

## ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΣΤΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΤΗΣ ΣΥΝΔΥΑΣΤΙΚΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΑΝΑΒΑΘΜΙΣΗΣ ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

### ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΠΑΠΑΘΑΝΑΣΗΣ

Διπλ. Πολ. Μηχανικός Παν. Πατρών, (2021), Μηχ. Κατασκευής ΤΕΡΝΑ, [kostaspathanasis097@gmail.com](mailto:kostaspathanasis097@gmail.com)  
<https://www.linkedin.com/in/konstantinos-papathanasis-8a8b17236>

### ΜΙΧΑΗΛ ΔΗΜΗΤΡΙΑΔΗΣ

Διπλ. Πολ. Μηχανικός Παν. Πατρών, (2020), Μετ. Φοιτητής ΔΠΜΣ ΕΜΠ, [dmdimitriadismichalis@gmail.com](mailto:dmdimitriadismichalis@gmail.com)  
<https://www.linkedin.com/in/michalis-dimitriadis-60b504287>

### Περίληψη

Η παρούσα εργασία αναλογιζόμενη αφενός τη σεισμική τρωτότητα της μεγάλης πλειονότητας των υφιστάμενων κατασκευών σε χώρες της Νότιας Ευρώπης και αφετέρου τη φτωχή ενεργειακή αποδοτικότητα του κτιριακού αποθέματος διερευνά την έως τώρα συσσωρευμένη επιστημονική γνώση για την επίτευξη ταυτόχρονης σεισμικής και ενεργειακής αναβάθμισης. Αρχικά, εξετάζονται οι λόγοι και ο βαθμός επιτακτικότητας των επεμβάσεων προς τις δύο κατευθύνσεις βελτίωσης της κτιριακής συμπεριφοράς. Αυτός κυρίως απορρέει τόσο από την εικόνα παλαιότητας του δομικού πλούτου της χώρας μας που δεν συμπλέει με τις σύγχρονες αντισεισμικές και ενεργειακές διατάξεις, όσο και από την επιδίωξη της μετάβασης των κατασκευών σε βέλτιστα επίπεδα βιωσιμότητας (sustainability), περιβαλλοντικού αποτυπώματος και ανθεκτικότητας (resilience) ελέω της κλιματικής κρίσης (Green Deals). Η έως τώρα κοινή πρακτική και γνώση συνιστά η δομική και ενεργειακή βελτίωση να υλοποιούνται χωριστά και ανεξάρτητα όντας έτσι οικονομικά επιβαρής. Προς αυτή τη κατεύθυνση, παρουσιάζεται ένα πανόραμα τεχνικών λύσεων, ως η τελευταία λέξη της τεχνολογίας, που επιτυγχάνονται με την ίδια και μοναδική παρέμβαση και αποδεικνύεται ότι επιφέρουν οικονομική αποδοτικότητα, βιοκλιματική συνεισφορά, αρχιτεκτονική ανανέωση και υπεραξία ακινήτου ενώ η δομοστατική και ενεργειακή τους συμβολή είναι αντίστοιχη με τον αν συνέβαιναν ανεξάρτητα. Αυτές αφορούν τόσο κτίρια Ο/Σ, σύμμικτες κατασκευές όσο και κτίρια φέρουσας τοιχοποιίας (ενδεχομένως και ιστορικής αξίας) ενώ γενικώς κατηγοριοποιούνται ως εξής: 1) έξυπνα υλικά υψηλής επιτελεστικότητας (τύπου TRM) εφαρμοσμένα σε τσιμεντοειδές κονίαμα με υψηλές θερμοδυναμικές και υδρομονωτικές ιδιότητες 2) δομικά πλαίσια, συνήθως μεταλλικά, τα οποία κατασκευάζονται εξωτερικά του περιμετρικού φορέα του κτιρίου (exoskeletons) και φέρουν δευτερεύοντα δομικά στοιχεία (τύπου περσίδες) για τη θερμική κάλυψη του κτιρίου και τη βελτίωση της βιοκλιματικής του συμπεριφοράς 3) οικολογικά φυσικά προϊόντα (π.χ. xlam panels, panels από μπαμπού) που συνδυάζουν υψηλή αντισεισμική αντοχή και ηλεκτρική αγωγιμότητα. Για κάθε τεχνική λύση, πραγματοποιείται βιβλιογραφική ανασκόπηση εξαργυρώνοντας όλες τις διαθέσιμες πηγές και αναλύεται η κατασκευασισμότητά της, η ευκολία ή τα εμπόδια και ο χρόνος τοποθέτησης, το κόστος, η όχληση των ενοίκων, η απόσβεση της αρχικής επένδυσης, η περιβαλλοντολογική επιβάρυνση σε όρους αειφορίας και η σεισμική – ενεργειακή αποδοτικότητα.

### 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ - ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ

Ο σειсмоγενής χαρακτήρας της χώρας μας είναι αδιαμφισβήτητος, με τον ΟΑΣΠ να την κατατάσσει ως 6<sup>η</sup> παγκοσμίως σχετικά με τη συχνότητα σεισμικών διεγέρσεων. Η βλαπτική φύση τέτοιων φυσικών δράσεων είναι εντονότερη για τις υφιστάμενες κατασκευές οι οποίες δεν συμπλέουν γεωμετρικά, μηχανικά και κατασκευαστικά με τις σύγχρονες αντισεισμικές διατάξεις παρουσιάζοντας αυξημένη σεισμική τρωτότητα και λόγω παλαιότητας (το 75% προ του 1985). Παρόλη τη σπουδαία ερευνητική δραστηριότητα που έχει καταβληθεί τα τελευταία χρόνια προς τη κατεύθυνση της αντισεισμικής τους θωράκισης και ανθεκτικότητας με την θεσμοθέτηση κανονιστικών πλαισίων (ΚΑΝΕΠΕ, ΚΑΔΕΤ) και την ανάπτυξη τεχνικών λύσεων επισκευής και ενίσχυσης, στη πράξη ο μεγαλύτερος δομικός πλούτος παραμένει σεισμικά ευάλωτος με τους ετήσιους ρυθμούς επεμβάσεων να διατηρούνται σε πολύ χαμηλά επίπεδα (<1%) εκθέτοντας το κοινωνικοοικονομικό αντίκτυπο των σεισμικών γεγονότων σε δυσμενή μέγεθος.

Ταυτοχρόνως της ανάγκης για ενίσχυση σε όρους δομοστατικών, η ενεργειακή φτώχεια και η κλιματική κρίση του πλανήτη επιτάσσει τη πράσινη μετάβαση σε πιο βιώσιμες κατασκευές. Με αειφόρο οδηγό τα Green Deals της European Commission και στόχο την κατά 55% μείωση των ρύπων έως το 2030 και την κλιματική ουδετερότητα το 2050, απαιτείται ο ενεργειακός ανασχεδιασμός και αναβάθμιση του κτιριακού αποθέματος, καθώς αυτός ευθύνεται για το 40% κατανάλωσης ενέργειας και για το 36% παραγωγής CO<sub>2</sub>.

Ο συλλογισμός των παραπάνω στοιχείων οδηγούν στο συμπέρασμα ότι ο υφιστάμενος δομικός πλούτος χρήζει άμεσης δομοστατικής ενίσχυσης έναντι δυναμικών φορτίσεων αλλά και ενεργειακής βελτίωσης μειώνοντας το περιβαλλοντικό του αποτύπωμα. Συνήθως αυτά τα δύο είδη επεμβάσεων επιλέγονται χωριστά, όντας έτσι ιδιαίτερα οικονομικά επιβάρη. Για το λόγο αυτό η παρούσα εργασία εξετάζει την περίπτωση της συνδυαστικής τους εφαρμογής, αποφέροντας οικονομική αποδοτικότητα, βιοκλιματική συνεισφορά, αρχιτεκτονική ανανέωση και υπεραξία ακινήτου ενώ η δομοστατική και ενεργειακή τους συμβολή είναι αντίστοιχη με τον αν συνέβαιναν ανεξάρτητα.

Η γήρανση του κτιριακού αποθέματος επηρεάζει πολλές περιοχές ανά τον κόσμο, όπου μεγάλο ποσοστό των υφιστάμενων κτιρίων κρίνεται ενεργειακά αναποτελεσματικό (απαιτείται πολύ ενέργεια για ψύξη και θέρμανση) ενώ η διαστασιολόγηση ο οπλισμός προέκυψαν σύμφωνα με παλαιότερους κανονισμούς (οι σεισμικές απαιτήσεις πλέον είναι άλλες). Μέσω συνδυαστικής αναβάθμισης είναι δυνατόν να βελτιωθεί η ενεργειακή τους απόδοση μειώνοντας τον αντίκτυπο τους στο φαινόμενο του θερμοκηπίου. Ειδικότερα η ταυτόχρονη αναβάθμιση της σεισμικής και της ενεργειακής απόδοσης επιτυγχάνει την καλύτερη αναλογία μεταξύ κόστους και αποτελεσματικότητας (ασφάλειας & οικονομικής λειτουργίας). Το σύνολο των μεθόδων δύναται να κατηγοριοποιηθεί στις εξής κατηγορίες: i) ενσωματωμένα πλησίον της κατασκευής συστήματα «exoskeleton», ii) ενσωματωμένες λύσεις-επικολητές ή εντός του σώματος των μελών (ενίσχυση ανοιγμάτων των τοιχωδομών), iii) αντικατάσταση υλικών με άλλα διαφορετικών χαρακτηριστικών, iv) διαφραγματικές επεμβάσεις σε δάπεδα και οροφές.

## 2. ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΛΥΣΕΩΝ EXOSKELETON

Ως «exoskeleton» ορίζουμε μεταλλικές ή προκατασκευασμένες (RC) κατασκευές που πλαισιώνουν εξωτερικά ένα κτίριο υποβαστάζοντας το, βελτιώνοντας την συμπεριφορά του σε πλευρικές φορτίσεις. Οι κατασκευές αυτές φέρουν δική τους θεμελίωση και συνδέονται με άκαμπτες συνδέσεις σε κατάλληλα σημεία ευάλωτων κτιρίων σε σεισμικές δράσεις.

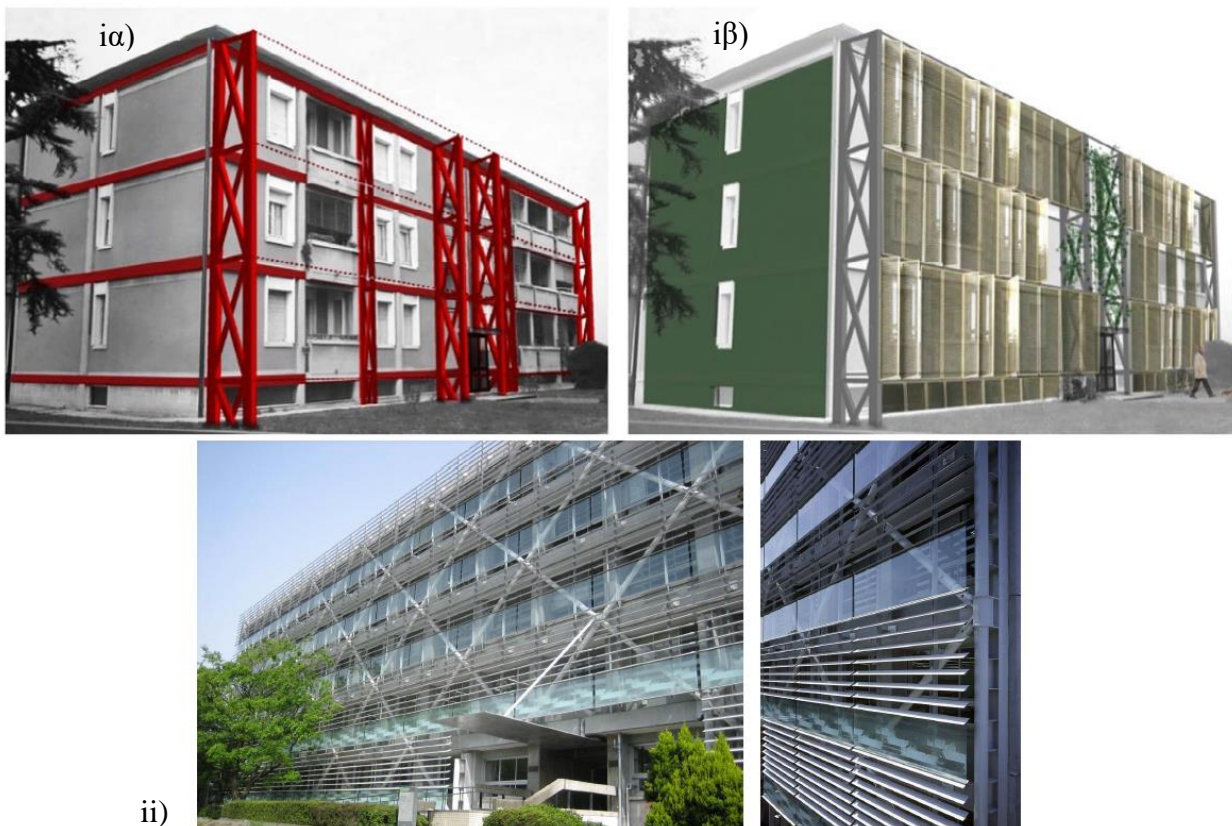
Με την συγκεκριμένη τεχνολογία προσφέρεται πέρα της σεισμικής και ενεργειακής αναβάθμισης των δομών πυρασφάλεια, χώρος για τεχνολογικές εγκαταστάσεις, καλωδιώσεις καθώς και επιπλέον χώροι αναψυχής με μεγάλη ποικιλία ως προς τη «νέα» αισθητική όψη των κτιρίων. Δύναται να αλλάξει ριζικά την εμφάνιση του κτιρίου προσφέροντας ενεργειακές ζώνες διαθέσιμες προς αξιοποίηση (μείωση της ακτινοβολίας, παροχή ηλιακής θέρμανσης τον χειμώνα) καθώς και τις ανάγκες των χρηστών (επιπλέον χώροι, δωμάτια, μπαλκόνια, ηλιόλουστοι χώροι, πράσινοι χώροι). Τα παραπάνω ασφαλώς και προμηνύουν μια αύξηση της ακίνητης αξίας, με την προσφορά επιπλέον ανέσεων, ακόμη και σε άτομα της τρίτης ηλικίας που έχουν την επιθυμία της αποκέντρωσης. Η εφαρμογή της μεθόδου λαμβάνει χώρα εξωτερικά έτσι δεν διαταράσσει την λειτουργία του κτιρίου όπως άλλες διαδικασίες (π.χ. προσθήκη κατασκευών-χύτευση σκυροδέματος εντός του κτιρίου) που χαρακτηρίζονται περιπλοκότερες.

