

Ολοκληρωμένες επεμβάσεις κτηρίων από ωπλισμένο σκυρόδεμα με συστήματα κάθετου δάσους (vertical forest)

Πειραματική διερεύνηση με τη χρήση συστήματος ελέγχου δομικής
ακεραιότητας

Μαριστέλλα Βουτετάκη

Επ. Καθηγήτρια, Τμήμα Αρχιτεκτόνων Μηχανικών ΤΑΜ, Κιμμέρια
Πανεπιστημιούπολη Κτίριο Βιβλιοθήκης, 67100, Ελλάδα, Ξάνθη,
mvouteta@arch.duth.gr

Θεόδωρος Ρουσάκης

Αν. Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, ΤΠΜ, Κιμμέρια Πανεπιστημιούπολη
Εργαστήριο Ωπλισμένου Σκυροδέματος και Αντισεισμικών Κατασκευών (Εργ.
ΩΣΑΚ), 67100, Ελλάδα, Ξάνθη, trousak@civil.duth.gr

Μαρία Ναούμ

Μεταδιδακτορική Ερευνήτρια, ΤΠΜ, mnaoum@civil.duth.gr

Γιώργος Σαπίδης

Μεταδιδακτορικός Ερευνητής, ΤΠΜ, gsapidis@civil.duth.gr

Νίκος Παπαδόπουλος

Μεταδιδακτορικός Ερευνητής, ΤΠΜ, nikpapad@civil.duth.gr

Αδαμάντης Ζάπρης

Μεταδιδακτορικός Ερευνητής, ΤΠΜ, azapris@civil.duth.gr

Ιωάννης Ξυνόπουλος

Υποψήφιος Διδάκτορας, ΤΠΜ, ixynopou@civil.duth.gr

Βιολέτα Κυτίνου

Μεταδιδακτορική Ερευνήτρια, ΤΠΜ, vkytiou@civil.duth.gr

Αθανασία Θωμόγλου

Μεταδιδακτορική Ερευνήτρια, ΤΠΜ, athomogl@civil.duth.gr

Κωνσταντίνος Χαλιωρής

Καθηγητής, ΤΠΜ, chaliori@civil.duth.gr

Βαχάν Βανιάν

Υποψήφιος Διδάκτορας, ΤΠΜ, vvanian@civil.duth.gr

Θεοδώρα Φαναραδέλλη

Μεταδιδακτορική Ερευνήτρια, ΤΠΜ, tfanarad@civil.duth.gr

Μακρίνη Μαχά

Υποψήφια Διδάκτορας, Institute of Structural Engineering, BOKU University, 1180 Vienna, Austria, makrini.macha@boku.ac.at

Μάρθα Καραμπίνη

Υποψήφια Διδάκτορας, ΤΠΜ, mkarampi@civil.duth.gr

Μάρθα Λάππα

Υποψήφια Διδάκτορας, ΤΠΜ, mlappa@civil.duth.gr

Εμμανουήλ Γκόλιας

ΕΔΙΠ, ΤΠΜ, egkolia@civil.duth.gr

Στέφανος Κέλλης

ΕΤΕΠ, ΤΠΜ, skellis@civil.duth.gr

Γιώργος Μαλλίνης

Καθηγητής, Τμήμα Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών ΤΑΤΜ, Πολυτεχνική Σχολή, Πανεπιστημιούπολη ΑΠΘ, 541 24, Θεσσαλονίκη, gmallin@topo.auth.gr

Ιφιγένεια Θεοδωρίδου

Μεταδιδακτορική Ερευνήτρια, ΤΑΤΜ, Πολυτεχνική Σχολή, Πανεπιστημιούπολη ΑΠΘ, 541 24, Θεσσαλονίκη, ifigeneia@e2architects.eu

