήση θερμοκονιάματος με καλές μηχανικές ιδιότητες είναι δυνατή η αύξηση της πλευρικής αντοχής της πλήρωσης. Επιπλέον, τονίστηκε ότι το πιο αδύναμο σημείο της διάταξης είναι το σημείο επαφής της πρώτης στρώσης θερμοκονιάματος και πλήρωσης. Η ρηγμάτωση των πληρώσεων δημιούργησε απόκλιση στις δυσκαμψίες της πλήρωσης και του υφάσματος. Η αστοχία στα ενισχυμένα δοκίμια επήλθε εξαιτίας της φθοράς στη στρώση του θερμοκονιάματος. Παρόλα αυτά η εφαρμογή των ινοπλισμένων πολυμερών και του θερμοκονιάματος οδήγησε στην ικανότητα παραλαβής φορτίσεων. Επιπροσθέτως, η διάταξη κρίθηκε αποτελεσματική όσον αφορά και την ενεργειακή της απόδοση, αφού παρατηρήθηκε πτώση του συντελεστή θερμικής διαπερατότητας U κατά 35-40%.



Σχήμα 4-6 Αστοχία ενισχυμένου δοκιμίου (Borri et al., 2015)

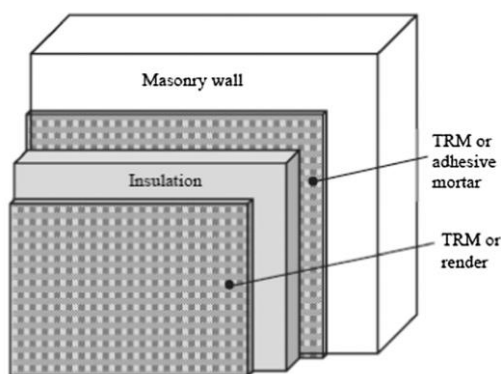
Συμπερασματικά από τους Borri et al. (2015) προτάθηκε τεχνική αξιοποίησης των ινοπλισμένων πολυμερών. Η προσέγγιση αντικατάστασης των ρητινών από κονιάματα ανόργανης μήτρας ή κονιάματα χαμηλής θερμικής αγωγιμότητας, ανοίγει τον δρόμο αξιοποίησης των FRPs τόσο για μεμονωμένη δομική όσο και για ταυτόχρονη αναβάθμιση. Επιπλέον, μέσω της συγκεκριμένης προσέγγισης το μέχρι τώρα γνωστό κόστος για τα ινοπλισμένα πολυμερή μειώνεται δραστικά. Τέλος η επέμβαση στο κέλυφος της κατασκευής είναι οριακά ανεπαίσθητη δεν δημιουργεί αρχιτεκτονικά προβλήματα και δεν απαιτεί τη διακοπή λειτουργίας της κατασκευής. Πλέον ανοίγει ο δρόμος αξιοποίησης καινοτόμων τεχνικών και υλικών για τη ταυτόχρονη αναβάθμιση των υπάρχουσών κατασκευών.

- **Ινοπλέγματα σε Ανόργανη Μήτρα + Στρώση Θερμομονωτικού Υλικού**

Η επιτακτική ανάγκη αναβάθμισης του κτιριακού αποθέματος οδήγησε στην ανάπτυξη και την κατάλληλη αξιοποίηση καινοτόμων τεχνικών για την επίτευξη του στόχου. Η πιο υποσχόμενη μέθοδος δομικής αναβάθμισης του κελύφους κατασκευών οπλισμένων σκυροδέματος είναι τα ινοπλέγματα σε ανόργανη μήτρα. Όπως εκτενώς αναλύθηκε στο κεφάλαιο 2ο της παρούσας εργασίας, πρόκειται για τεχνική συγγενική των FRPs, με τη διαφορά ότι τα TRMs καταφέρνουν να αντιμετωπίσουν τα σημαντικότερα προβλήματα των ινοπλισμένων πολυμερών και να παρέχουν βελτιωμένη σεισμική απόκριση στη κατασκευή.

Δεδομένου ότι ήδη πραγματοποιήθηκαν προσπάθειες αξιοποίησης καινοτόμων υλικών για τη συνδυαστική αναβάθμιση του κελύφους, στο σημείο αυτό αναλύεται προσέγγιση ταυτόχρονης αναβάθμισης η οποία κάνει χρήση TRMs σε συνδυασμό με στρώση θερμομονωτικού υλικού.