Η επιλογή αυτή αν και περιορίζεται σε κτίρια των οποίων τα όρια δύνανται να διευρυνθούν ξεπερνάνε πλήθος άλλων περιορισμών όπως [1]:

- Συνδυασμός πολλών επεμβάσεων σε ένα μόλις στάδιο.
- Διατήρηση της λειτουργίας του κτιρίου ως είχε (π.χ. οι ένοικοι δεν χρειάζεται να εγκαταλείψουν το κτίριο).

- Σύντομο χρονικό διάστημα και χαμηλό κόστος.
- Δυνατότητα προσθήκης νέου ορόφου.
- Αλλαγή εξωτερικής εμφάνισης του κτιρίου.
- Αύξηση αντικειμενικής αξίας.

Η πρώτη συνδυασμένη εφαρμογή έγινε στο κτίριο Midorigaoka-1 του Ινστιτούτου του Τόκιο, όπου διήρκεσε 9 μήνες χωρίς την ανάγκη μετεγκατάστασης των ενοικιαστών. Περιλάμβανε έναν εξωσκελετό σε συνδυασμό με μεταλλικά στοιχεία που προσφέρουν δυσκαμψία (Buckling-Restrained Bracing frame - BRB) για πρόσθετη ικανότητα ανάληψης σεισμικής ενέργειας και περσίδες για βελτιωμένη σκίαση, μειώνοντας έτσι τις επιρροές της ηλιακής ακτινοβολίας. Ακόμη δυνατή είναι η διάκριση των «exoskeleton» σε δύο κύριες κατηγορίες: (i) συστήματα που μοιάζουν με τοίχους και (ii) συστήματα που είναι όμοια με κελύφη.



Εικόνα 1: iα) Σύστημα exoskeleton με την λειτουργία τοίχου [2] iβ) Σύστημα exoskeleton με την λειτουργία τοίχου και προσθήκη ενεργειακών τεχνολογιών [2] ii) Συστήματα exoskeleton όμοια με κελύφη – Κτίριο Midorigaoka-1 [3]

Ωστόσο, οι λύσεις εξωσκελετού δεν είναι πάντα εφαρμόσιμες λόγω της ανάγκης διαθέσιμου χώρου γύρω από τη δομή καθώς και της ανάγκης για ένα πρόσθετο σύστημα θεμελίωσης (μη εφικτό σε πυκνά δομημένες περιοχές) ενώ επιφέρουν σημαντική αλλαγή της εξωτερικής εμφάνισης της δομής, η οποία μπορεί να μην είναι επιθυμητή ή επιτρεπτή σε ορισμένες περιπτώσεις. Επιπλέον, συνήθως οι δυνάμεις μεταφέρονται από το υπάρχον κτίριο στον εξωσκελετό μέσω συνδέσεων στο επίπεδο του δαπέδου, εάν το οριζόντιο διάφραγμα δεν είναι αρκετά άκαμπτο και ανθεκτικό, η παρέμβαση μπορεί να μην είναι αποτελεσματική.

Στην έρευνα των [4] προέκυψε ότι αυτή η μορφή επέμβασης αποτρέπει την ψαθυρή μορφή διατηρητικής αστοχίας ακόμα και για 2% μετατόπιση μεταξύ των ορόφων, δίχως την

εμφάνιση βλαβών στο μεταλλικό πλαίσιο. Στην μελέτη των [4] παρατηρήθηκε μείωση της ηλιακής ακτινοβολίας έως και 66% με την χρήση περσίδων και μείωση της ετήσιας κατανάλωσης έως και 8%. Η ενσωμάτωση θερμομονωτικών (EPS), νέων παράθυρων και περσίδων που εξετάστηκε από τους [5] σε μετέπειτα έρευνες του Ιταλικού κώδικα αποδείχθηκε ότι συμβάλει στην μείωση κατά 70% της καταναλισκόμενης ενέργειας.

Στην ευρωπαϊκή έρευνα Pro-GET-onE [6] ερευνήθηκε η προσθήκη μεταλλικών στοιχείων περιμετρικά του κτιρίου αλλά και η σύνδεση αυτών (η ένωση πραγματοποιείται πάνω του κτιρίου) σε σχέση με το κτίριο αναφοράς (άοπλο). Σύμφωνα με τις κατευθυντήριες γραμμές του Ιταλικού κώδικα NTC 2008 που αναφέρεται στον Ευρωκώδικα 8 πραγματοποιήθηκε γραμμική δυναμική ανάλυση με βάση τα χαρακτηριστικά της περιοχής ( $a_g=0.116g$ ,  $F_0=2.398$ ,  $T_c=0.310$ ). Υπογραμμίζεται ότι η θεμελιώδης ιδιοπερίοδος αποτελεί βασικό χαρακτηριστικό για την αξιολόγηση των τάσεων της σεισμικής φόρτισης. Η μεταλλική κατασκευή που είναι συνδεδεμένη με τον υφιστάμενο φορέα προσδίδει αύξηση της ακαμψίας του δομήματος με ελάχιστη αύξηση της συνολικής μάζας, μειώνοντας την περίοδο του μοντέλου. Όσον αφορά τα αποτελέσματα του πειράματος αναφέρεται ότι η ενίσχυση με την χρήση χαλύβδινων στοιχείων σε συνεργασία με πλάκες XLAM επέφερε μείωση στις προκαλούμενες μετατοπίσεις όπως και στις εσωτερικές δυνάμεις με τα αποτελέσματα να είναι εντονότερα όταν πραγματοποιείται και σύνδεση αυτών στην κορυφή του κτιρίου.

Η αύξηση του πάχους του «exoskeleton» συμβάλει στην μείωση των μετατοπίσεων, αυξάνοντας την περίοδο εξαιτίας της αύξησης της μάζας (ενδέχεται να αποβεί αρνητικό) δίχως αξιοσημείωτη επίδραση στην ακαμψία. Μέσω προσομοιώσεων αναφέρεται ότι με την χρήση ηλιακών εγκαταστάσεων που θα λειτουργούν την καλοκαιρινή περίοδο ενδέχεται να παρουσιαστεί μια μείωση της ενέργειας έως 75% την χειμερινή περίοδο [6] (οι προσομοιώσεις περιλάμβαναν και στοιχεία-μετρήσεις από την χώρα μας). Ως προς το κόστος υλοποίησης αναφέρεται ότι είναι υψηλό δεδομένου ότι πραγματοποιείται και ενεργειακή αναβάθμιση το οποίο όμως κρίνεται λογικό από τα αποτελέσματα και την μη ανάγκη απομάκρυνσης των ενοίκων η οποία θα ισοδυναμούσε με περαιτέρω έξοδα. Συγκεκριμένα είναι περίπου 16.5% μειωμένο από αυτό σεισμικής και ενεργειακής αναβάθμισης.

Μελετώντας ένα κτίριο στο Περιστερί (seismic zone II, στοιχεία τις ανάλυσης  $a_g=0.259g$ ,  $F_0 = 2.363$ ,  $T_c = 0.342$ ) προτάσσονται 4 λύσεις με επικρατούσες τις 2 εξ' αυτών με μικρές παραμετροποιήσεις [βλ. Σχήμα 1]. Οι δύο λύσεις εγγυώνται καλές επιδόσεις από πλευράς εγκάρσιων μετατοπίσεων (16-17% βελτίωση) ενώ είναι το ίδιο κοστοβόρες. Η ανύψωση της δομής κατά έναν όροφο επιτρέπει την μεγαλύτερη συμβολή επιφάνειας, με σχετικά υψηλότερο κόστος αλλά ίσο όφελος στις μετατοπίσεις. Επομένως η εκμετάλλευση του επιπλέον χώρου διατηρώντας την ίδια απόδοση της κατασκευής στις μετατοπίσεις αποτελεί αναντίρρητα πλεονέκτημα.

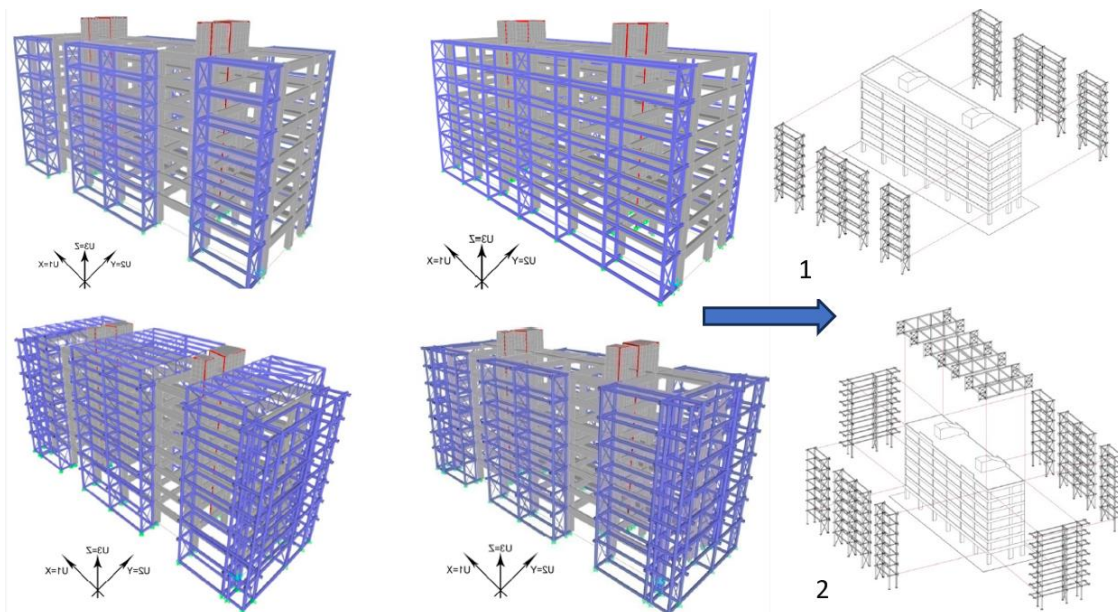
Στα αποτελέσματα της συνολικής μελέτης (λαμβάνοντας στοιχεία από την Ιταλία την Ελλάδα και την Ρουμανία) αναφέρεται ότι η μετατόπιση στον σεισμό σχεδιασμού μειώθηκε κατά 16-26% η ενεργειακή κατανάλωση την χειμερινή περίοδο μειώθηκε κατά 75% με την συνολική να μειώνεται κατά 35%.