Μαρία Στεφανίδου

Μεταδιδακτορική Ερευνήτρια, ΤΑΤΜ, stefanidou.m@gmail.com

Κατερίνα Βατίτση

Υποψήφια Διδάκτορας, ΤΑΤΜ, avatitsi@topo.auth.gr

Περίληψη

Το υφιστάμενο κτηριακό απόθεμα παρουσιάζει σημάδια γήρανσης και χρήζει στοχευμένων παρεμβάσεων αναβάθμισης. Οι ολιστικές προσεγγίσεις ανακαίνισης, όπως τα Συστήματα Κάθετου Δάσους ΣΚΔ (Vertical Forest System – VFS), αναδύονται ως βιώσιμες εναλλακτικές λύσεις έναντι της κατεδάφισης και πλήρους ανακατασκευής. Ωστόσο, οι επεμβάσεις που απαιτούνται για την ενσωμάτωσή τους, ενδέχεται να αυξάνουν τον δομικό κίνδυνο στις συμβατικές κατασκευές από ωπλισμένο σκυρόδεμα. Η παρούσα εργασία εντάσσεται στο πλαίσιο χρηματοδοτούμενου ερευνητικού προγράμματος (GREENERGY) με Επιστημονικά Υπεύθυνο τον Αν. Καθηγητή Θεόδωρο Ρουσάκη και διερευνά στρατηγικές ενίσχυσης και αναβάθμισης υφιστάμενων κτηρίων από ωπλισμένο σκυρόδεμα ΩΣ με υλικά φιλικά προς το περιβάλλον για την ενσωμάτωση ΣΚΔ. Η έρευνα λαμβάνει υπόψη δομικές, περιβαλλοντικές και λειτουργικές παραμέτρους, όπως τα χαρακτηριστικά της βλάστησης και τις συνθήκες άνεσης των χρηστών στον δομημένο χώρο. Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται μέρος των αποτελεσμάτων της έρευνας που αφορά ολοκληρωμένες επεμβάσεις σε κτήρια και την αξιολόγηση της σεισμικής συμπεριφοράς τους με ενσωματωμένα συστήματα ΚΔ. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι οι κατάλληλα σχεδιασμένες επεμβάσεις με συστήματα ΚΔ μπορούν να προσφέρουν υψηλή σεισμική αντοχή ακόμη και σε ακραίες συνθήκες σεισμικής διέγερσης. Ο συνδυασμός επιτυχημένων δομικών επεμβάσεων και συστημάτων ΚΔ αναδεικνύεται ως βιώσιμη λύση, η οποία συνδέει την πράσινη υποδομή με τον ανθεκτικό αστικό σχεδιασμό.

Λέξεις κλειδιά

Επεμβάσεις σε Κατασκευές Ωπλισμένου Σκυροδέματος, Συστήματα Κάθετου Δάσους ΣΚΔ, Αποτίμηση Δομικών Βλαβών, Σύστημα Ελέγχου Δομικής Ακεραιότητας

Εισαγωγή

Η παγκόσμια αστικοποίηση δημιουργεί προκλήσεις όπως η αύξηση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και το φαινόμενο της αστικής θερμικής νησίδας (Abubakar και Alshammari, 2023). Η μείωση των χώρων πρασίνου και η απώλεια φυσικών οικοτόπων οδηγούν σε διατάραξη οικολογικών διαδικασιών, μείωση της βιοποικιλότητας και έλλειψη οικοσυστημικών υπηρεσιών, επηρεάζοντας τη σωματική και ψυχολογική υγεία των κατοίκων. Η αύξηση θερμοκρασιών και η συγκέντρωση θερμότητας στις αστικές περιοχές προκαλεί αυξημένη ενεργειακή κατανάλωση για ψύξη, επιβαρύνει την ανθρώπινη υγεία και μειώνει τη θερμική άνεση, ενώ η πλειονότητα των κτηρίων παραμένει ενεργειακά αναποτελεσματική, δημιουργώντας

την ανάγκη για εφαρμογή βιώσιμων και αποδοτικών στρατηγικών ψύξης του αστικού χώρου (Yang κ.α., 2025).

Στο πλαίσιο αυτό, οι λύσεις βασισμένες στη φύση και ειδικότερα τα συστήματα Κάθετου Δάσους ΚΔ (ή συστήματα κάθετης βλάστησης, vertical greenery systems VGS), αναδεικνύονται ως αποτελεσματικά εργαλεία για τη μείωση των επιπτώσεων των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και την ενσωμάτωση πρασίνου σε αστικά περιβάλλοντα (Al-Kodmany, 2023). Τα VFSs μπορούν να εφαρμοστούν σε όψεις κτηρίων ή εσωτερικούς χώρους, προσφέροντας πολλαπλά περιβαλλοντικά, κοινωνικά και οικονομικά οφέλη. Παρά τα σημαντικά οφέλη τους, η αποτελεσματικότητα των VFSs εξαρτάται από παράγοντες όπως η επιλογή και η διάταξη των φυτών, ο προσανατολισμός των όψεων, οι τοπικές κλιματικές συνθήκες και η αντοχή και η συντήρηση των κτηριακών κελυφών. Η παρούσα εργασία παρουσιάζει αποτελέσματα από το ερευνητικό πρόγραμμα «Ανθεκτική Αντισεισμική Ανακαίνιση Κατασκευών από Ωπλισμένο Σκυρόδεμα σε Κάθετο Δάσος» (Resilient Vertical Forest Renovation of Reinforced Concrete Structures in Seismic prone areas, GREENERGY), με στόχο την ασφαλή και αποδοτική ενσωμάτωση των κάθετων δασών σε κτήρια από ωπλισμένο σκυρόδεμα, εστιάζοντας στην προώθηση βιώσιμου αστικού σχεδιασμού καθώς και στην περιβαλλοντική και δομική αναβάθμιση του υπάρχοντος κτηριακού αποθέματος (μεταξύ άλλων).