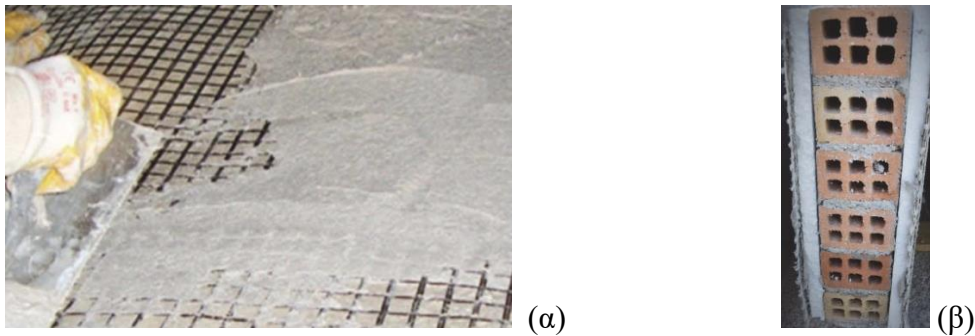
Σύμφωνα με τους Triantafillou et al. (2017) πρόκειται για τη πρώτη προσπάθεια συνδυασμού των ινοπλεγμάτων σε ανόργανη μήτρα με θερμομονωτικό υλικό σε ενιαία διάταξη με σκοπό τη συνδυαστική αναβάθμιση. Για το συγκεκριμένο μονωτικό υλικό η θερμομόνωση δεν έχει τη μορφή κονιάματος όπως στην περίπτωση των ινοπλισμένων πολυμερών αλλά πρόκειται για λεπτή θερμομονωτική στρώση, η οποία συνηθίζεται να είναι προκατασκευασμένη. Ο μανδύας των TRMs δύναται να τοποθετηθεί τόσο εσωτερικά της μονωτικής πλάκας όσο και στις δύο όψεις της, με τη δεύτερη εκδοχή να φαντάζει ιδανικότερη για την προστασία του σχήματος έναντι των ενδεχόμενων σεισμικών φορτίσεων.



Σχήμα 4-7 Διάταξη TRMs με θερμομονωτική στρώση (Triantafillou et al., 2017)

Οι Triantafillou et al. (2017) εκπόνησαν πειραματική διαδικασία δοκιμής του εν λόγω σχήματος. Δημιουργήθηκαν διατάξεις οι οποίες είχαν διαφορετικό αριθμό τοποθετούμενων υφασμάτων TRM. Γενικότερα επρόκειτο για πολυστρωματικές διατάξεις οι οποίες έκαναν χρήση θερμομονωτικών στρώσεων με περιμετρικά τοποθετημένα υφάσματα ινοπλεγμάτων.

Τα δοκίμια καταπονήθηκαν σε καθεστώς ανακυκλιζόμενης φόρτισης. Επιπλέον, εκπονήθηκε δοκιμή πυρκαγιάς για τα ενισχυμένα δοκίμια.



Σχήμα 4-8 (α) Επικάλυψη ινοπλεγμάτων με στρώση θερμομονωτικού υλικού (β) Πλάγια όψη ενισχυμένης τοιχοπλήρωσης παρουσία IAM και θερμομονωτικής στρώσης (Triantafillou et al., 2017)

Σύμφωνα με τους Triantafillou et al. (2017) τα δοκίμια καταπονήθηκαν με διαδοχικούς κύκλους φόρτισης οι οποίοι αφορούσαν προοδευτικά αυξανόμενες μετακινήσεις. Οι μετακινήσεις εφαρμόστηκαν στο κέντρο της πλήρωσης μέσω υδραυλικού εμβόλου. Οι συνηθέστερες μορφές αστοχίας που παρατηρήθηκαν ήταν η θραύση των ινών του υφάσματος, θραύση και αστοχία στην κάτω παρειά της πλήρωσης και πρόωρη αποκόλληση των μανδύων από την πλήρωση και τη θερμομονωτική στρώση. Η κυριότερη μορφή αστοχίας που παρατηρήθηκε φαίνεται επαρκέστερα στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 4-9 Αστοχία ενισχυμένου δοκιμίου (Triantafillou et al., 2017)

Συμπερασματικά σύμφωνα με τους Triantafillou et al. (2017) η συγκεκριμένη διάταξη βελτιώνει την ενεργειακή επάρκεια της κατασκευής αλλά ταυτόχρονα είναι και αποτελεσματικό μέσο για τη δομική της προστασία. Μάλιστα σύμφωνα με τους ερευνητές που εκπόνησαν την πειραματική διαδικασία, ο συνδυασμός των TRMs με μονωτικό υλικό είναι πιο αποτελεσματικός από την μεμονωμένη χρήση των ινοπλεγμάτων όσον αφορά την αντοχή και την πλαστιμότητα. Το κυριότερο συμπέρασμα αφορούσε στον επιτυχή συνδυασμό των ινοπλεγμάτων με τη θερμομόνωση.

Μολονότι η συγκεκριμένη διάταξη ήδη κρίθηκε ως αποτελεσματική, η επιστημονική κοινότητα φαίνεται να προσπαθεί να τη βελτιώσει εκ νέου, κάνοντας έκδηλη την επιθυμία χρήσης των ινοπλεγμάτων ως μέθοδο ταυτόχρονης αναβάθμισης. Στη διεθνή βιβλιογραφία εντοπίζονται προσπάθειες συνδυασμού των TRMs με θερμομονωτικά υλικά. Τα τελευταία χρόνια εξετάζεται η απόκριση ολιστικών συστημάτων τα οποία χρησιμοποιούν πολυουρεθάνες, πάνελ κενού αέρος, υλικά νανομόνωσης κ.λπ. σε συνδυασμό με τα ινοπλέγματα. Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι δοκιμάζεται η χρήση πυρίμαχου θερμομονωτικού κονιάματος σε συνδυασμό με τα TRMs για τη δημιουργία της βέλτιστης λύσης ταυτόχρονης αναβάθμισης.