Η ενσωμάτωση του προτεινόμενου συστήματος καλείται να επικεντρωθεί στη διεπαφή μεταξύ των διαφορετικών υλικών και στην λειτουργία των εξαρτημάτων με στόχο την παροχή της σωστής απόδοσης σχετικά με τις απαιτήσεις του έργου. Ως στόχος αναφέρεται η εξασφάλιση, η καλή ευελιξία του συστήματος, να είναι αντιστρέψιμο και προσαρμόσιμο ανάλογα με τις διαφορετικές κλιματικές συνθήκες, το αστικό περιβάλλον και τις επιλογές του κύριου του έργου. [7]

Εξαιτίας της μη εκμετάλλευσης των δυνατοτήτων απόσβεσης του εξωσκελετού προτείνεται η χρήση braces πιθανόν με την χρήση μοχλοβραχιόνων που επιτρέπουν μικρές μετατοπίσεις. Στην περίπτωση που ο φορέας του κτιρίου είναι κατασκευασμένος από

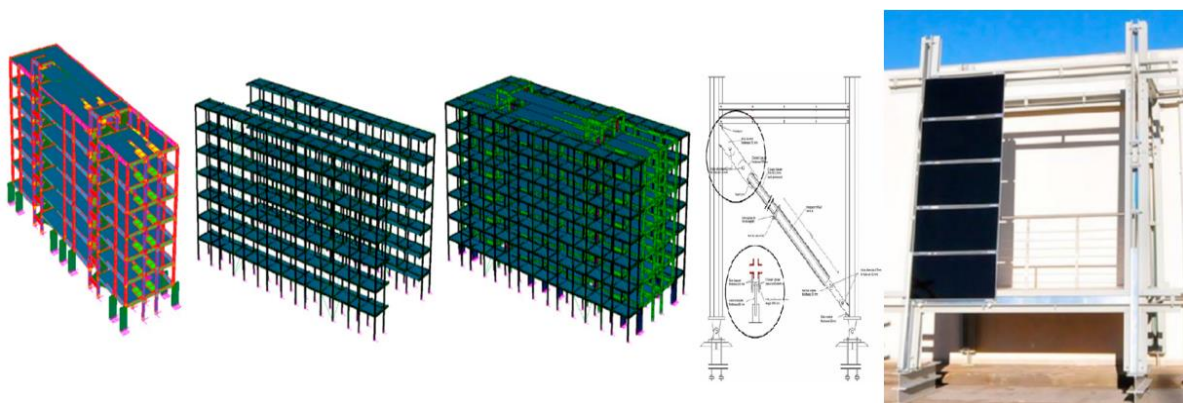


οπλισμένο σκυρόδεμα δεν παρουσιάζει μεγάλη βελτίωση η εφαρμογή, ενώ η μεγάλη διαφορά των δυσκαμψιών (σκελετού κτιρίου & πρόσθετου μεταλλικού) ελλοχεύει κινδύνους. [7]



Σχήμα 1: Παρουσίαση των 4 προτεινόμενων λύσεων και των 2 εξ αυτών που επικράτησαν [6]

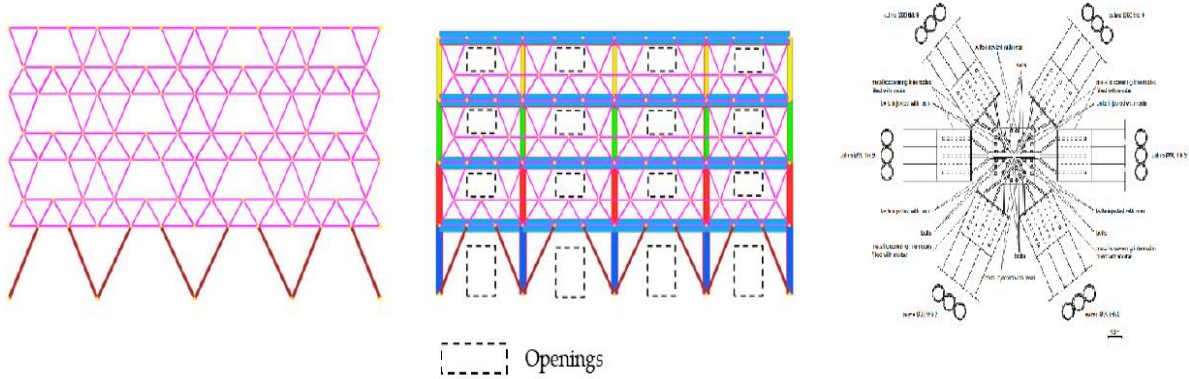
Πρόσφατες έρευνες στοχεύουν και προτείνουν την προσάρτηση φωτοβολταϊκών στις μεταλλικές κατασκευές τύπου «exoskeleton». Στην διερεύνηση των [8] πραγματοποιήθηκε συνδυαστική αναβάθμιση χρησιμοποιώντας μεταλλικό σκελετό με αποσβεστήρες και διογκωμένη πολυστερίνη. Οι ανάγκες για θέρμανση μειώθηκαν περίπου κατά 25%. Σε σεισμικούς όρους προέκυψε μείωση της μετατόπισης της κορυφής του κτιρίου προς την κατεύθυνση Y κατά περίπου 41.3%, στην κατεύθυνση X κατά περίπου 36.8%, στη τέμνουσα βάση του κτιρίου κατά την κατεύθυνση Y κατά περίπου 5.1%, και στην κατεύθυνση X κατά περίπου 9.1%. Σχετικά με την ενεργειακή απόδοση με την προσθήκη φωτοβολταϊκών δύναται να καλυφθεί το 100% της ενέργειας της αντλίας για την ψύξη και θέρμανση. Η τεχνική αυτή έχει πληθώρα παραμετροποιήσεων έτσι είναι προσαρμόσιμη σε κάθε αρχιτεκτονική και ενεργειακή απαίτηση ενώ είναι εφαρμόσιμη σε σύντομο χρόνο (απαίτηση μικρού αριθμού συγκολλήσεων).



Σχήμα 2: Παρουσίαση φορέα «exoskeleton» με προσάρτηση σε αυτόν φωτοβολταϊκών [8]

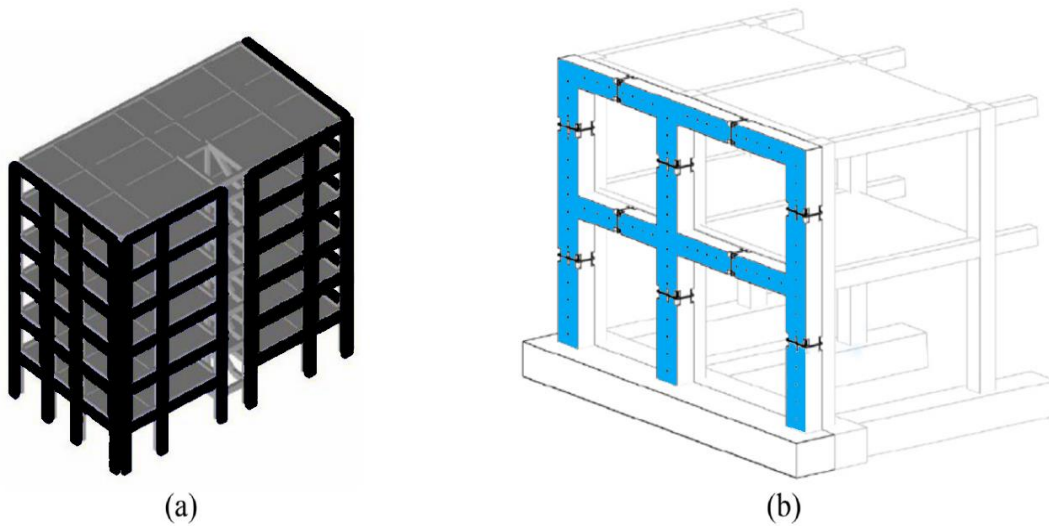
Η ερευνητική εργασία των [9] μελετά την χρήση υβριδικών «exoskeleton» από χάλυβα στον πρώτο όροφο και μπαμπού στους υπόλοιπους. Τονίζεται ότι η αντικατάσταση υλικών με υψηλή εκπομπή CO<sub>2</sub> όπως μετάλλων, πλαστικών ή σκυροδέματος με μπαμπού οδηγεί σε υψηλή μείωση του CO<sub>2</sub>, καθιστώντας την ιδιαίτερα φιλική προς το περιβάλλον.

Πραγματοποιήθηκε μια διερεύνηση ως προς τις μεταβλητές του μεγέθους και του αριθμού των κορμών ανά ράβδο. Η μείωση που επιτεύχθηκε ως προς τη δύναμη διάτμησης στη βάση ήταν 46% σε διαμήκη κατεύθυνση για DLS και 47% για LLS. Η μέθοδος αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί κατά την συντήρηση και την αντικατάσταση μελών επίσης του εξωσκελετού.



Σχήμα 3: Παρουσίαση Υβρίδιου «exoskeleton» από χάλυβα & μπαμπού - σύνδεσης ράβδων μπαμπού [9]

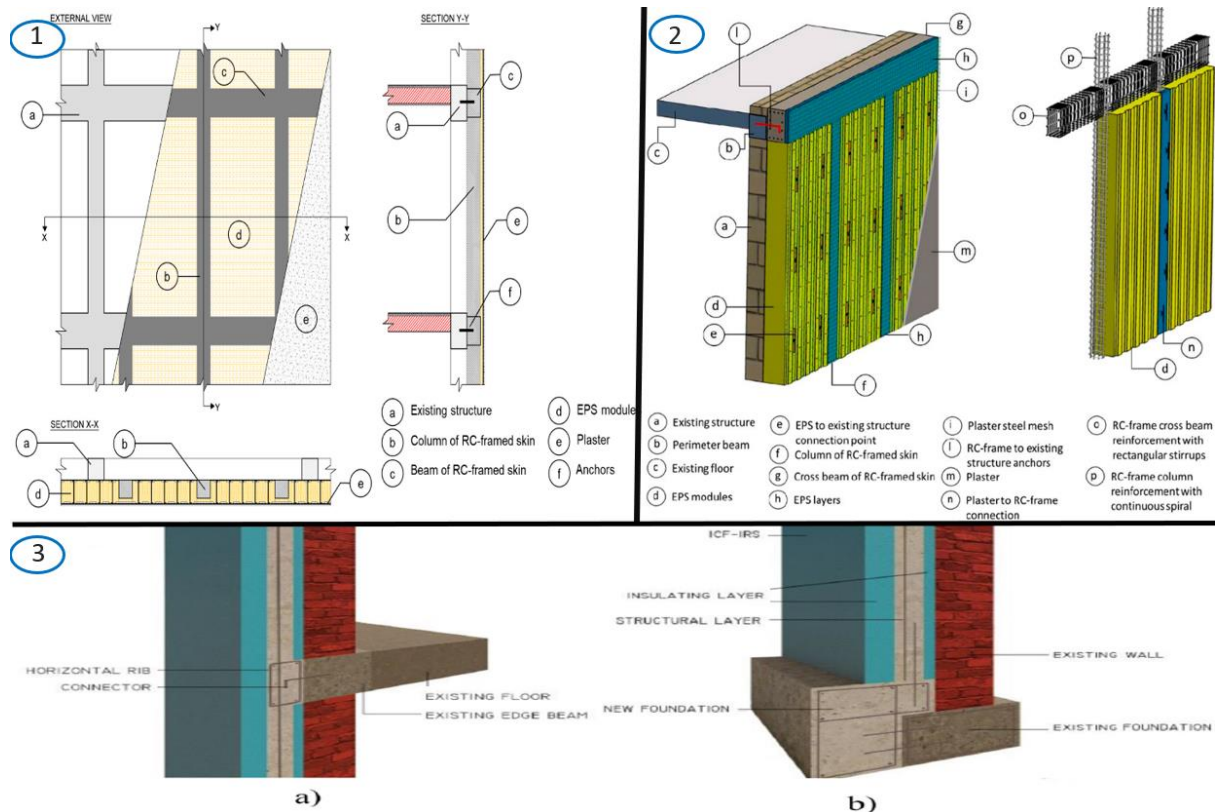
Ακόμη μια μορφή τέτοιων δομών πραγματοποιείται μορφώνοντας τον φορέα του εξωσκελετού με την χρήση τμημάτων προκατασκευασμένου σκυροδέματος. Τα εξωτερικά μέλη RC μπορούν να σχεδιαστούν σύμφωνα με την τοπική σεισμικότητα, ενώ πρόσθετοι τοίχοι πλήρωσης τοιχοποιίας εξασφαλίζουν βελτιωμένη θερμομόνωση του κτιρίου. Σε περιοχή της Ιταλίας [10] που εξετάστηκε η εφαρμογή της μεθόδου υπολογίστηκε ότι η ζήτηση ενέργειας μειώθηκε από 74 kWh/έτος ανά μονάδα επιφάνειας (κατηγορία ενεργειακής απόδοσης F), σε περίπου 43 kWh/έτος (κατηγορία D), ενώ ο λόγος της σεισμικής ικανότητας προς τη ζήτηση θα μπορούσε να βελτιωθεί από 0.38 σε 1.38 (+263%) για μια τοποθεσία υψηλής σεισμικότητας.



Σχήμα 4: Παρουσίαση «exoskeleton» από προκατασκευασμένα στοιχεία οπλισμένου σκυροδέματος [10]

Στην πειραματική εργασία των [11-12] η χρήση προκατασκευασμένων στοιχείων σκυροδέματος χρησιμοποιώντας συνδυαστικά διογκωμένη πολυστερίνη οδήγησε σε διπλασιασμό της δύναμης διαρροής καθώς και στον τριπλασιασμό της ικανότητας μετατόπισης [βλ. Σχλημα 5 (1) και (2)]. Μια τέτοια κατασκευή όπως και άλλες παρόμοιες

φιλοσοφίας που περιγράφονται στο [13] προσφέρουν μόνιμους ξυλότυπους μη αναστρέψιμους μη ανακυκλώσιμους και μάλιστα όχι τόσο περιβαλλοντικά φιλικούς [βλ. Σχήμα 5 (3)].



Σχήμα 5: Παρουσίαση «exoskeleton» συνδυαστικά με διογκωμένη πολυστερίνη (1) & (2) - Παρουσίαση «exoskeleton» και διαμόρφωση σύνδεση (χυτής) με α) πλάκα & β) θεμέλιο [11-13]

### 3. ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΕΝΣΩΜΑΤΩΜΕΝΩΝ-ΕΠΙΚΟΛΛΗΤΩΝ ΤΕΧΝΟΤΡΟΠΙΩΝ

#### 3.1 TRM – FRP

Εδώ και πολλές δεκαετίες έχουν αναπτυχθεί ποικίλες τεχνικές αναβάθμισης της σεισμικής αντίστασης ενός κτιρίου έναντι ανακυκλιζόμενων δυναμικών φορτίσεων. Όσον αφορά κτίρια οπλισμένου σκυροδέματος, η κοινή πρακτική στην Ελλάδα ακολουθεί την ενίσχυση με μεταλλικό κλωβό (παλαιότερα) ή την επένδυση με μανδύα των κατακόρυφων μελών του κτιρίου με χρήση εκτοξευόμενου σκυροδέματος. Σε υψηλότερα κτίρια επιλέγεται συχνά και η τοιχοματοποίηση των υποστυλωμάτων. Αυτές οι συμβατικές τεχνικές ενίσχυσης πέραν του μεγάλου ενεργειακού τους βάρους (λόγω προϊόντων καθαίρεσης ή/και ενσωματωμένων εκπομπών CO<sub>2</sub> κατά τη βιομηχανοποίηση των υλικών επέμβασης), κρίνονται μάλλον ξεπερασμένες, ιδίως σε κατασκευές μεγάλης σπουδαιότητας ή και αξίας.