1 Πλεονεκτήματα και προκλήσεις στην εφαρμογή συστημάτων κάθετων δασών

Τα συστήματα ΚΔ αναδεικνύονται ως καινοτόμες λύσεις για την ενσωμάτωση της φύσης στον αστικό χώρο, προσφέροντας πολλαπλά οφέλη σε περιβαλλοντικό, κοινωνικό και οικονομικό επίπεδο (Theodoridou κ.α., 2025). Συμβάλλουν στη βελτίωση της ποιότητας του αέρα, στη μείωση θερμοκρασιών και ηχορύπανσης, στην ενίσχυση της βιοποικιλότητας, στην εξοικονόμηση ενέργειας, στην προστασία των όψεων των κτηρίων και στην αύξηση της κοινωνικής ευημερίας και της αξίας των ακινήτων. Παρά τα σημαντικά αυτά οφέλη, η αποτελεσματικότητα των συστημάτων ΚΒ εξαρτάται από παράγοντες όπως οι κλιματικές συνθήκες, ο τύπος, ο προσανατολισμός και η συντήρηση των φυτών, καθιστώντας απαραίτητο τον προσεκτικό σχεδιασμό και τη συνεχή φροντίδα τους. Επίσης, κρίσιμη είναι η ορθή τεχνική εφαρμογή τους στα κτίρια, ώστε να επιτυγχάνεται η ασφάλεια και η μακροχρόνια λειτουργία τους (Vanian κ.α., 2025).

1.1 Περιβαλλοντικά Οφέλη

Τα συστήματα ΚΔ βελτιώνουν την ποιότητα του αέρα, μειώνοντας επιβλαβή σωματίδια και αέρια ρύπων, ενώ τα φυτά μπορούν να απορροφούν και οργανικές πτητικές ενώσεις. Μέσω της φωτοσύνθεσης μειώνεται το CO₂ και αυξάνεται η δέσμευση άνθρακα, απελευθερώνοντας το πολύτιμο οξυγόνο. Τα συστήματα ΚΔ συμβάλλουν στη μείωση θερμοκρασίας σε αστικά περιβάλλοντα μέσω σκίασης, εξατμισοδιαπνοής και θερμομονωτικών ιδιοτήτων των τοίχων, μειώνοντας την ενεργειακή κατανάλωση για ψύξη έως 20%. Επιπλέον, οι πράσινοι κάθετοι τοίχοι και δάπεδα (ως οργανικά στοιχεία των συστημάτων βλάστησης ΚΔ) παγιδεύουν και καθυστερούν τη ροή όμβριων υδάτων, συμβάλλοντας στη διαχείριση υδάτων και τη μείωση πλημμυρικών κινδύνων, ενώ υποστηρίζουν την αστική βιοποικιλότητα, παρέχοντας καταφύγιο για πουλιά, έντομα και μικροοργανισμούς.

1.2 Κοινωνικά Οφέλη

Τα συστήματα ΚΔ μειώνουν την ηχορύπανση, προσφέρουν ψυχολογικά οφέλη όπως μείωση στρες, ενίσχυση συγκέντρωσης και κοινωνικής συνοχής, βελτιώνουν την αισθητική των περιοχών και ενισχύουν την περιβαλλοντική ευαισθητοποίηση. Επιπλέον, μπορούν να υποστηρίξουν την αστική γεωργία και να βελτιώσουν τη θερμική άνεση γύρω από τα κτίρια.

1.3 Οικονομικά Οφέλη

Τα συστήματα ΚΔ μειώνουν την ενεργειακή κατανάλωση για θέρμανση και ψύξη, υπό προϋποθέσεις προστατεύουν τις όψεις των κτηρίων από φθορές και αυξάνουν την αξία ακινήτων. Παράλληλα, τα συστήματα ΚΔ μπορούν να αξιοποιήσουν το νερό από τις χρήσεις του κτηρίου για την άρδευση των φυτών, μειώνοντας την κατανάλωση νερού συμβάλλοντας στη βιώσιμη διαχείριση υδάτινων πόρων. Επιπλέον, η φύτευση και η συντήρηση δημιουργεί νέες θέσεις εργασίας.

1.4 Προκλήσεις στην εφαρμογή συστημάτων κάθετων δασών

Η ενσωμάτωση συστημάτων ΚΔ σε κτήρια από ΩΣ παρουσιάζει σημαντικές τεχνικές, περιβαλλοντικές και κοινωνικές προκλήσεις. Καταρχάς, οι κατασκευαστικές απαιτήσεις αποτελούν καθοριστικό παράγοντα για την επιτυχή εφαρμογή των ΚΔ. Τα πρόσθετα κατακόρυφα φορτία που προέρχονται από τα φυτά, το υπόστρωμα και το νερό άρδευσης απαιτούν προσεκτικό σχεδιασμό της φέρουσας ικανότητας των υφιστάμενων δομικών στοιχείων, ιδιαίτερα σε κτήρια που δεν σχεδιάστηκαν αρχικά για επιπρόσθετο φορτίο. Η εκτίμηση της φέρουσας ικανότητας απαιτεί λεπτομερή ανάλυση των μηχανικών χαρακτηριστικών του σκυροδέματος και των οπλισμών, καθώς και των δυναμικών επιδράσεων λόγω ανέμου ή σεισμικών διεγέρσεων που μπορεί να αλληλεπιδρούν με το σύστημα φυτοκάλυψης.