Πρακτικά ο συνδυασμός των ινοπλεγμάτων με τη θερμομόνωση φαντάζει να είναι η βέλτιστη λύση για τη προστασία του κτιριακού αποθέματος τόσο από την δομική του τρωτότητα όσο και από την ανεπαρκή ενεργειακή του απόδοση. Η επιστημονική κοινότητα συνεχίζει τη μελέτη για τη βελτιστοποίηση των υπάρχουσών τεχνικών και τη δημιουργία νέων, πιο καινοτόμων σχημάτων αναβάθμισης.

5. Γενικά Συμπεράσματα

Σύμφωνα με όσα παρουσιάστηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία, παρατίθενται γενικότερα συμπεράσματα τα οποία αναλύονται επαρκέστερα παρακάτω.

- I. Ο στόχος της Ευρωπαϊκής Ένωσης για την απαλλαγή από τις ανθρακούχες εκπομπές μέχρι το 2050 σε συνδυασμό με την επιτακτική ανάγκη αντιμετώπισης της δομικής ευπάθειας της πλειονότητας των υπάρχουσών κατασκευών καθιστά την αναβάθμιση των υφιστάμενων κατασκευών ως τη βέλτιστη λύση. Μέσω της αναβάθμισης αποφεύγονται οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις των κατεδαφίσεων εντός των αστικών κέντρων, προστατεύεται η ευρωπαϊκή κληρονομιά και εκσυγχρονίζονται οι ευρωπαϊκές κατασκευές.
- II. Οι μέθοδοι τοπικής ενίσχυσης μελών οπλισμένου σκυροδέματος φαντάζουν καταλληλότερες για το επερχόμενο κύμα δομικών αναβαθμίσεων. Οι καθολικές ενισχύσεις επεμβαίνουν σε μεγάλο βαθμό στην κατασκευή, δημιουργούν προβλήματα αρχιτεκτονικού περιεχομένου, έχουν αυξημένο κόστος και ενδέχεται να διακόψουν τη λειτουργία της κατασκευής. Αντίθετα οι τοπικές επεμβάσεις, δεν επηρεάζουν την υπάρχουσα αρχιτεκτονική, κάνουν χρήση καινοτόμων υλικών τα οποία αντιστέκονται στη διάβρωση και καταφέρνουν να μετατρέψουν τα μέλη ΟΣ σε αξιόπιστα στοιχεία ανάληψης δυνάμεων.

- III. Μανδύες οπλισμένου σκυροδέματος, ινοπλισμένα πολυμερή (ΙΟΠ) και ινοπλέγματα σε ανόργανη μήτρα (IAM) είναι τρεις μέθοδοι δομικής ενίσχυσης οι οποίες έχουν αρκετά κοινά χαρακτηριστικά. Παρόλα αυτά, ΙΟΠ και IAM φαίνεται να αντιμετωπίζουν τα προβλήματα των μανδύων ΟΣ, αφού δεν αυξάνουν σημαντικά το πάχος της διατομής, η εφαρμογή τους δεν απαιτεί τη διακοπή λειτουργίας του κτιρίου, κάνουν χρήση σύνθετων υλικών τα οποία παρουσιάζουν ικανότητα παραλαβής μεγάλων εφελκυστικών δυνάμεων και αντιστέκονται στη διάβρωση.
- IV. Οι καινοτόμες μέθοδοι δομικής ενίσχυσης είναι οι πιο κατάλληλες για το επερχόμενο κύμα αναβαθμίσεων. ΙΟΠ και IAM θεωρούνται συγγενικές μέθοδοι ενίσχυσης. Μολονότι οι δύο μέθοδοι έχουν παρόμοια αποτελεσματικότητα σε όρους αύξησης αντοχής, δυσκαμψίας και πλαστιμότητας, τα IAM χάριν της ανόργανης σύστασής τους αντιμετωπίζουν το πρόβλημα των ρητινών, το οποίο αποτελεί ανασταλτικό παράγοντα στην ευρεία εφαρμογή των ΙΟΠ. Συμπερασματικά, τα IAM αποτελούν την πιο καινοτόμα μέθοδο δομικής ενίσχυσης μελών ΟΣ.
- V. Για την πλειονότητα των κατασκευών ΟΣ οι οποίες απαρτίζουν το ευρωπαϊκό κτιριακό απόθεμα, οι εμφανιζόμενες τοιχοπληρώσεις κατασκευάζονταν ως μεμονωμένα στοιχεία μετά τον σκελετό οπλισμένου σκυροδέματος, με αποτέλεσμα να μην συνυπολογίζονται στον σχεδιασμό του συνόλου της κατασκευής. Η παρουσία εμφανιζόμενων τοιχοπληρώσεων οι οποίες δεν λήφθηκαν υπόψιν στους υπολογισμούς κατά την ανέγερση και βρίσκονται σε επαφή με το πλαίσιο ΟΣ εγκυμονεί κινδύνους για τη δομική ασφάλεια του συνόλου της κατασκευής. Για αυτόν τον λόγο η δομική ενίσχυση των τοιχοπληρώσεων κρίνεται αναγκαία για την αντιμετώπιση της δομικής ευπάθειας του συνόλου της κατασκευής.
- VI. Οι πιο συμβατικές τεχνικές ενίσχυσης τοιχοπληρώσεων αφορούν την τοποθέτηση χαλύβδινου πλέγματος, χαλύβδινων βλήτρων και τσιμεντοειδούς κονιάματος. Η εφαρμογή τους κρίνεται αποτελεσματική παρόλα αυτά η απόδοσή τους εξαρτάται από διάφορες παραμέτρους οι οποίες αφορούν τις διαστάσεις και τη γενική κατάσταση της εκάστοτε τοιχοπλήρωσης. Για αυτόν τον λόγο, οι συμβατικές αυτές τεχνικές δεν φαντάζουν ιδανικές για την ευρεία αναβάθμιση κατασκευών ΟΣ.