Τα τελευταία χρόνια, η σεισμική τεχνολογία στεκόμενη αρωγός στην γρήγορη κατασκευασιμότητα των τεχνικών επεμβάσεων δημιούργησε σύνθετα υλικά χαμηλού βάρους, εύκολης τοποθέτησης, υψηλών μηχανικών ιδιοτήτων, λογικού κόστους και μικρής εργοταξιακής προετοιμασίας. Δημοφιλέστερα είναι τα ινοπλισμένα πολυμερή (FRP) όπου πρόκειται για μανδύες υφάσματος από ίνες (υλικών όπως γυαλιού, άνθρακα κ.α) το οποίο επικολλάται με ρητίνη στα δομικά στοιχεία. Εξέλιξη των παραπάνω αποτελούν τα ινοπλέγματα σε ανόργανη μήτρα (TRM). Πρόκειται κατά βάση για ινοπλισμένα κονιάματα που χρησιμοποιούν για συγκολλητικό υλικό κάποια ανόργανη μήτρα, συνήθως κονίαμα με βάση το τσιμέντο.



Πλέον γίνεται εκτεταμένη προσπάθεια από την ακαδημαϊκή, ερευνητική και κατασκευαστική κοινότητα να αποτελέσουν τα TRM τόσο για κτίρια φέρουσας τοιχοποιίας που ενδείκνυνται για την εφαρμογή τους όσο και για κτίρια Ο/Σ (μετατρέποντας μη φέροντα δομικά στοιχεία σε φέροντα) μέσο για ταυτόχρονη σεισμική και ενεργειακή αναβάθμιση. Αυτό γιατί η χρήση κονιάματος που αποτελεί υπόστρωμα θα μπορούσε να τροποποιηθεί καταλλήλως αν προσδίδεται σε αυτό θερμομονωτικές και υγρομονωτικές ιδιότητες με χρήση χημικών πρόσμικτων ή ορυκτών πρόσθετων ή ακόμη καταφέροντας να συνδυαστεί με συμβατικά υλικά θερμοκάλυψης.

Με βάση τη παραπάνω συλλογιστική πορεία, στην διατριβή του [14] προτείνει την εφαρμογή τέτοιων θερμομονωτικών πλακιδίων και συγκεκριμένα διογκωμένης πολυστερίνης πάχους 2 cm, επικολλημένων σε δομικό κονίαμα ενδεδειγμένο για εξωτερική θερμομόνωση (THC 405 Plus εταιρείας Thrakon) οπλισμένο με ασύμμετρο πλέγμα TRM ινών γυαλιού εφελκυστικής αντοχής 2600MPa και  $E=80\text{GPa}$  (SikaWrap 350G Grid εταιρείας Sika Hellas). Για την εφαρμογή αυτή εξετάζει πειραματικά τρία είδη τοιχοποιίας με οπτοπλίνθους (διατμητικό τοίχωμα, πεσσό, υπέρθυρο) σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση μεταβαλλόμενου ρυθμού από 0.05 - 0.5 mm/s και αύξηση εύρους 0.5 mm στον πρώτο και 1 mm σε κάθε επόμενο κύκλο φόρτισης, παραμετροποιώντας τον αριθμό στρώσεων των υλικών ενίσχυσης (1 ή 2), τη πλευρά τοποθέτησής τους (μονόπλευρα ή αμφίπλευρα) και τη διάταξή τους (σε επαφή με την τοιχοποιία ή όχι) με σκοπό την εύρεση της βέλτιστης εκδοχής.

Γενικώς η μονόπλευρη τοποθέτηση μανδύα ενίσχυσης των στοιχείων, παρότι οδηγεί σε καλύτερη εποπτεία των ρωγμών στο υπόστρωμα, επιφέρει μικρότερη αύξηση αντοχής και παραμορφωσιμότητας (εκτός της περίπτωσης υπέρθυρου) παρά το ενδεχομένως ίδιο γεωμετρικό ποσοστό ινών με την αμφίπλευρη εκδοχή και τον κίνδυνο της εκτός επιπέδου αστοχίας της τοιχοποιίας χάριν σύνθλιψης λόγω της εκκεντρότητας της μορφής επέμβασης, ιδίως όταν το IAM τοποθετείται στην εξωτερική παρειά. Η τοποθέτηση αυτού εσωτερικά του μονωτικού υλικού παρέχει μικρότερη αύξηση αντοχής και παραμόρφωσης αστοχίας, με εξαίρεση τα δοκίμια τύπου πεσσού.

Ειδικότερα, για την περίπτωση διατμητικού τοίχου το σύστημα εγγυάται εξ' ολοκλήρου καμπτική συμπεριφορά χωρίς ψαθυρή κατάρρευση με αύξηση αντοχής από 76.3-105.8% σε σχέση με άοπλη τοιχοποιία και μέγιστη σχετική μετακίνηση κυμάνσεως του 1%. Η αστοχία επέρχεται λόγω εφελκυστικής αντοχής ινών για αμφίπλευρο μανδύα, συνοδευόμενη από καταγραφή στενών βρόγχων υστέρησης και αργό μα διαδοχικό τρόπο εξέλιξης ρωγμών έναντι σύνθλιψης τοιχοποιίας για μονόπλευρο με μεγάλη μεταβολή δυσκαμψίας, εκτενέστερες βλαμμένες περιοχές, έντονη πλάτυνση βρόγχων και σημαντική απορρόφηση ενέργειας από το ίδιο το δοκίμιο. Σε κάθε περίπτωση άξια προσοχής η επιρροή αξονικού φορτίου που αυξάνει την καμπτική αντοχή. Αντιθέτως, για τους πεσσούς παρατηρήθηκε έντονη διαπλάτυνση βρόγχων ανεξαρτήτου διάταξης και μορφή αστοχίας, ασήμαντη επιρροή αξονικού φορτίου και κυρίως αξιόπιστη καμπτική συμπεριφορά όλων των δομικών στοιχείων με τα ποσοστά αύξησης κυμαινόμενα από 51.4 - 85.5% και 25.5 - 83.3% για αντοχή και ανηγμένη παραμόρφωση αντίστοιχα. Τέλος, τα ενισχυμένα υπέρθυρα εκδήλωσαν ασυμμετρίες στα διαγράμματα δύναμης – μετατόπισης, αύξηση αντοχής 44.3 - 112.3% κατά περίπτωση με την μονόπλευρη τοποθέτηση IAM στην εξωτερική παρειά να σημειώνει τις καλύτερες επιδόσεις αλλά με μεγάλη επικινδυνότητα λόγω εκκεντρότητας και επιθυμητή καμπτική συμπεριφορά με την αστοχία να επιφέρει ξαφνική πλάτυνση βρόγχου υστέρησης και μεταβολή δυσκαμψίας.

Η εργασία των [15] επικεντρώθηκε στη μελέτη επιρροής του ύψους και της μη κανονικότητας καθ' ύψος εξετάζοντας 3 case studies κτιρίων Ο/Σ με τοιχοπληρώσεις (2-όροφο, 5-όροφο, 5-όροφο με πλωτή), κανονικά σε κάτοψη με δύο πλαισιακά ανοίγματα στην εγκάρσια διεύθυνση και τέσσερα στη διαμήκη, σχεδιασμένα μόνο για φορτία βαρύτητας (προ 1985) και χωρίς πρόβλεψη για ενεργειακό σχεδιασμό. Η στατική ενίσχυση έγκειται σε εφαρμογή πλέγματος TRM E-glass διαστάσεων 25×25mm, εφελκυστικής αντοχής ινών 115



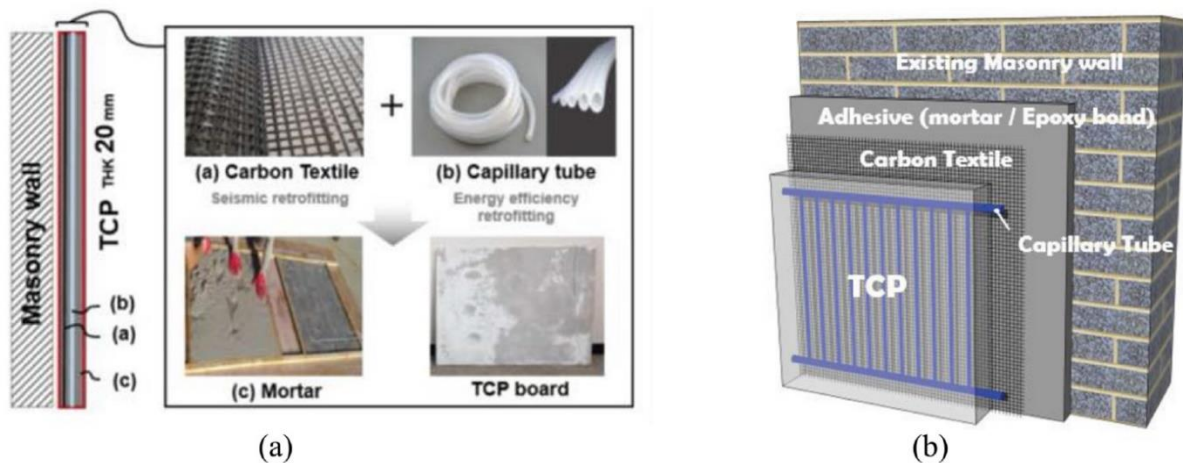
KN/m<sup>2</sup> και E = 73 GPa στις τοιχοποιίες, τη στιγμή που αυτό συνδυάζεται με μονωτικό υλικό πολυστερίνης πάχους 40 mm και θερμικής αγωγιμότητας 0.03 W/m/k. Για την εξέταση της σεισμικής συμπεριφοράς επιχειρήθηκαν μη γραμμικές αναλύσεις χρονοϊστορίας (παράλληλα με Pushover αναλύσεις με τριγωνική κατανομή πλευρικού φορτίου) σε ένα μεγάλο εύρος κλιμάκωσης εδαφικών επιταχύνσεων (PGA = 0.001g – 1.0g) για 11 φυσικές σεισμικές καταγραφές.

Η οικονομική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων επιχειρήθηκε διαμέσου της Εκτιμώμενης Ετήσιας Απώλειας EAL. Βάσει της παραπάνω ανάλυσης προέκυψε ότι το κτίριο τύπου pilotis παρουσιάζει εξαιρετικά υψηλότερες τιμές EAL, τη στιγμή που το TRM χαίρει εξαιρετικής σεισμικής απόδοσης αντιμετωπίζοντας επιτυχώς τον κίνδυνο ανάπτυξης μαλακού ορόφου, πιθανότητες οι οποίες εκμηδενίζονται συνδυάζοντας TRM με τοιχοπλήρωση. Τα επιλεγμένα σχήματα ενίσχυσης μειώνουν την κατανάλωση ενέργειας 30-46% (ακόμη περισσότερο με πιο συντηρητικά πάχη στρώσεων μονωτικών υλικών), κρίνονται ευνοϊκότερα για ψυχρά κλίματα ενώ από τεχνικής απόψεως χαίρουν καλύτερης απόδοσης όσο αυξάνεται η σεισμικότητα της περιοχής. Επιστεγασματικά και σύμφωνα με τον παρακάτω πίνακα, η συνδυαστική σεισμική και ενεργειακή αναβάθμιση προτείνεται για PGA>0.1 ενώ παρουσιάζει χρόνο αποπληρωμής επένδυσης πολύ μικρότερο απ'ότι αν συνέβαιναν ανεξάρτητες επεμβάσεις.