Επιπλέον, κρίσιμο παράγοντα αποτελεί η υγειονομική και περιβαλλοντική διαχείριση των φυτών. Η επιλογή του είδους των φυτών πρέπει να λαμβάνει υπόψη τις κλιματικές συνθήκες, την ηλιακή ακτινοβολία, την υγρασία και την αντοχή στα αστικά περιβάλλοντα. Η άρδευση και η συντήρηση των φυτών απαιτούν συστήματα ελέγχου και αυτοματοποίησης για την εξασφάλιση της βιωσιμότητας της βλάστησης, ενώ ταυτόχρονα πρέπει να αποφεύγεται η εισροή υπερβολικού νερού που μπορεί να προκαλέσει φθορές ή διάβρωση στα δομικά στοιχεία από σκυρόδεμα.

Πρόσθετες προκλήσεις αποτελούν η συντήρηση και η διαχείριση κινδύνων ΚΔ. Η πρόσβαση για περιοδικό κλάδεμα, αντικατάσταση φυτών και επιθεώρηση των υποστηρικτικών κατασκευών είναι περιορισμένη σε κατακόρυφες επιφάνειες, γεγονός που αυξάνει το κόστος και την πολυπλοκότητα της διαχείρισής τους. Παράλληλα, απαιτείται εκτίμηση των πιθανών κινδύνων πυρκαγιάς, διείσδυσης ριζών που μπορεί να επηρεάσει τα δομικά στοιχεία, καθώς και βιολογικών παρασίτων που επηρεάζουν τη μακροχρόνια απόδοση του συστήματος.

Τέλος, η ανθρώπινη διάσταση αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για την επιτυχή ενσωμάτωση των συστημάτων ΚΔ. Η άνεση και η ασφάλεια των χρηστών, η ψυχολογική αντίληψη του πρασίνου και η αποδοχή του συστήματος από τους κατοίκους επηρεάζουν την κοινωνική βιωσιμότητα του έργου. Η πολυπαραμετρική αλληλεπίδραση μεταξύ κατασκευαστικών, περιβαλλοντικών και κοινωνικών παραμέτρων απαιτεί ολοκληρωμένη προσέγγιση σχεδιασμού και ανάλυσης. Αναλύσεις με μεθόδους, όπως η Monte Carlo, καθώς και με τη χρήση της System-Theoretic Process Analysis (STPA), εφαρμόζονται για την αξιολόγηση της συμπεριφοράς κρίσιμων στοιχείων των ΚΔ (Vanian, Rousakis, κ.α., 2025). Στόχος είναι η επίτευξη της ασφάλειας, της λειτουργικότητας και της μακροχρόνιας αποδοτικότητας των συστημάτων ΚΔ σε κτίρια από ΩΣ. Παράλληλα το GREENERGY περιλαμβάνει ανασκόπηση όλων των υφιστάμενων αναλυτικών προσομοιωμάτων (Vanian, Fanaradelli, κ.α., 2025) και λεπτομερή αναλυτική προσομοίωση των εμπλεκόμενων στοιχείων σχεδιασμού που επιτρέπει την αξιόπιστη αναλυτική αναπαραγωγή της τυχαίας σεισμικής απόκρισης.

Ο έλεγχος της δομικής ακεραιότητας των φερόντων και μη δομικών στοιχείων έναντι σεισμικών δράσεων αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για την επίτευξη της ασφάλειας και της ανθεκτικότητας των κατασκευών, ιδιαίτερα όταν ενσωματώνονται συστήματα κάθετων δασών.

2 Πειραματική εφαρμογή συστημάτων κάθετων δασών σε κατασκευή

2.1 Αρχικό δοκίμιο Ωπλισμένου Σκυροδέματος

Πρόκειται για ένα μονώροφο τρισδιάστατο κτήριο ωπλισμένου σκυροδέματος, ενός ανοίγματος σε κάθε διεύθυνση σχεδιασμένο σύμφωνα με παλαιά κανονιστικά πρότυπα (προ-Eurocode). Το κτήριο διαθέτει δύο πλήρεις τοιχοπληρώσεις στα δύο απέναντι ανοίγματα και δύο μερικές τοιχοπληρώσεις στα εναπομείναντα. Στο δοκίμιο έχουν εφαρμοστεί συνήθεις ανεπάρκειες, οι οποίες συναντώνται σε υφιστάμενα κτήρια παλαιού τύπου, όπως σύστημα ισχυρών οριζόντιων στοιχείων – ασθενών υποστυλωμάτων, ανεπαρκής εγκάρσιος οπλισμός (συνδετήρες) στα υποστυλώματα και χρήση τοιχοπληρώσεων με κονίαμα σύνδεσης χαμηλής αντοχής. Τα χαρακτηριστικά αυτά θεωρούνται κρίσιμα σύμφωνα με τους νέους κανονισμούς, τόσο για την αποφυγή κατάρρευσης των υποστυλωμάτων και συνολικότερα της κατασκευής, όσο και των διαφορετικών τοιχοπληρώσεων σε εντός και εκτός επιπέδου καταπόνηση. Το δοκίμιο με διαστάσεις κάτοψης 2,70 m × 2,70 m και συνολικό ύψος 1,95 m σχεδιάστηκε κατάλληλα, ώστε να είναι αξιοποιεί πλήρως τις προηγμένες δυνατότητες της σεισμικής τράπεζας του Δημοκρίτειου Πανεπιστημίου Θράκης (ΔΠΘ), με επιφάνεια τραpezιού 3,40 m x 3,4 m, μέγιστη επιτάχυνση διέγερσης βάσης 2,9g και μέγιστη ικανότητα ωφέλιμης μάζας και ροπής ανατροπής 8 t και 8 tm αντίστοιχα (Rousakis, Lappa, κ.α. 2025) (βλ. Εικόνα 1).