- VII. Η εφαρμογή καινοτόμων μεθόδων αναβάθμισης δεν περιορίζεται στα στοιχεία ΟΣ. Στη διεθνή βιβλιογραφία εντοπίστηκαν προσπάθειες ενίσχυσης τοιχοπληρώσεων μέσω ΙΟΠ και ΙΑΜ. Η εφαρμογή των ΙΑΜ και σε αυτή τη περίπτωση θεωρείται η ιδανικότερη αφού αντιμετωπίζει τα προβλήματα των ΙΟΠ ενώ ταυτόχρονα η εφαρμογή τους σε τοιχοπληρώσεις κρίθηκε ευεργετική με κυριότερο χαρακτηριστικό την αποφυγή της πρόωρης ψαθυρής αστοχίας η οποία τις χαρακτηρίζει. Συμπερασματικά, χάριν της ευκολίας και της αποτελεσματικότητας των ΙΑΜ επιτυγχάνεται ολοκληρωμένη ενίσχυση κατασκευών ΟΣ.
- VIII. Η καθυστερημένη υιοθέτηση επαρκών ενεργειακών κανονισμών εντείνει την ανάγκη της ενεργειακής αναβάθμισης του μεγαλύτερου μέρους υπαρχουσών κατασκευών. Η εφαρμογή θερμομονωτικών σχημάτων έχει στόχο τον περιορισμό της μεταφοράς θερμικής ενέργειας μεταξύ των εσωτερικών και εξωτερικών χώρων, για αυτό και εγκαθίσταται στα κατασκευαστικά σύνορα του κτιρίου. Πέραν της καινοτομίας των υλικών, σημαντικό ρόλο στην επιτυχία της αναβάθμισης κατέχει η άρτια εφαρμογή και η προστασία του θερμομονωτικού σχήματος από την υγρασία.
- IX. Βέλτιστη λύση σε όρους ενεργειακής αναβάθμισης φαίνεται να είναι η εφαρμογή εξωτερικής θερμομόνωσης στο κέλυφος της κατασκευής. Η συγκεκριμένη τεχνική απαιτεί την τοποθέτηση πρόσθετης στρώσης επιχρίσματος και είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική στη βελτίωση της ενεργειακής επάρκειας του συνόλου της κατασκευής. Παρόλη την καινοτομία η οποία παρατηρείται στην ανάπτυξη εξελιγμένων μονωτικών υλικών παρουσιάζονται ακόμη εμπόδια στην ευρεία εφαρμογή τους. Τα περισσότερα καινοτόμα μονωτικά υλικά χρειάζονται σκληρό περίβλημα προστασίας για να είναι αποτελεσματικά. Επιπλέον, η εφαρμογή τους προϋποθέτει άρτια εξειδίκευση, την οποία τα συνεργεία δεν διαθέτουν. Στην αγορά εντοπίζονται ήδη υλικά κατάλληλα για την ενεργειακή αναβάθμιση του κτιριακού αποθέματος και με τον τρέχοντα ρυθμό εξέλιξής τους τα επόμενα χρόνια καινοτόμα υλικά θα είναι έτοιμα για εφαρμογή.
- X. Η ταυτόχρονη δομική και ενεργειακή αναβάθμιση υφιστάμενων κατασκευών απαντά ταυτόχρονα στα προβλήματα τα οποία ταλανίζουν το κτιριακό απόθεμα. Τα κυριότερα πλεονεκτήματα της ολιστικής επέμβασης αφορούν στο βραχυπρόθεσμο διάστημα αποπληρωμής του ποσού επένδυσης, στην εντατικοποίηση των κινήτρων που χρειάζονται οι ευρωπαίοι πολίτες για να

προβούν στην αναβάθμιση των κτιρίων τους, στη λειτουργία της ως μέσο επίτευξης των πολιτικών της Ευρωπαϊκής Ένωσης και κυριότερα στην εξασφάλιση της παράτασης του αποδοτικού χρόνου λειτουργίας της κατασκευής.