Αναβάθμιση	Μπέργκαμο			Φλωρεντία			Ρώμη			Κατάνια		
	2ο	5ο	5οπ	2ο	5ο	5οπ	2ο	5ο	5οπ	2ο	5ο	5οπ
Ενεργειακή	5.9	8.5	7.7	7.5	11.0	10.1	9.0	13.8	12.7	11.9	19.7	18.0
Σεισμική	30.1	34.2	12.4	17.2	18.3	4.1	18.2	19.8	3.8	33.8	43.1	3.0
Συνδυασμένη	6.8	9.3	7.0	7.4	10.1	5.1	8.6	12.2	5.3	12.4	19.4	4.9

Πίνακας 1: Τιμών EAL [15]

### 3.2 TCP



Σχήμα 6: (a) Σύνθεση TCP (b) Εφαρμογή TCP [16]

Η άνω τεχνολογία όπου η ενίσχυση επιτυγχάνεται με την χρήση ιών χρησιμοποιήθηκε με διαφορετικό τρόπο από τους [16] προσαρτώντας στο πλέγμα άνθρακα έναν τριχοειδή σωλήνα. Η φιλοσοφία αυτής της τεχνοτροπίας έγκειται στην προσθήκη των ενεργειακών ιδιοτήτων στο σύστημα μέσω του σωλήνα ο οποίος επιτρέπει την ροή κατάλληλων ρευστών σε ορισμένες θερμοκρασίες. Μέσα από την πειραματική έρευνα [16] τοιχοδομές ενισχυμένες

με TCP παρουσίασαν αύξηση 42% της αντοχής και 40% της παραμόρφωσης. Σχετικά με την θερμική απόδοση της μεθόδου εξελίσσονται περαιτέρω δοκιμές ενώ

### 3.3 CLT

Εφαρμογή λύσεων με την φιλοσοφία των Nested Buildings αποτελούν μια ολοκληρωμένη προσέγγιση που διατηρεί την υπάρχουσα εξωτερική δομή (εφαρμογή εξωτερικά) και παρέχει ένα νέο δομικό σύστημα στο εσωτερικό με στόχο την βελτίωση των δομικών και ενεργειακών επιδόσεων. Υπάρχουν διάφορες επιλογές όσον αφορά την μόρφωση τέτοιων δομών όπως οπλισμένο σκυρόδεμα (ΟΠ), πλαίσια χάλυβα (ΠΧ), ξύλινα πλαίσια (ΞΠ) και τα πάνελ CLT. Κάνοντας μια σύντομη περιγραφή ορισμένων χαρακτηριστικών αυτών αναφέρεται ότι το ΟΠ προσφέρει υψηλή ακαμψία, αποτελεσματική σύνδεση με την υπάρχουσα κατασκευή μέσω ράβδων, ωστόσο το σκυρόδεμα έχει υψηλή θερμική διαπερατότητα που σε ορισμένες περιπτώσεις παρουσιάζει θερμογέφυρες.

Επιπρόσθετα ο σχεδιασμός, η εγκατάσταση και η χύτευση αποτελούν περίπλοκες διαδικασίες ειδικότερα σε αυτές τις περιπτώσεις που η εφαρμογή γίνεται στην εσωτερική επιφάνεια. Τα χάλυβδινα πλαίσια λόγω της λεπτότητας τους αναπτύσσουν μεγάλες μετατοπίσεις κυρίως στην περίπτωση παχιάς τοιχοποιίας, ενώ για λόγους εξισορρόπησης δυσκαμψίας (παλιάς και νέας δομής απαιτείται προένταση). Το πλήθος προκατασκευασμένων μεταλλικών κατασκευών επιτρέπει ευκολότερες εγκαταστάσεις, μειώνοντας έτσι και τον χρόνο κατασκευής, το ανθρώπινο δυναμικό, αν και οι διαστάσεις των δομικών στοιχείων επηρεάζουν έντονα τον χειρισμό και το ίδιο το εργοτάξιο. Στα μειονεκτήματα αναφέρονται το υψηλό κόστος, οι υγραυερμικές ιδιότητες του χάλυβα, καθώς και ότι η πολύ υψηλή του θερμική αγωγιμότητα μπορεί να δημιουργήσει σημαντικές διακυμάνσεις στη θερμική ροή.

Οι λύσεις ξυλείας παρουσιάζουν τα πλεονεκτήματα των ελαφριών και καλών θερμικών ιδιοτήτων. Τα ξύλινα πλαίσια παρουσιάζουν χαμηλή ακαμψία, καθιστώντας τα κατάλληλα για την ενίσχυση της λεπτής τοιχοποιίας αλλά ενδέχεται να είναι ανεπαρκή για την ενίσχυση χονδρών τοίχων από τοιχοποιία. Αντίθετα, τα πάνελ CLT, χάρη στην αυξημένη ακαμψία τους, επιτρέπουν τον συνδυασμό των πλεονεκτημάτων της εγκατάστασης προκατασκευασμένων στοιχείων τόσο δομικής όσο και ενεργειακής απόδοσης, κάνοντας την παρέμβαση πολύ ανταγωνιστική. Επιπλέον, η δυνατότητα ανακύκλωσης των CLT εγγυάται καλή βιωσιμότητα του κύκλου ζωής της παρέμβασης τόσο από περιβαλλοντικής όσο και από οικονομικής απόψεως.

Στο σημείο αυτό παρουσιάζεται μια έρευνα [17] που επικεντρώθηκε στην ενίσχυση άοπλης τοιχοποιίας με πάνελ χιαστί συγκολλήσεων (διασταυρωμένων) πάνελ ξύλου (CLT). Η επιλογή του ξύλου ως υλικού είναι δικαιολογημένη καθώς κρίνεται ως ελαφρύ υλικό, υψηλής δυσκαμψίας με ικανοποιητικότητα υγραυερμικά χαρακτηριστικά. Τα αποτελέσματα της εφαρμογής πιστοποιούν την συνεισφορά αυτής της τεχνολογίας σε φορτίσεις εντός επιπέδου, ενώ η αποτροπή μηχανισμών ανατροπής απαιτεί επαρκείς κατασκευαστικές λεπτομέρειες και την προσφορά συγκεκριμένων λύσεων.



Σχήμα 7: Παράδειγματα (a) Στρωμάτων εφαρμογής αναβάθμισης CLT (b) Συνδέσεις αυτών [17]

Τα πάνελ CLT εξαιτίας της ικανότητας τους να λαμβάνουν φορτία σε εντός και εκτός επιπέδου προτιμώνται να χρησιμοποιούνται σε επίπεδα στοιχεία (πλάκες και τοίχους). Μάλιστα τα δάπεδα CLT μειώνουν την μάζα παρέχοντας έτσι σημαντικό πλεονέκτημα απέναντι σε σεισμικές δράσεις. Αχίλλειο πτέρνα της μεθόδου αποτελεί η ύπαρξη υγρασίας που επιφέρει την ανάπτυξη μούχλας. Επίσης σαν μειονέκτημα αναφέρεται ο κίνδυνος υπερθέρμανσης του υλικού (ξύλου) κατά την θερμή περίοδο λόγω έλλειψης θερμικής μάζας και θερμικής διαπερατότητας. Στα αποτελέσματα αναφέρεται για την περίπτωση πέτρινου τοίχου (α) και κοίλου πήλινου τοίχου (β):

α) Η θερμική χρονική υστέρηση τετραπλασιάστηκε φτάνοντας την τιμή των 12.43 h ενώ οι μέγιστες μετατοπίσεις μειώθηκαν κατά 30%. Με ενέσεις κονιάματος πριν την εφαρμογή μάλιστα αυτή η μείωση ενδέχεται να φτάνει και το 50% αν και παρατηρήθηκαν προβλήματα εκτός επιπέδου ακόμα με την ελάχιστη απόσταση μεταξύ των συνδέσμων των 2 επιφανειών.

β) Η θερμική χρονική υστέρηση τετραπλασιάστηκε φτάνοντας την τιμή των 13.90 h ενώ οι μέγιστες μετατοπίσεις μειώθηκαν κατά 25% ενώ δεν παρατηρήθηκαν προβλήματα εκτός επιπέδου.

Σε ακολουθία των άνω παρουσιάζεται μια πρόταση γνωστή ως AdESA (Adeguamento Energetico Sismico ed Architetonico) που μεταφράζεται ως Energy Seismic and Architectural Retrofit [18]. Το σύστημα AdESA συνεπάγεται με τη χρήση καινοτόμων τεχνολογιών και συστημάτων εικονικού σχεδιασμού (BIM), βασίζεται στην εφαρμογή στρωμένου κελύφους στο υπάρχον κτίριο, που περιλαμβάνει: (1) δομικό στρώμα, που αποτελείται ένα αντισεισμικό κέλυφος κατασκευασμένο από προκατασκευασμένα πάνελ διασταυρούμενης ξυλείας (CLT) και ένα στρώμα πυροπροστασίας, εάν είναι απαραίτητο, (2) ένα ενεργειακό στρώμα, που αποτελείται από ένα θερμικό μονωτικό (σε πάνελ ή επίστρωση) και (3) ένα αρχιτεκτονικό στρώμα, που περικλείει τα προηγούμενα στρώματα με εξαιρετικά προσαρμόσιμα φινιρίσματα, που κυμαίνονται από το απλό skimming, για τη διατήρηση της εμφάνισης από παραδοσιακό σοβά, μέχρι επιχρίσματα με υψηλή αρχιτεκτονική και τεχνολογική απήχηση.

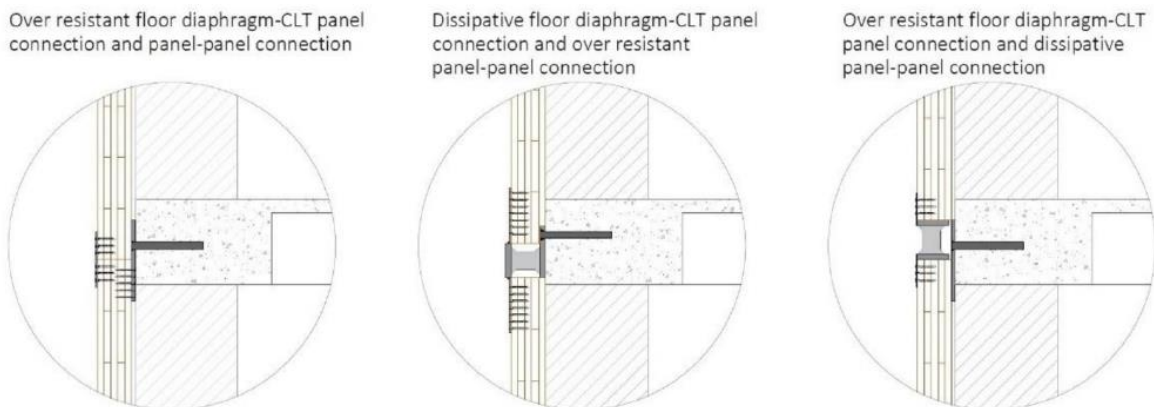
Τέτοια συστήματα τοποθετούνται εύκολα και αποσυναρμολογούνται σε περίπτωση επαναχρησιμοποίησης ή αλλαγής των αναγκών, ενώ τα θυσιαστικά αντικαταστάσιμα στοιχεία ανακυκλώνονται εύκολα. Με βάση το Life Cycle Thinking λαμβάνονται υπόψη περιβαλλοντικές, κοινωνικές και οικονομικές επιπτώσεις ενός προϊόντος σε όλο τον κύκλο ζωής (από την εξόρυξη των πρώτων υλών, κατασκευή, λειτουργία, επισκευή-συντήρηση, ανακύκλωση-χρήση προϊόντων μετά το τέλος ζωής του κτιρίου). [18]



Το AdESA αποτελείται από ένα κέλυφος εξωσκελετού που εφαρμόζεται στο υπάρχον κτίριο, εμπεριέχει 1-3 στρώσεις ανάλογα τις απαιτούμενες ανάγκες και τον στόχο την αναβάθμισης, βελτιώνοντας την ενεργειακή και την σεισμική απόδοση, εξασφαλίζοντας την αρχιτεκτονική αναδιαμόρφωση και την προσαρμοστικότητα σε διάφορες περιβαλλοντικές συνθήκες. Ο εξωσκελετός είναι σχεδιασμένος ως αρθρωτός έτσι ώστε να προσαρμόζεται σε διάφορες γεωμετρίες και να είναι αρκετά ευέλικτος σε μελλοντικές κτιριακές ανάγκες. Οι συνδέσεις είναι επίσης προκατασκευασμένες στο εργοστάσιο και τυποποιημένες για την εξασφάλιση της εύκολης εγκατάστασης, καθώς και για να καταστεί δυνατή η αφαίρεση και η επαναχρησιμοποίηση τους στο τέλος της ζωής τους. Τονίζεται επίσης ότι για τα πάνελ CLT, μπορεί να ληφθεί υπόψη ένα ποσοστό επαναχρησιμοποίησης περίπου 85–90%.