Εικόνα 1. Όψεις μονώροφου κτηρίου ΩΣ με τοιχοποιίες πλήρωσης

Η σεισμική φόρτιση ακολουθεί σταδιακή αύξηση της έντασης του σεισμού της 20ής Ιουνίου 1978 στη Θεσσαλονίκη, ενός από τους πιο σημαντικούς σεισμούς της σύγχρονης Ελληνικής ιστορίας. Η μεθοδολογία περιλάμβανε σταδιακή αύξηση της μέγιστης επιτάχυνσης της διέγερσης, από 0.1g έως και 1.1g, επιτρέποντας την παρακολούθηση της δυναμικής απόκρισης του κτηρίου με τοιχοπληρώσεις και την εξέλιξη τυχόν βλαβών. Κατά τη διάρκεια της σεισμικής διέγερσης, ήταν δυνατή η καταγραφή της συνολικής συμπεριφοράς του φορέα και της τοπικής κρίσιμων στοιχείων, καθώς και η αξιολόγηση των απαιτήσεων για την ασφαλή και αποτελεσματική ενσωμάτωση συστημάτων κάθετων δασών.

2.2 Επεμβάσεις για την εφαρμογή συστημάτων κάθετων δασών

Μετά την πρώτη φάση σειράς διεγέρσεων, το δοκίμιο αξιολογήθηκε και στη συνέχεια εφαρμόστηκαν επεμβάσεις ενισχύσεων δομικών στοιχείων καθώς και το σύστημα ΚΔ (Rousakis, Vanian, κ.α., 2025) (βλέπε Εικόνα 2 (Rousakis, Lappa, κ.α. 2025)). Στην εικόνα 2α φαίνεται η φωτορεαλιστική άποψη των ενδεχόμενων φυτεύσεων σε κάθετους τοίχους και στα φυτοδοχεία, σε σχέση με τα αντίστοιχα προσομοιώματα της έρευνας. Στην εικόνα 2β παρουσιάζεται το πειραματικό προσομοίωμα με τα οκτώ προσομοιώματα των κάθετων τοίχων φύτευσης καθώς και με τα 5 φυτοδοχεία στο δώμα και εξώστες (επίσης, εικόνα 2δ). Η σειρά εφαρμογής των δομικών επεμβάσεων ήταν η εξής: 1. διάνοιξη κατακόρυφων αντισεισμικών αρμών (κενών) μεταξύ υποστυλωμάτων και τοιχοπληρώσεων (εικόνα 2ε με πράσινο χρώμα), 2. περιτύλιξη των κάτω και άνω κρίσιμων περιοχών των υποστυλωμάτων με κορδόνι από βασάλτη (εικόνα 2β,γ,ε), 3. Εφαρμογή αντισεισμικού αρμού πολυουραιθάνης (πλήρωση των κατακόρυφων κενών που δημιουργήθηκαν στο 1) στις έξι κατακόρυφες διεπιφάνειες μεταξύ υποστυλώματος και τοιχοπλήρωσης (εικόνα 2γ,ε, polyurethane flexible joint, PUFJ, με μαύρο χρώμα (Rousakis, Ilki, κ.α. 2020), και 4. εφαρμογή εξωτερικού (μονόπλευρου) μανδύα με υαλόπλεγμα επικολημένο στις τοιχοπληρώσεις με ρητίνη πολυουρεθάνης (βλέπε εικόνα 2β).

Η τελευταία επέμβαση αφορούσε την εφαρμογή εξωτερικού μανδύα πλέγματος ινών (Sika Wrap 350G Grid) στις ρηγματωμένες τοιχοπληρώσεις. Το πλέγμα, ήταν κατασκευασμένο από ενισχυμένο πολυμερές με υαλοϊνες (GFRP), με βάρος 360 g/m². Το υλικό εμποτίστηκε και συγκολλήθηκε με ρητίνη τύπου PS (Sika PS), με τελική επίστρωση με ρητίνη πολυουρεθάνης PS, ώστε να καλυφθούν τα κενά του πλέγματος σχηματίζοντας έναν μανδύα FRPU (Fiber Reinforced PolyUrethane, (Rousakis, Ilki, κ.α. 2020), (Εικόνα 2β, με μαύρο χρώμα). Και για τα δύο συστήματα (FRPU και PUFJ) κατέχεται ενεργό ευρωπαϊκό δίπλωμα ευρεσιτεχνίας (<https://patents.google.com/patent/EP3779101A1/en>).