- XI. Τα ινοπλέγματα σε ανόργανη μήτρα (IAM) θεωρούνται η καταλληλότερη μέθοδος δομικής ενίσχυσης κατασκευών. Ο συνδυασμός τους με στρώση θερμομονωτικού υλικού κρίθηκε ιδιαίτερα αποτελεσματικός και βελτίωσε την απόδοση της τεχνικής σε όρους αντοχής και πλαστιμότητας. Το εν λόγω υλικό κρίνεται ιδιαίτερα ελπιδοφόρο και ανοίγει τον δρόμο για την ταυτόχρονη αναβάθμιση του ευρωπαϊκού κτιριακού αποθέματος.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- *Διεθνής Βιβλιογραφία*

Akhoundi, F., Vasconcelos, G., & Lourenço, P. (2018). In-plane behavior of infills using glass fiber shear connectors in textile reinforced mortar (TRM) technique. *International Journal of Structural Glass and Advanced Materials Research*, 2(1), 1-14.

Al-Salloum, Y. A., Elsanadedy, H. M., Alsayed, S. H., & Iqbal, R. A. (2012). Experimental and numerical study for the shear strengthening of reinforced concrete beams using textile-reinforced mortar. *Journal of Composites for Construction*, 16(1), 74-90.

Alagusundaramoorthy, P., Harik, I. E., & Choo, C. C. (2003). Flexural behavior of R/C beams strengthened with carbon fiber reinforced polymer sheets or fabric. *Journal of composites for Construction*, 7(4), 292-301.

Altın, S., Anil, Ö., Kara, M. E., & Kaya, M. (2008). An experimental study on strengthening of masonry infilled RC frames using diagonal CFRP strips. *Composites Part B: Engineering*, 39(4), 680-693.

Altın, S., Anil, Ö., Koprıman, Y. A. Ğ. M. U. R., & Belgin, Ç. A. Ğ. A. T. A. Y. (2010). Strengthening masonry infill walls with reinforced plaster. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings*, 163(5), 331-342.

Alwashali, H., Sen, D., Maeda, M., & Seki, M. Advantages and limitations of retrofitting masonry infilled RC Frames by Ferro-cement based on experimental observations.

An, E. U. (2013). Strategy on adaptation to climate change. Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions, COM, 216.

Baetens, R., Jelle, B. P., & Gustavsen, A. (2011). Aerogel insulation for building applications: a state-of-the-art review. *Energy and Buildings*, 43(4), 761-769.

Baetens, R., Jelle, B. P., Gustavsen, A., & Grynning, S. (2010). Gas-filled panels for building applications: A state-of-the-art review. *Energy and Buildings*, 42(11), 1969-1975.

Baetens, R., Jelle, B. P., Thue, J. V., Tenpierik, M. J., Grynning, S., Uvsløkk, S., & Gustavsen, A. (2010). Vacuum insulation panels for building applications: A review and beyond. *Energy and Buildings*, 42(2), 147-172.

Booth, E. D., & Key, D. (2006). *Earthquake design practice for buildings*. London: Thomas Telford.

Borri, A., Corradi, M., Sisti, R., Buratti, C., Belloni, E., & Moretti, E. (2016). Masonry wall panels retrofitted with thermal-insulating GFRP-reinforced jacketing. *Materials and Structures*, 49(10), 3957-3968.

Bournas, D. (2018). *Innovative materials for seismic and energy retrofitting of the existing EU buildings*. Publications Office of the European Union: Luxembourg.

Bournas, D. A. (2018). Concurrent seismic and energy retrofitting of RC and masonry building envelopes using inorganic textile-based composites combined with insulation materials: A new concept. *Composites Part B: Engineering*, 148, 166-179.

Brussels, B. (2011). *Tackling the challenges in commodity markets and on raw materials*. COM (2011), 25.

Caverzan, A., Tornaghi, M. L., & Negro, P. *Proceedings of SAFESUST Workshop*.

Chen, G. M., Zhang, Z., Li, Y. L., Li, X. Q., & Zhou, C. Y. (2016). T-section RC beams shear-strengthened with anchored CFRP U-strips. *Composite Structures*, 144, 57-79.

da Porto, F., Guidi, G., Verlato, N., & Modena, C. (2015). Effectiveness of plasters and textile reinforced mortars for strengthening clay masonry infill walls subjected to combined in-plane/out-of-plane actions/Wirksamkeit von Putz und textilibewehrtem Mörtel bei der Verstärkung von Ausfachungswänden aus Ziegelmauerwerk, die kombinierter Scheiben-und Plattenbeanspruchung ausgesetzt sind. *Mauerwerk*, 19(5), 334-354.