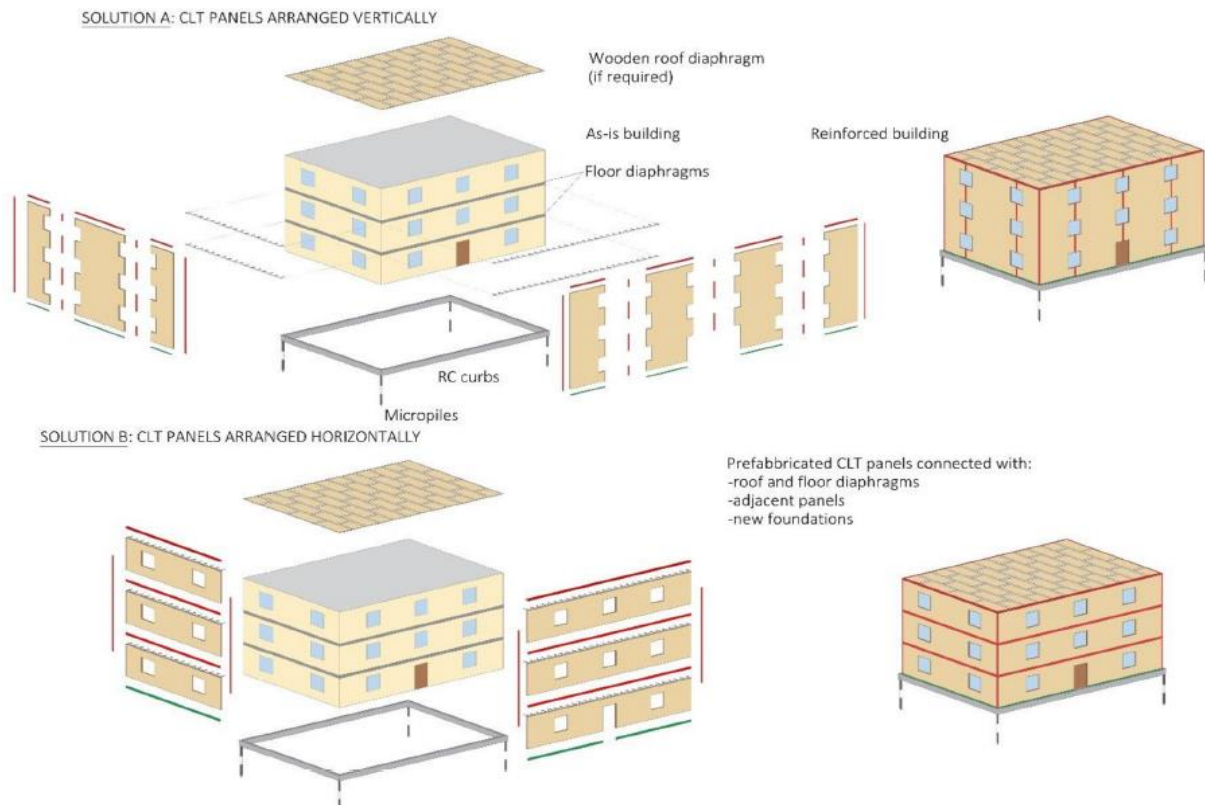
Επιπλέον, το σύστημα κρίνεται ως υψηλά βιομηχανοποιημένο τόσο ως προς την παραγωγική διαδικασία όσο και για την εγκατάσταση εξαρτημάτων, εξασφάλιση χρόνου κατασκευής, διαχείρισης εργοταξίου και κόστους συγκρίσιμα με αυτά του ενεργειακές και αρχιτεκτονικές παρεμβάσεις, αλλά με επιπλέον οφέλη όσον αφορά την ασφάλεια του κτιρίου και των κατοίκων. Για να μην αυξηθεί ο χρόνος και ο βαθμός των επεμβάσεων η λύση αυτή γίνεται εξωτερικά, σε κτίρια π.χ. του 2<sup>ου</sup> παγκοσμίου πολέμου που βρίσκονται σε μεγάλους αριθμούς εντός των οικιστικών κέντρων χωρίς να υπόκεινται σε περιορισμούς διατήρησης. Η τεχνολογία εφαρμόζεται σε ένα γυμναστήριο στην πόλη Μπρέσια της Ιταλίας ( $a_g = 0.168$ ).

Στην πρώτη περίπτωση [βλ. Σχήμα 8] το κάτω πάνελ συνδέεται πρώτα με καρφιά στη δοκό δακτυλίου RC του δαπέδου το επάνω, μέρος του πάνελ στη συνέχεια συνδέεται με το κάτω μέσω καρφωμένων χαλύβδινων λωρίδων. Στα επόμενα δύο μια σειρά από κάθετες χαλύβδινες πλάκες παρεμβάλλεται στο επίπεδο σύνδεσης. Ανάλογα με τη διάταξη των χαλύβδινων πλακών, η διάχυση μπορεί να συμβεί είτε στο κέλυφος εξωσκελετού.



Σχήμα 8: Πιθανές τεχνολογίες σύνδεσης CLT πάνελ [18]

Οι θερμικές ιδιότητες του ξύλου αξιοποιούνται στην προσθήκη θερμομονωτικών υλικών ελαχιστοποιώντας την απαιτούμενη στρώση και συνεπώς τις περιβαλλοντικές συνέπειες. Η συναρμολόγηση και η σύνδεση του CLT διήρκεσαν περίπου 2 ημέρες, υποθέτοντας μια ομάδα 4 ατόμων και ένα ελαφρύ γερανό. Η συναρμολόγηση ολόκληρου του συστήματος AdESA απαιτούσε 4-5 μήνες. Το συνολικό κόστος (συμπεριλαμβανομένου του πολυεπίπεδου ενεργειακού και δομικού κελύφους, των αρχιτεκτονικών τελειωμάτων, της κατασκευής κόστη εργοταξίου, προκαταρκτικές εργασίες, απρόβλεπτα, ΦΠΑ, αλλά εξαιρουμένων των τεχνικών εξόδων) ήταν περίπου 390 EUR/m<sup>2</sup>. Ως προς την κατανομή του κόστους: Το 30% του συνολικού κόστους σχετίζεται με τη δομική μετασκευή, το 30% με την ενεργειακή βελτίωση μέτρα και 40% σε άλλα κατασκευαστικά έξοδα.



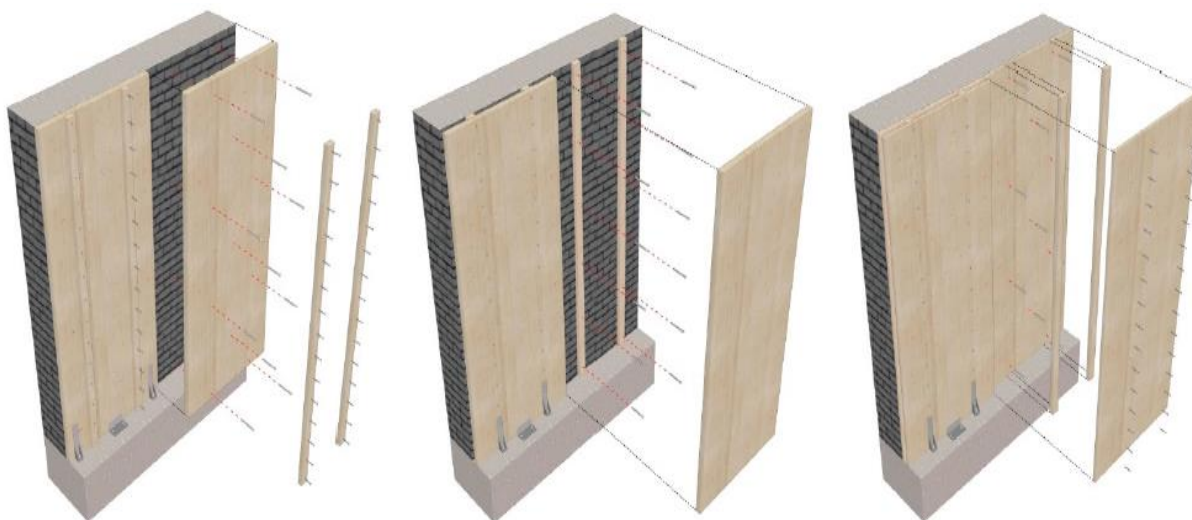
Σχήμα 9: Το αντισεισμικό στρώμα AdESA αποτελείται από πάνελ CLT κατά μήκος των περιμετρικών προσόψεων (διατεταγμένα είτε οριζόντια ή κατακόρυφα, σε όλο το ύψος), διαφραγματική λειτουργία στέγης με την προσθήκη κόντρα πλακέ πάνελ (χρήση χαλύβδινων φλαντζών).[18]

Η εφαρμογή του συστήματος AdESA στο γυμναστήριο επέτρεψε τη μετατόπιση της δομής από ένα εξαιρετικά σεισμικά ευάλωτο κτίριο σε ένα κτίριο που συμμορφώνεται με τον κώδικα (δηλ. σεισμική κλάση F έως σεισμική κατηγορία κτήριο A, με αναφορά στα ιταλικά πρότυπα), επίλυση όλα τα μεγάλα σεισμικά τρωτά σημεία του κτιρίου. Από ενεργειακής άποψης, το χειμώνα το ετήσιο θερμικό φορτίο μειώθηκε από 63.338 kWh σε 31.343 kWh, ενώ σε καλοκαιρινές συνθήκες, μειώθηκε από 21.137 kWh σε 8851 kWh, με ετήσια ενέργεια εξοικονόμηση ίση με 50.51% και 58.12% αντίστοιχα (δηλαδή, μετάβαση από ενεργειακή κλάση E σε κατηγορίας B, με αναφορά στα ιταλικά πρότυπα).

Οι [19] πραγματοποίησαν πειράματα πάνω σε δύο διαφορετικά προϊόντα ξυλείας γνωστά ως CLT (cross laminated timber) και LVL (laminated veneer lumber). Τα ξύλινα στοιχεία που ερευνήθηκαν είχαν την μορφή πάνελ, την μορφή ορθοστατών καθώς και συνδυασμό αυτών. Σχετικά με τα μονωτικά πάνελ το πάχος τους περιορίστηκε στα 30 mm εξετάζοντας 4 επιλογές (ίνες ξύλου, διογκωμένη πολυστερίνη- EPS 80, EPS 100 γραφίτη, αεροραν-προϊόν με βάση το aerogel). Σε όλες τις εσωτερικές εφαρμογές τοποθετήθηκε μια αδιάβροχη μεμβράνη (ανάμεσα στο υπάρχον υπόστρωμα και τα πρόσθετα ξύλινα μέλη) με σκοπό να μην πραγματοποιηθεί εμποτισμός των ξύλινων στοιχείων καθώς και φράγμα υδρατμών στην θερμή πλευρά για την εγγύηση της υγραυρομονωτικής απόδοσης.

Στις εξωτερικές εφαρμογές η μεμβράνη τοποθετήθηκε στην εξωτερική επιφάνεια για την αντιμετώπιση των ηλιακών ακτίνων. Όσον αφορά το φινίρισμα της επιφάνειας, όταν γίνεται η επέμβαση εσωτερικά, μπορεί να γίνει με γυψοσανίδες ή φύλλα ινοτσιμέντου. Διαφορετικά, όταν γίνεται επέμβαση στις εξωτερικές επιφάνειες, το φινίρισμα γίνεται με χρήση ινοτσιμεντοσανίδων και επιπλέον επίστρωσης skim coat για εγγυημένη ανθεκτικότητα.

Συνολικά μελετήθηκαν 35 εφαρμογές 18 εσωτερικές και 17 εξωτερικές. Στα αποτελέσματα αναφέρεται η μείωση της θερμικής μετάδοσης περίπου κατά 78%, ενώ η προσθήκη ξύλινων ορθοστατών οδήγησε σε καλύτερη απόδοση. Τέλος η λύση με τα LVL (με ορθοστάτες) είχε την καλύτερη απόδοση από άποψη μηχανικής.



Σχήμα 10: Διάφοροι σχηματισμοί ξύλινων ενισχύσεων [19]

### 3.4 Xlam Panels

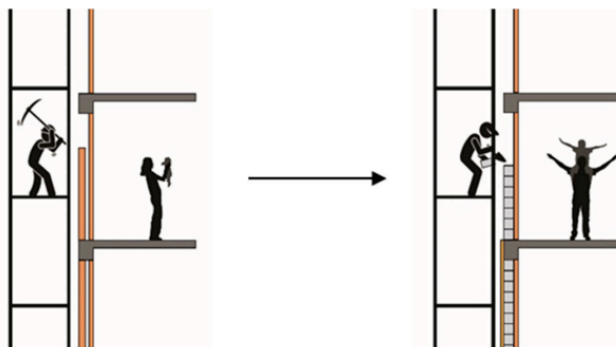
Οι [20] συνέβαλαν στην ανάπτυξη της τεχνολογίας των xlam panels, σύστημα με βάση τη χρήση φυσικών και περιβαλλοντικά βιώσιμων υλικών και συγκεκριμένα του ξύλου, με αποδεδειγμένη αντισεισμική ικανότητα και εξαιρετική αναλογία αντοχής και ειδικού βάρους καθώς επίσης και θερμικής αγωγιμότητας λόγω πορώδους και κατεύθυνσης ινών. Η εφαρμογή έγκειται μέσω μεταλλικής κατασκευής στερεωμένης στο επίπεδο της πλάκας για περισσότερη καμπτική δυσκαμψία και διασύνδεση αυτού με τα ξύλινα πάνελς μέσω ξύλινων αγκυριών για μεταφορά διατμητικών τάσεων. Στη παρούσα έρευνα γίνεται συνδυασμός των πάνελς με διάφορους τύπους θερμομονωτικών υλικών παραμετροποιώντας τη διάταξη και τη θέση τους καθώς και το είδος της τοιχοποιίας.

## 4. ΑΝΤΙΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΔΟΜΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΜΕ ΑΛΛΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ

Για την επάνοδο της αειφορίας και της ανθεκτικότητας των υφιστάμενων κατασκευών, έχει προταθεί για πλαισιακές κατασκευές Ο/Σ η στρατηγική της αντικατάστασης της εξωτερικής στρώσης της περιμετρικής τοιχοποιίας με διπλόφυλλες τοιχοπληρώσεις κατασκευασμένες με κοίλα τούβλα από AAC blocks υψηλής απόδοσης. Τα συγκεκριμένα δομικά στοιχεία πρόκειται για προκατασκευασμένα οικολογικά και φιλικά στο περιβάλλον μπλόκια, με εξαιρετική θερμική αγωγιμότητα ( $\lambda = 0,008 - 0,16 \text{ W/mk}$ ), ισχυρή θλιπτική αντοχή, χαμηλού βάρους και υψηλών πυρόμαχων ιδιοτήτων. Χαίρει ευρείας εμπορείας στον κατασκευαστικό κλάδο (ευκολία προμήθειας), ενώ το γεγονός της προκατασκευής του διευκολύνει την τοποθέτηση και μειώνει τα κόστη και τους χρόνους κατασκευής.