Για τη προσομοίωση της σεισμικής συμπεριφοράς των κάθετων πράσινων τοίχων, κατασκευάστηκαν και τοποθετήθηκαν ειδικές υποκατάστατες χαλύβδινες κατασκευές ώστε να προσομοιάζουν τόσο τη μάζα όσο και τη δυσκαμψία των πραγματικών κάθετων πράσινων τοίχων, συμπεριλαμβανομένου του βάρους της φυτοκάλυψης. Το βάρος κάθε χαλύβδινης κατασκευής ήταν 40 kg/m^2 , δηλαδή 12 kg ανά μονάδα, συνολικά 96 kg για τους οκτώ κάθετους πράσινους τοίχους. Οι κατασκευές στερεώθηκαν τόσο στην περιμετρική θεμελιοδοκό μέσω δύο χαλύβδινων κοχλιών, όσο και στην επάνω πλάκα με κορδόνια ή κοχλία, Εικόνα 2β,γ,ε.

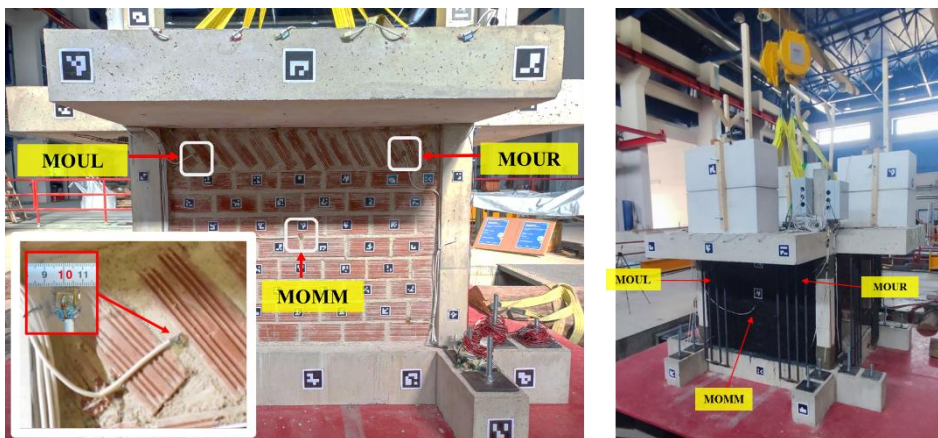
Επιπλέον, πέντε διπλά φυτοδοχεία από σκυρόδεμα, συνολικού βάρους 153 kg το κάθε ένα, τοποθετήθηκαν στην πλάκα της οροφής για να προσομοιώσουν τη μάζα του φυτοδοχείου μαζί με το έδαφος και το δέντρο με τις ρίζες, βάρους 600 kg/m^2 (άνω όριο σε συνήθεις φυτοκαλύψεις, εικόνα 2δ). Προσομοιώθηκε ένα απαιτητικό σενάριο, ευάλωτο σε ανατροπή κατά τη διάρκεια ισχυρής σεισμικής διέγερσης. Επιπλέον, ξύλινα στοιχεία στερεώθηκαν στα φυτοδοχεία για να προσομοιώσουν τα εξέχοντα λικνιζόμενα τμήματα συνήθων δέντρων (Εικόνα 2α,β).



Εικόνα 2. Μονώροφο κτήριο μετά τις ολοκληρωμένες επεμβάσεις για την εφαρμογή ΚΔ, α) φωτορεαλιστική απόδοση της επέμβασης, β) άποψη του δοκιμίου, γ) εσωτερικό του δοκιμίου με εστίαση στα περιτυλιγμένα κορδόνια, στον αντισεισμικό αρμό πολυουραιθάνης (PUFJ) μεταξύ τοιχοποιίας και υποστυλωμάτων και το χαλύβδινο προσομοίωμα των κάθετων τοίχων φυτοκάλυψης, δ) θέσεις των 5 φυτοδοχείων στο δώμα και εξώστες, ε) εξωτερική όψη με τις δομικές επεμβάσεις ενίσχυσης