Dodd, N., Donatello, S., Garbarino, E., & Gama-Caldas, M. (2015). Identifying macro-objectives for the life cycle environmental performance and resource efficiency of EU buildings.

Economidou, M., Atanasiu, B., Despret, C., Maio, J., Nolte, I., Rapf, O., ... & Zinetti, S. (2011). Europe's buildings under the microscope. A country-by-country review of the energy performance of buildings.

Elastogran GmbH, Lemforde Germany, Thermal Insulation with Elastopor® H spray foam.

Elhemamy, S. T., & Sirag, N. M. Global Journal of Engineering Science and Research Management.

Elsanadedy, H. M., Al-Salloum, Y. A., Al-Zaheri, Z. M., Alsayed, S. H., & Abbas, H. (2016). Behavior and design aspects of FRP-strengthened URM walls under out-of-plane loading. *Journal of Composites for Construction*, 20(6), 04016048.

Elsanadedy, H. M., Almusallam, T. H., Alsayed, S. H., & Al-Salloum, Y. A. (2013). Flexural strengthening of RC beams using textile reinforced mortar—Experimental and numerical study. *Composite Structures*, 97, 40-55.

Erol, G., & Karadogan, H. F. (2016). Seismic strengthening of infilled reinforced concrete frames by CFRP. *Composites Part B: Engineering*, 91, 473-491.

EU Commission. (2011). Roadmap to a resource efficient Europe. COM (2011), 571.

European Commission. (2015). Closing the loop-An EU action plan for the Circular Economy. COM (2015) 614 final.

European Parliament and Council of the European Union. (2013). Decision No 1386/2013/EU of the European Parliament and of the Council of 20 November 2013 on a General Union Environment Action Programme to 2020 'Living well, within the limits of our planet'. Official journal of the European Union.

European Parliament. (2008). Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council of 19 November 2008 on waste and repealing certain Directives. Official Journal of the European Union, 312, 3-30.

European Parliament. (2010). Directive 2010/75/EU of the European Parliament and of the Council of 24 November 2010 on industrial emissions (integrated pollution prevention and control). Official Journal of the European Union, L-334.

European Union. (2018). Directive (EU) 2018/844 of the European Parliament and of the Council of 30 May 2018 amending Directive 2010/31/EU on the energy performance of buildings and Directive 2012/27/EU on energy efficiency. Official Journal of the European Union, 156(75).

Fardis, M. N. (2009). Seismic design, assessment and retrofitting of concrete buildings: based on EN-Eurocode 8 (Vol. 8). Berlin: Springer.

Gallardo-Vázquez, D., Valdez-Juárez, L. E., & Lizcano-Álvarez, J. L. (2019). Corporate Social Responsibility and Intellectual Capital: Sources of competitiveness and legitimacy in organizations' management practices. *Sustainability*, 11(20), 5843.

Giuriani, E., & Marini, A. (2008). Wooden roof box structure for the anti-seismic strengthening of historic buildings. *International Journal of Architectural Heritage*, 2(3), 226-246.

Gkournelos, P., Bournas, D. A., & Triantafillou, T. (2019). Combined Seismic and Energy Upgrading of Existing Buildings using Advanced Materials.

Hurtado, P. L., Rouilly, A., Vandebossche, V., & Raynaud, C. (2016). A review on the properties of cellulose fibre insulation. *Building and environment*, 96, 170-177.

Jelle, B. P. (2011). Traditional, state-of-the-art and future thermal building insulation materials and solutions—Properties, requirements and possibilities. *Energy and buildings*, 43(10), 2549-2563.

Jelle, B. P., Gustavsen, A., & Baetens, R. (2010). The path to the high performance thermal building insulation materials and solutions of tomorrow. *Journal of building physics*, 34(2), 99-123.

Jelle, B. P., Gustavsen, A., Grynning, S., & Baetens, R. (2010). How Might Nano Technology Improve the Thermal Performance of the Concrete Buildings of Tomorrow?. *Concrete ideas for Passive Houses*, 49.

Kingspan Insulation LLC, Atlanta Georgia, GreenGuard XPS Insulation Board, Installation Guidelines, First Revision July 2016.

Kong, J. C., Zhai, C. H., & Liu, C. H. (2015). Two-way seismic behaviour of concrete frames with infill walls. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings*, 168(9), 649-663.

Kose, M. M., & Karslioglu, O. (2011). Effects of infill walls on base responses and roof drift of reinforced concrete buildings under time-history loading. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 20(3), 402-417.

Koutas, L. N., & Bournas, D. A. (2019). Out-of-plane strengthening of masonry-infilled RC frames with textile-reinforced mortar jackets. *Journal of Composites for Construction*, 23(1), 04018079.