Προς αυτή τη κατεύθυνση, οι [21], εξέτασαν τη χρήση τέτοιων blocks μέσω case-study μίας 4-όροφης πολυκατοικίας, αντιπροσωπευτικής υφιστάμενου κτιρίου των δεκαετιών 1950-1980 κάνοντας ενεργειακές και σεισμικές προσομοιώσεις.





Σχήμα 11: Παράδειγμα εφαρμογής της επάμβρασης AAC Blocks [21]

Mechanical Characteristics of Masonry Infill	Current State (Clay Hollow Bricks)	Design State (AAC blocks)
Young Modulus E [MPa]	1200	3000
Shear Modulus G [MPa]	700	1200
Compressive stress $f_m$ [MPa]	1.2	5.35
Shear stress $\tau_0$ [MPa]	0.07	0.38
Specific weight $w$ [kN m <sup>-3</sup> ]	8	6.6

Πίνακας 2: Μηχανικών χαρακτηριστικών της τοιχοποιίας πριν και μετά την εφαρμογή [21]

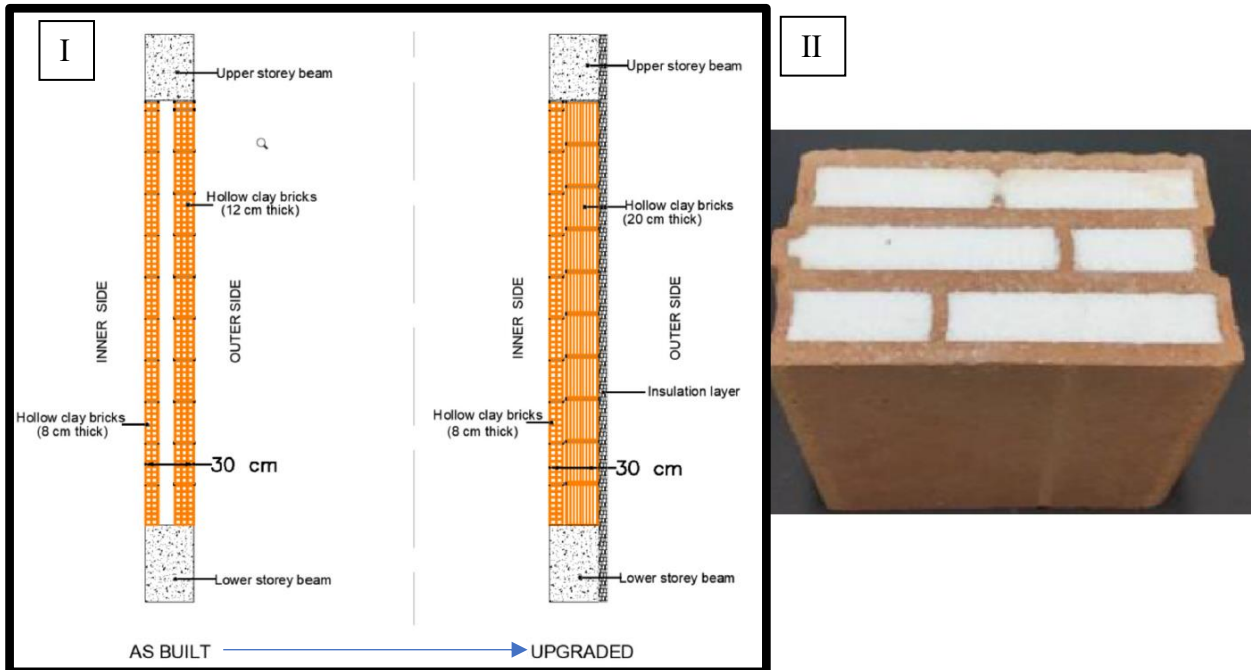
Με την προτεινόμενη τεχνική, σεισμική συμπεριφορά αλλάζει καθώς τα νέας πάνελς επιτρέπουν μεγαλύτερη δυσκαμψία και αντίσταση. Αυτή βελτιώνεται κατά 120,8% στην SLD (damage limitation) στάθμη, 57% για την SLV (life safety) και κατά 43.2% για την SLC (near collapse). Δηλαδή, η δομική βελτίωση είναι ανώτερη για την limit state, ενώ από κει και ύστερα έχει μειωτική τάση, πράγμα που σημαίνει καλύτερη απόδοση έως ότου φτάσει σε βλάβη το κτίριο. Ως προς το ενεργειακό ζήτημα, η χρονική υστέρηση αυξάνει κατά 4 ώρες και οι ενεργειακές ανάγκες μειώνονται κατά 38% και 27% σε θέρμανση και ψύξη αντίστοιχα. Προς την κατασκευασιμότητα της τεχνικής, αποτελεί σημαντικό πλεονέκτημα η γρήγορη εφαρμογή, η ικανότητα πολλών συνεργείων για την επέμβαση (δεν απαιτείται εξειδικευμένο συνεργείο) ενώ δεδομένου της εργασίας εκ των έξω, δεν προκαλείται καμία όχληση ή προσωρινή μετεγκατάσταση των ενοίκων. Τα όποια προϊόντα καθαίρεσης και αποδόμησης θα μπορούν να ανακυκλωθούν και να επαναχρησιμοποιηθούν στο πνεύμα της κυκλικής οικονομίας.

Όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό η ενίσχυση δομικών στοιχείων μπορεί συχνά να μην είναι εφικτή ή οικονομικά βιώσιμη λόγω πολύ κακής ποιότητας ή βλάβης του υπάρχοντα περιβλήματος. Σε τέτοιες περιπτώσεις η αντικατάσταση στοιχείων (π.χ. τοιχοδομών) μπορεί να αποτελεί μια συμφέρουσα λύση σαφώς όμως αρκετά πιο παρεμβατική.

Στην ερευνητική εργασία του [22] προτάθηκε η αντικατάσταση της εξωτερικής στρώσης τούβλων τοιχοποιίας (αποτελούμενης από 2 στρώσεις με εσωτερικό κενό) με ένα παχύτερο ανθεκτικότερο τούβλο από πηλό, με χαμηλή διαπερατότητα προσθέτοντας επίσης εξωτερικά από αυτό μονωτικό στρώμα. Αυτή η τεχνοτροπία χρησιμοποιήθηκε σε κτίρια της δεκαετίας του 1970 στην περιοχή της Ιταλίας (γνωστή έρευνα ως DPC-ReLUIIS).

Στα αποτελέσματα της μελέτης αποδείχθηκε μείωση της κατανάλωσης ενέργειας κατά 40%, (ενεργειακή κλάση βελτίωση από F σε D). Επιπλέον, η χρήση ανθεκτικότερων τούβλων οδήγησε σε αύξηση της διατηρητικής ικανότητας βάσης (+25%) και της ακαμψίας (+58%). Τούβλα γεμάτα με προηγμένα υλικά έχουν επίσης προταθεί, όπως υλικά αλλαγής φάσης (PCM) που οδηγούν σε μειώσεις της ροής θερμότητας έως και 10% επιτυγχάνοντας πολύ

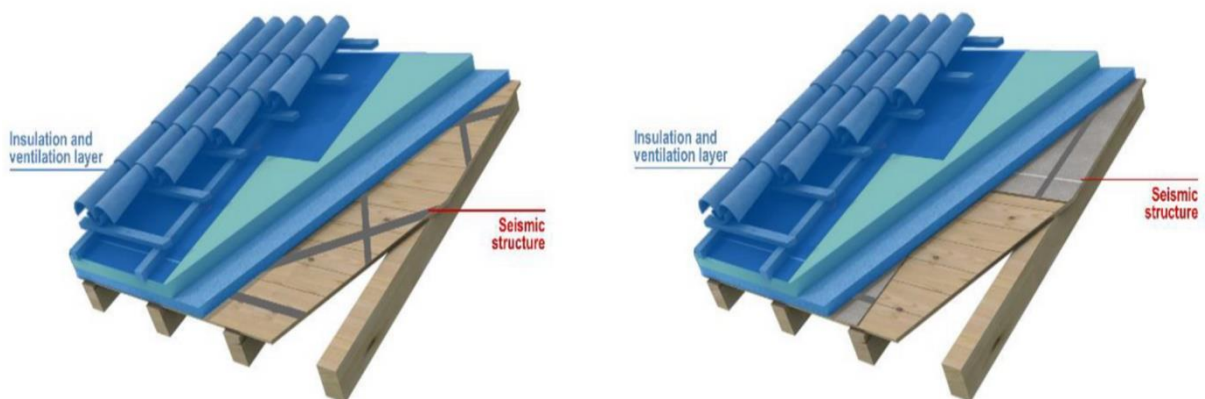
χαμηλή τιμή  $U$  0,157 W/(m<sup>2</sup>K) για τοίχο, αλλά με σχετικά μεγάλο πρόσθετο κόστος 1000 €/m<sup>2</sup>



Σχήμα 12: I) Αντικατάσταση υλικών τοιχοδομής με αποδοτικότερα [22] II) Τούβλα με γέμιση προηγμένων υλικών [23]

## 5. ΔΙΑΦΡΑΓΜΑΤΙΚΕΣ ΕΜΠΕΜΒΑΣΕΙΣ ΣΕ ΔΑΠΕΔΑ ΚΑΙ ΟΡΟΦΕΣ

Στα κτίρια τοιχοποιίας το δάπεδο και η στέγη κατασκευάζεται συνήθως από ξύλινες δοκούς ή σανίδες είτε από μεταλλικές δοκούς με ικανότητα μεγάλης καμπτικής παραμόρφωσης (χαμηλή δυσκαμψία σε εντός επιπέδου φορτίσεις). Σε περιπτώσεις που η ακαμψία εντός επιπέδου δεν είναι εξασφαλισμένη (π.χ. σε πρώιμα κτίρια με ξύλινες δοκούς) απαιτούνται διεργασίες εξασφάλισης ή επέκτασης της. Μια μέθοδος θα μπορούσε να είναι αυτή των CLT σε δάπεδα μειώνοντας το βάρος της κατασκευής, προσδίδοντας παράλληλα θερμομόνωση. Κατά αναλογία με τα δάπεδα έτσι και οι στέγες μπορούν να γκρεμιστούν μερικώς και να ενισχυθούν με εσωτερικό στρώμα CLT και θερμομόνωση. Οι [24] πρότειναν μια τεχνική για την αναβάθμιση ιστορικών στεγών κατασκευάζοντας ένα λεπτό κέλυφος που επικάλυπτε δοκάρια, σανίδες και την οροφή επιτυγχάνοντας διαφραγματική λειτουργία.



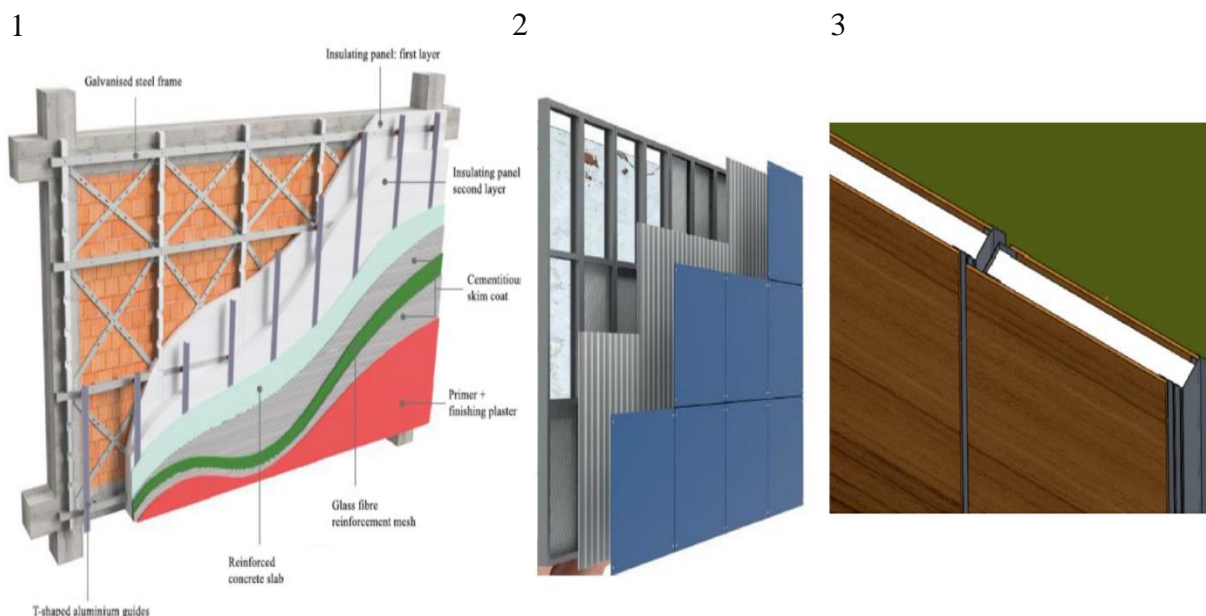
Σχήμα 13: Σχηματική απεικόνιση της αναβάθμισης στις στέγες [25]

## 6. ΙΔΙΑΙΤΕΡΕΣ ΤΕΧΝΟΤΡΟΠΙΕΣ ΕΤΑΙΡΕΙΩΝ ΤΟΥ ΚΛΑΔΟΥ

Στην ερευνητική εργασία των [26] εξετάστηκαν 3 διαφορετικές μορφές ενίσχυσης ονομαζόμενες ως Resisto 5.9, Duo System και MIL 15 αντίστοιχα. Κοινό όλων των μεθόδων που χαρακτηρίζονται ως seismic-energy coats αποτελεί η χρήση μεταλλικών εξωσκελετών και θερμομονωτικών πάνελ εντός του μεταλλικού σκελετού αυξάνοντας την σεισμική και ενεργειακή απόκριση της κατασκευής. Το υπό μελέτη κτίριο είναι ένα σχολείο που βρίσκεται στην περιοχή της Νάπολης. Η υ ήταν η διεύθυνση με την μεγαλύτερη ευπάθεια. Σύμφωνα με τον κώδικα απαιτείται ελάχιστο επίπεδο ασφάλειας 0.60.