2.3 Έλεγχος δομικής ακεραιότητας

Το δοκίμιο ενοργανώθηκε πλήρως για την καταγραφή της δυναμικής απόκρισης κατά τη διάρκεια της σεισμικής διέγερσης (Rousakis, Lappa, κ.α., 2025), (Rousakis, Vanian, κ.α., 2025). Το εκτεταμένο δίκτυο αισθητήρων παρακολούθησης κατέγραψε τις αποκρίσεις από τις συνολικές και τοπικές μετακινήσεις και επιταχύνσεις του δοκιμίου έως την τοπική ανάπτυξη ανηγμένων παραμορφώσεων και την εξέλιξη των εσωτερικών βλαβών. Κάθε αισθητήρας τοποθετήθηκε σε ειδικά επιλεγμένες θέσεις, ώστε να παρακολουθεί κρίσιμες περιοχές του φέροντα οργανισμού και την απόκριση των συστημάτων ΚΔ. Η ενοργάνωση του αρχικού δοκιμίου περιγράφεται αναλυτικά στη εργασία (Rousakis, Vanian, κ.α., 2025). Σαράντα οκτώ πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες (PZTs) κατανεμήθηκαν στρατηγικά στο δοκίμιο, εκ των οποίων τριάντα επτά ήταν κατάλληλα ενσωματωμένοι μέσα στο σκυρόδεμα και έντεκα επικολημένοι εξωτερικά στις επιφάνειες των τοιχοποιιών (Εικόνα 3).



Εικόνα 3. Εφαρμογή πιεζοηλεκτρικών αισθητήρων (PZTs) εξωτερικά της τοιχοπλήρωσης

Η παρούσα εργασία εστιάζει στα αποτελέσματα από το σύστημα ελέγχου δομικής ακεραιότητας με τη χρήση ευφυών πιεζοηλεκτρικών αισθητήρων (Voutetaki, Naoum, Papadopoulos, & Chalioris, 2022), (Naoum, Sapidis, Papadopoulos, & Voutetaki, 2023) οι οποίοι επικολήθηκαν στην εκτός επιπέδου πλήρη τοιχοποιία. Το «Αυτόνομο σύστημα παρακολούθησης της δομικής ακεραιότητας σε πραγματικό χρόνο» αποτελεί κατοχυρωμένη εφεύρεση με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας υπ' αριθ. 1010988. (Οργανισμός Βιομηχανικής Ιδιοκτησίας Τεύχος Α' Ευρεσιτεχνίες 07/2025).

Βασικός στόχος των συστημάτων ελέγχου δομικής ακεραιότητας είναι να ληφθούν δεδομένα για την ακεραιότητα της δομικής κατάστασης ενός στοιχείου κατά τη διάρκεια ζωής του ή/και πραγματοποιώντας έναν άμεσο έλεγχο της κατάστασης της κατασκευής μετά από ένα σοβαρό σεισμό.

Κατά τη φάση Β, μετά την εφαρμογή των επεμβάσεων και την εγκατάσταση των συστημάτων ΚΔ στο δοκίμιο, προστέθηκαν, πέρα από τα ήδη υπάρχοντα μετρητικά συστήματα, επιπλέον 11 εξωτερικά επικολλημένα ΡΖΤs. Οι αισθητήρες αυτοί τοποθετήθηκαν σε κατάλληλα επιλεγμένες θέσεις των επεμβάσεων για τον έλεγχο της δομικής τους κατάστασης, καθώς και στις αγκυρώσεις των κατασκευών που προσομοιώνουν τα ΚΔ.

3 Αποτελέσματα και σχόλια

3.1 Οπτική παρατήρηση αποτελεσμάτων

Κατά τη διάρκεια των σεισμικών δοκιμών, στο αρχικό δοκίμιο παρατηρήθηκε προοδευτική βλάβη στις τοιχοπληρώσεις καθώς αυξανόταν η ένταση της διέγερσης. Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται και αναλύονται αποτελέσματα από τη συμπεριφορά της τοιχοποιίας πλήρωσης ενός πλαισίου ωπλισμένου σκυροδέματος.

Στην φάση Α των πειραματικών δοκιμών, η τοιχοπλήρωση μεταξύ των υποστρωμάτων 1–2 (εκτός επιπέδου προς τη διεύθυνση της εφαρμοζόμενης σεισμικής φόρτισης) παρουσίασε μικρού εύρους διαγώνιες ρωγμές τύπου “σκαλοπατιού”, συγκεντρωμένες κυρίως στην κεντρική περιοχή του τοίχου, καθώς και μία χαρακτηριστική οριζόντια ρωγμή στον αρμό του κονιάματος μεταξύ της όγδοης και ένατης στρώσης τούβλων. Σημειώθηκε πλήρης αποκόλληση του συνόλου τούβλων–κονιάματος από τα γειτονικά υποστρώματα 1 και 2 ωπλισμένου σκυροδέματος καθώς και από τη διεπιφάνεια σύνδεσης με την άνω πλάκα.

Σημαντική παρατήρηση αποτελεί το γεγονός ότι η διεπιφάνεια σύνδεσης της κάτω θεμελιοδοκού ένωσης με τις τοιχοπληρώσεις παρέμεινε άθικτη για όλους τους τοίχους που υποβλήθηκαν σε φόρτιση εκτός επιπέδου στην πρώτη φάση, υποδεικνύοντας ότι ο κυρίαρχος μηχανισμός βλαβών ήταν η αποκόλληση στην κορυφή και στις πλευρές και όχι η πλήρης απομάκρυνση από τον φέροντα οργανισμό ΩΣ. Τα μοτίβα σχηματισμού ρωγμών ακολουθούσαν τους οριζόντιους αρμούς κονιάματος, επιβεβαιώνοντας ότι ο αρμός μεταξύ τούβλου-κονιάματος αποτέλεσε την κύρια δομική αδυναμία υπό σεισμικές διεγέρσεις.