Koutas, L., Bousias, S. N., & Triantafillou, T. C. (2015). Seismic strengthening of masonry-infilled RC frames with TRM: Experimental study. *Journal of Composites for Construction*, 19(2), 04014048.

Kyriakides, M. A., & Billington, S. L. (2014). Cyclic response of nonductile reinforced concrete frames with unreinforced masonry infills retrofitted with engineered cementitious composites. *Journal of Structural Engineering*, 140(2), 04013046.

Lotfi, H. R., & Shing, P. B. (1991). An appraisal of smeared crack models for masonry shear wall analysis. *Computers & structures*, 41(3), 413-425.

Manganelli, B., Mastroberti, M., & Vona, M. (2018, May). Evaluation of benefits for integrated seismic and energy retrofitting for the existing buildings. In *International Symposium on New Metropolitan Perspectives* (pp. 654-662). Springer, Cham.

Margani, G., Evola, G., Tardo, C., & Marino, E. M. (2020). Energy, seismic, and architectural renovation of RC framed buildings with prefabricated timber panels. *Sustainability*, 12(12), 4845.

Marini, A., Passoni, C., Riva, P., Negro, P., Romano, E., & Taucer, F. (2014). Technology options for earthquake resistant, eco-efficient buildings in Europe: Research needs. European Commission, Joint Research Centre Scientific and Policy Reports.

Mastroberti, M., Bournas, D., Vona, M., Manganelli, B., & Palermo, V. (2018). Combined seismic plus energy retrofitting for the existing RC buildings: economic feasibility. In 16th European Conference on Earthquake Engineering (16ECEE).

Mehrabi, A. B., Benson Shing, P., Schuller, M. P., & Noland, J. L. (1996). Experimental evaluation of masonry-infilled RC frames. *Journal of Structural engineering*, 122(3), 228-237.

Mohyeddin, A., Goldsworthy, H. M., & Gad, E. F. (2013). FE modelling of RC frames with masonry infill panels under in-plane and out-of-plane loading. *Engineering Structures*, 51, 73-87.

Negro, P., Dimova, S., Bournas, D., Tsionis, G., & Strezova, D. (2020, September). Integrated Techniques for the Seismic Strengthening and Energy Efficiency of Existing Buildings: A Pilot Project. In *Proceedings of the 17th World Conference on Earthquake Engineering (17WCEE)*, Sendai, Japan (pp. 13-18).

Nishi, T., Suzuki, S., Aoki, M., Sawada, T., & Fukuda, S. (2019). International investigation of shear displacement capacity of various elastomeric seismic-protection isolators for buildings. *Journal of Rubber Research*, 22(1), 33-41.

Palieraki, V., Zeris, C., Vintzileou, E., & Adami, C. E. (2018). In-plane and out-of-plane response of currently constructed masonry infills. *Engineering Structures*, 177, 103-116.

Papanicolaou, C., Triantafillou, T., & Lekka, M. (2011). Externally bonded grids as strengthening and seismic retrofitting materials of masonry panels. *Construction and Building Materials*, 25(2), 504-514.

Paul, A., (2016), *Base Isolation System: Outline on Principles, Types, Advantages & Applications*, Civil-digital.

PETRUȘ, C., ION, A., STOIAN, V., & MOȘOARCĂ, M. INVESTIGATIONS ON THE OUT-OF-PLANE BEHAVIOUR OF MASONRY INFILL WALLS INVESTIGAREA COMPORTĂRII ÎN AFARA PLANULUI A PEREȚILOR NESTRUCTURALI DIN ZIDĂRIE DE CĂRĂMIDĂ.

Pohoryles, D. A., & Bournas, D. A. (2020). Seismic retrofit of infilled RC frames with textile reinforced mortars: State-of-the-art review and analytical modelling. *Composites Part B: Engineering*, 183, 107702.

Pohoryles, D. A., Maduta, C., Bournas, D. A., & Kouris, L. A. (2020). Energy performance of existing residential buildings in Europe: A novel approach combining energy with seismic retrofitting. *Energy and Buildings*, 223, 110024.

Pohoryles, D. A., Melo, J., Rossetto, T., D'Ayala, D., & Varum, H. (2018). Experimental comparison of novel CFRP retrofit schemes for realistic full-scale RC beam-column joints. *Journal of Composites for Construction*, 22(5), 04018027.

Realfonzo, R., & Napoli, A. (2009). Cyclic behavior of RC columns strengthened by FRP and steel devices. *Journal of Structural Engineering*, 135(10), 1164-1176.

Recast, E. P. B. D. (2010). Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings (recast). *Official Journal of the European Union*, 18(06), 2010.

REGULATION (EC) No 614/2007 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 23 May 2007 concerning the Financial Instrument for the Environment (LIFE+).

REGULATION (EU) No 305/2011 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 9 March 2011 laying down harmonised conditions for the marketing of construction products and repealing Council Directive 89/106/EEC.