Το Resisto 5.9 αποτελούταν από ένα μεταλλικό πλαίσιο στο οποίο είχαν εφαρμοστεί χιαστί μεταλλικά στοιχεία που συνεισφέρουν σεισμικά και εντός των κενών θερμομονωτικά πάνελ. Το Duo System αποτελούταν κι αυτό από ένα μεταλλικό πλαίσιο ένα χαλύβδινο φύλλο μορφής C που λειτουργεί ως σεισμικό στοιχείο όπου σε αυτό προσαρτιόντουσαν τα μονωτικά πάνελ. Το MIL 5 αποτελούταν από πλαίσιο και μονωτικά πάνελ μεταξύ δύο στρωμάτων πάνελ OSB (Oriented Strand Boards) πάχους 9 mm που χρησιμοποιούνται για την απορρόφηση σεισμικών δράσεων. Μετά από αναλύσεις push over ο δείκτης ασφάλειας δεν ξεπερνούσε σε καμία περίπτωση την ζητούμενη τιμή με την χρήση των τριών μεθόδων αποκλειστικά έτσι έπρεπε να ενισχυθούν και ορισμένα υποστυλώματα.

Η μέθοδος Resisto 5.9 αποδείχθηκε η πιο αποδοτική ενώ επιπλέον ικανοποίησε τους ελέγχους με λιγότερες παρεμβάσεις σε υποστυλώματα (6 για το Resisto 5.9, 26 για το DUO System και 30 για MIL 15). Τα φαινομενικά αρνητικά αποτελέσματα της έρευνας οφείλονται στην υψηλή ευπάθεια της υπάρχουσας δομής και στην παρουσία πολλών μεγάλα ανοίγματα στη μελέτη περίπτωσης που δεν επέτρεψαν την επέκταση των εξωσκελετών σε ολόκληρο το υψόμετρο της δομής. Ωστόσο, ακόμη και σε αυτό περίπτωση, δύο στις τρεις σεισμικές επιστρώσεις επέτρεψαν να φτάσουν σε αύξηση του επιπέδου ασφαλείας 0,10, που είναι το ελάχιστο ποσοστό που απαιτείται από τον ιταλικό κώδικα για την απόκτηση της σεισμικής αναβάθμισης συνηθισμένων κτιρίων. Αυτό σημαίνει ότι οι εξωσκελετοί από ελαφρύ μέταλλο είναι σίγουρα αποτελεσματικοί συστήματα μετασκευής για κτίρια κατοικιών ή ακόμα και για σχολικά κτίρια με κανονικές προσόψεις και διατάξεις σχεδίων.



Σχήμα 14: Παρουσίαση των συστημάτων 1) Resisto 5.9 2) Duo System και 3) MIL 15 [26]



## 7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να τονιστεί ότι η κάθε μέθοδος από αυτές που παρουσιάστηκαν έχει τις δικές τις αδυναμίες. Το υπάρχον υπόβαθρο σχετικά με την ταυτόχρονη αναβάθμιση (ενεργειακή και σεισμική) είναι σε πολύ χαμηλά επίπεδα. Αναγκαία κρίνεται η ενασχόληση μέσω από ερευνητικά προγράμματα ώστε να προκύψουν ποιοτικότερα συμπεράσματα. Η αποδοτικότητα με την χρήση όλων των τεχνολογιών ήταν έκδηλη ωστόσο η δυνατότητα σύγκρισης τους ως προς την απόδοση καθίσταται ιδιαίτερα δυσχερής. Τονίζεται ότι η εκλογή μιας εκ αυτών εξαρτάται από ορισμένους παράγοντες οι οποίοι σταχυολογούνται παρακάτω:

- ➔ Περιορισμοί σχετικοί με την επιφάνεια εφαρμογής (εξωτερική ή εσωτερική ανάλογα με την επιθυμία διατήρησης της όψης του κτιρίου ή μη).
- ➔ Διαθέσιμη τεχνολογία-κατάρτιση του εργατικού δυναμικού.
- ➔ Ανάγκη εξασφάλισης της μη διακοπής της λειτουργίας του κτιρίου.
- ➔ Ο αριθμός των δομικών στοιχείων και οι ανάγκες αυτών σε αναβάθμιση (μπορεί σεισμική να έχουν ανάγκη λιγότερα μέλη από αυτά που θέλουν ενεργειακή) .
- ➔ Η συμβατότητα μεταξύ των υλικών.
- ➔ Ο βαθμός της απαιτούμενης απόδοσης στο τέλος των εργασιών.
- ➔ Η αλληλεπίδραση που ενδεχομένως έχουν και δεν επιτρέπει την εφαρμογή ή την λειτουργία μιας εκ των δύο (χωρικοί περιορισμοί).
- ➔ Κόστος.
- ➔ Χρόνος.

Ανακεφαλαιώνοντας αναφέρεται ότι με την ταυτόχρονη αναβάθμιση τα οφέλη της ενεργειακής επαναφέρουν μέρος του κεφαλαίου πίσω ενώ εκείνη είναι σεισμικά ασφαλής.

## 8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Sebastiano D'Urso 1,\* and Bruno Cicero 2, From the Efficiency of Nature to Parametric Design. A Holistic Approach for Sustainable Building Renovation in Seismic Regions, February 2019, <https://www.mdpi.com/2071-1050/11/5/122>
- [2] O. Bellini, A. Marini, C. Passoni, Adaptive Exoskeleton Systems for the Resilience of the Built Environment, March 2, *TECHNE - Journal of Technology for Architecture and Environment*, 2018, pp. 71–80, <https://doi.org/10.13128/Techne-22120>.
- [3] T. Takeuchi, K. Yasuda, M. Iwata, 'Seismic Retrofitting Using Energy Dissipation Façades', *Improving the Seismic Performance of Existing Buildings and Other Structures*, American Society of Civil Engineers, San Francisco, California, United States, 2009, ISBN 978-0-7844-1084-4, pp. 1000–1009, [https://doi.org/10.1061/41084\(364\)91](https://doi.org/10.1061/41084(364)91).
- [4] Y. Misawa, K. Azuma, W. Cho, S. Iwamoto, M. Iwata, Simulation study on energy conservation performance for integrated external louver facades, June 23, *J. Facade Des. Eng.* 3 (3–4) (2016) 237–252, <https://doi.org/10.3233/FDE-160043>.
- [5] A. Marini, C. Passoni, A. Belleri, F. Feroldi, M. Preti, G. Metelli, P. Riva, E. Giuriani, G. Plizzari, Combining seismic retrofit with energy refurbishment for the sustainable renovation of RC buildings: a proof of concept, September 3, *Eur. J. Environ. Civ. Eng.* (2017) 1–21, <https://doi.org/10.1080/>
- [6] Ferrante, A., Mochi, G., Predari, G., Badini, L., Fotopoulou, A., Gulli, R., & Semprini, G. (2018). A European Project for Safer and Energy Efficient Buildings: Pro-GET-onE (Proactive Synergy of inteGrated Efficient Technologies on Buildings' *Envelopes*). *Sustainability*, 10(3), 812. doi:10.3390/su10030812, <https://www.mdpi.com/2071-1050/10/3/812>
- [7] Anastasia Fotopoulou\*, An integrated system for façade additions combining safe, 2019, energy efficient and userorientated solutions, <https://rivistatema.com/sito/wp-content/uploads/2021/10/216-1-562-1-10-20190617.pdf>
- [8] Foti, D., Ruggiero, F., Sabbà, M. F., & Lerna, M. (2020). A Dissipating Frames for Seismic Retrofitting and Building Energy-Efficiency. *Infrastructures*, 5(9), 74. doi:10.3390/infrastructures5090074, <https://www.mdpi.com/2412-3811/5/9/74>
- [9] Vittoria F. Parrella and Luisa Molari \*, Building Retrofitting System Based on Bamboo-Steel Hybrid Exoskeleton Structures: A Case Study, 2021, <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/11/5984>
- [10] Manfredi, V., Santarsiero, G., Masi, A., & Ventura, G. (2021). The High-Performance Dissipating Frame (HPDF) System for the Seismic Strengthening of RC Existing Buildings. *Sustainability*, 13(4), 1864. doi:10.3390/su13041864
- [11] Talledo, D.A., Rocca, I. Pozza, L. Savoia, M. Saetta, 2021, A Numerical Assessment of an Innovative RC-Framed Skin for Seismic Retrofit Intervention on Existing Buildings, <https://www.mdpi.com/2076-3417/11/21/9835>
- [12] L. Pozza , A. Degli Esposti, Semprini, G., Savoia, M. Multidisciplinary Performance Assessment of an Eco-Sustainable RC-Framed Skin for the Integrated Upgrading of Existing Buildings. *Sustainability* 2021, 13, 9225. <https://doi.org/10.3390/su13169225>
- [13] V. Pertile, A. Stella, L. De Stefani, R. Scotta, Experimental tests on full-scale specimens for the characterization of an integrated retrofitting system for existing buildings, in: Proc. 18th ANIDIS Conference, 2019. ANIDIS, Ascoli Piceno (Italy).
- [14] Διατριβή Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης, Καψάλη Α. Παναγιώτη, Συνδυασμένη Αντισεισμική Ενίσχυση και Ενεργειακή Αναβάθμιση Τοιχοποιίας σε Εντός Επιπέδου Καταπόνηση: Πειραματική και Αναλυτική Μελέτη, Πάτρα (2017)
- [15] T. Triantafilou, D. Bournas, P. Gournelos, Combined seismic and energy upgrading of existing buildings using advanced materials: Case studies on Reinforced Concrete Buildings in South Europe, (2019), [https://www.researchgate.net/publication/330400086\\_Combined\\_seismic\\_and\\_energy\\_upgra](https://www.researchgate.net/publication/330400086_Combined_seismic_and_energy_upgra)

[ding of existing buildings using advanced materials Case studies on Reinforced Concrete Buildings in South Europe](#)

[16] H.-W. Choi, S.-H. Lee, H.-S. Choi, T.-H. Kim, E.-R. Baek, Static cyclic loading test of the seismic and energy simultaneous retrofit panel for existing unreinforced masonry buildings, *J. Kor. Inst. Struct. Maintain. Inspect.* 24 (4) (2020) 81–90, <https://doi.org/10.11112/jksmi.2020.24.4.81>.

[17] Valluzzi, M. R., Saler, E., Vignato, A., Salvalaggio, M., Croatto, G., Dorigatti, G., & Turrini, U. (2021). *Nested Buildings: An Innovative Strategy for the Integrated Seismic and Energy Retrofit of Existing Masonry Buildings with CLT Panels*. *Sustainability*, 13(3), 1188. <https://doi.org/10.3390/su13031188>, <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/3/1188>

[18] Jacopo Zanni, Stefano Cademartori, Alessandra Marini, Integrated Deep Renovation of Existing Buildings with Prefabricated Shell Exoskeleton. *Sustainability* 2021, 13, 11287. <https://doi.org/10.3390/su132011287>

[19] Matteo Busselli, Davide Cassol, 2021, Timber Based Integrated Techniques to Improve Energy Efficiency and Seismic Behaviour of Existing Masonry Buildings, <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/18/10379>

[20] Mora, T. D., Righi, A., Peron, F., & Romagnoni, P. (2015). *Functional, Energy and Seismic Retrofitting in Existing Building: An Innovative System Based on xlam Technology*. *Energy Procedia*, 82, 486–492. doi:10.1016/j.egypro.2015.11.851, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610215026119>

[21] Artino, A., Evola, G., Margani, G., & Marino, E. M. (2019). *Seismic and Energy Retrofit of Apartment Buildings through Autoclaved Aerated Concrete (AAC) Blocks Infill Walls*. *Sustainability*, 11(14), 3939. doi:10.3390/su11143939 10.3390/su11143939, <https://www.mdpi.com/2071-1050/11/14/3939>

[22] A. Masi, G. Santarsiero, G. Ventura, Strategie per la riduzione del rischio sismico applicate agli edifici scolastici: un caso studio, XVII Convegno ANIDIS L'ingegneria Sismica in Italia, Pistoia, 2017, pp. 17–21.

[23] J. Wernery, A. Ben-Ishai, B. Binder, S. Brunner, Aerobrick — an aerogel-filled insulating brick, October 1, *Energy Proc.* 134 (2017) 490–498, <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.607>. *Sustainability in Energy and Buildings 2017: Proceedings of the Ninth KES International Conference, Chania, Greece, 5-7 July 2017*.

[24] E.P. Giuriani, A. Marini, M. Preti, Thin-folded shell for the renewal of existing wooden roofs, August 17, *Int. J. Architect. Herit.* 10 (6) (2016) 797–816, <https://doi.org/10.1080/15583058.2015.1075626>.

[25] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710222012803>

[26] Emilia Meglio, Giovanna Longobardi, Antonio Formisano, *Integrated seismic-energy retrofit systems for preventing failure of a historical RC school building: Comparison among metal lightweight exoskeleton solutions*, December 2023, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1350630723006179>