Sagar, S. L., Singhal, V., & Rai, D. C. (2019). In-plane and out-of-plane behavior of masonry-infilled RC frames strengthened with fabric-reinforced cementitious matrix. *Journal of composites for construction*, 23(1), 04018073.

Selim, M., Okten, C., & Ozkan, M. (2015, June). Behavior of RC frames with infill walls strengthened by cement based composites. In *The Twenty-fifth International Ocean and Polar Engineering Conference*. OnePetro.

Smiroldo, F., Giongo, I., & Piazza, M. SEISMIC RETROFIT OF MASONRY INFILLED FRAMES BY USING TIMBER PANELS.

Stavridis, A., Koutromanos, I., & Shing, P. B. (2012). Shake-table tests of a three-story reinforced concrete frame with masonry infill walls. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 41(6), 1089-1108.

Tetta, Z. C., Koutas, L. N., & Bournas, D. A. (2018). Shear strengthening of concrete members with TRM jackets: Effect of shear span-to-depth ratio, material and amount of external reinforcement. *Composites Part B: Engineering*, 137, 184-201.

The Cellulose Insulation Manufacturers Association, Dayton Ohio, Standard practice for installing cellulose building insulation. CIMA technical bulletin #2.

Thermou, G. E., & Hajirasouliha, I. (2018). Compressive behaviour of concrete columns confined with steel-reinforced grout jackets. *Composites Part B: Engineering*, 138, 222-231.

Thermou, G. E., & Pantazopoulou, S. J. (2011). Assessment indices for the seismic vulnerability of existing RC buildings. *Earthquake engineering & structural dynamics*, 40(3), 293-313.

Triantafillou, T. (2016). Strengthening of existing concrete structures: Concepts and structural behavior. In *Textile fibre composites in civil engineering* (pp. 303-322). Woodhead Publishing.

Triantafillou, T. C., Karlos, K., Kefalou, K., & Argyropoulou, E. (2017). An innovative structural and energy retrofitting system for URM walls using textile reinforced mortars combined with thermal insulation: Mechanical and fire behavior. *Construction and Building Materials*, 133, 1-13.

Tsionis, G., Apostolska, R., & Tauver, F. (2014). Seismic strengthening of RC buildings. Luxembourg: Publications Office.

Union, E. (2009). Directive 2009/28/EC of the European Parliament and of the Council of 23 April 2009 on the promotion of the use of energy from renewable sources and amending and subsequently repealing Directives 2001/77/EC and 2003/30/EC. *Official Journal of the European Union*, 5, 2009.

US GreenFiber LLC, Charlotte NC, Cellulose Installation Guide.

Vicente, R. S., Rodrigues, H., Varum, H., Costa, A., & da Silva, J. A. R. M. (2012). Performance of masonry enclosure walls: lessons learned from recent earthquakes. *Earthquake engineering and engineering vibration*, 11(1), 23-34.

Vougioukas, E. (2012). Out-of-plane response of infill masonry walls. *The Open Construction and Building Technology Journal*, 6(1).

Warn, G. P., & Ryan, K. L. (2012). A review of seismic isolation for buildings: historical development and research needs. *Buildings*, 2(3), 300-325.

- ***Ελληνική Βιβλιογραφία***

Knauf Insulation, (04/2016), Εξωτερική Θερμοπρόσοψη με Πετροβάμβακα, Πυροπροστασία, Ηχοαπορρόφηση, Διαπνοή-Βιοκλιματική Διαχείριση Υγρασίας.

Knauf Insulation, (09/2009), Θερμομόνωση και Ανακαίνιση.

Δρίτσος, Σ. (2005). Επισκευές και ενισχύσεις κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα. Εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών, Πάτρα.

Κούτας, Λ. (2014). Νέες τεχνικές και υλικά για την ενίσχυση πλαισίων οπλισμένου σκυροδέματος μέσω εμφαντούμενης τοιχοποιίας: πειραματική και αναλυτική μελέτη (Doctoral dissertation, University of Patras).

Κρεβάικας, Θ. (2005). Συμβολή στην αναλυτική και πειραματική μελέτη φέρουσας τοιχοποιίας ενισχυμένης με σύνθετα υλικά.

Σκυριανού, Ι., Μηλιώτη, Ε., Μοσχοπούλου, Σ., Μπακάλη, Α., (2019), Ο ρόλος των εμφαντούμενων τοιχοπληρώσεων στη σεισμική απόκριση πλαισιακών κατασκευών Οπλισμένου Σκυροδέματος, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών.

Σπυράκος, Κ., (2021), Ικανοτικός Σχεδιασμός, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Δομοστατικός Τομέας.

Στρεπέλιας, Η. (2012). Ενίσχυση υφιστάμενων πλαισιακών κατασκευών με εμφάτνωση απο ΟΣ: πειραματική και αναλυτική διερεύνηση (Doctoral dissertation).

Τριανταφύλλου, Α. Χ. (2006). Ενισχύσεις κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος και φέρουσας τοιχοποιίας με σύνθετα υλικά. Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πάτρα.