Η φάση Β των σεισμικών δοκιμών της ενισχυμένης κατασκευής με τα ενσωματωμένα συστήματα ΚΔ ολοκληρώθηκε επιτυχώς, αποδεικνύοντας την αποτελεσματικότητά

της καινοτόμου στρατηγικής ενίσχυσης, η οποία απέτρεψε την κατάρρευση παρότι η κατασκευή υπέστη σημαντικές βλάβες και σημαντική μείωση δυσκαμψίας.

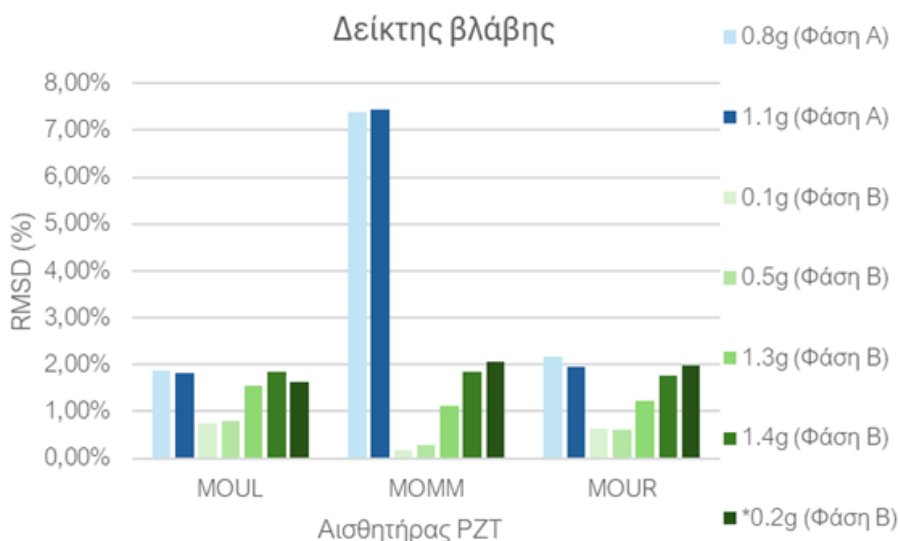
Η πολυουρεθάνη στη διεπιφάνεια μεταξύ της τοιχοπλήρωσης και των υποστυλωμάτων PUFJ και οι μανδύες FRPU διατήρησαν την ακεραιότητά τους καθ' όλη τη διάρκεια των διεγέρσεων, παρά την τοπική συσσώρευση βλαβών. Οι εύκαμπτες πολυουραιθάνες εξασφάλισαν την συνεχή συμβατότητα παραμορφώσεων μεταξύ διαφορετικών δομικών στοιχείων και υλικών στις διεπιφάνειες σκυροδέματος – τοιχοπλήρωσης και τοιχοπλήρωσης εξωτερικού μανδύα, αποτρέποντας την κατάρρευση των τοιχοπληρώσεων από εντός και εκτός επιπέδου ισχυρές δυναμικές δράσεις (αποφυγή σημαντικής συσσώρευσης βλαβών) από διαδοχικές ισχυρές σεισμικές διεγέρσεις. Οι τοιχοπληρώσεις εκτός επιπέδου παρέμειναν σχεδόν άθικτες, ενώ η περιτύλιξη με κορδόνι βασάλτη οδήγησε στην δημιουργία πλαστικών αρθρώσεων σε όλα τα υποστυλώματα χωρίς αποδιοργάνωση του θλιβόμενου σκυροδέματος της επικάλυψης, τεκμηριώνοντας τη συνολική αποτελεσματικότητα του σχήματος της ενίσχυσης. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι προτεινόμενες καινοτόμες επεμβάσεις αποτελούν τις πιο γρήγορα ενεργοποιούμενες επεμβάσεις καθώς ελαχιστοποιείται η χρήση (κορδόνια βασάλτη χωρίς χρήση ρητίνης) και ο χρόνος σκλήρυνσης των ρητινών (οι πολυουραιθάνες σκληραίνουν σε λιγότερο από περίπου 2-12 ώρες ανάλογα με τις συνθήκες περιβάλλοντος). Επιπλέον, είναι χαμηλού ειδικού βάρους και εφαρμόζονται εύκολα.

3.2 Αποτελέσματα από το σύστημα ελέγχου δομικής ακεραιότητας

Η αξιολόγηση των βλαβών μέσω του συστήματος ελέγχου δομικής ακεραιότητας πραγματοποιείται με δείκτες βλάβης, οι τιμές των οποίων προκύπτουν από τα αποτελέσματα των αποκρίσεων των αισθητήρων σε διάφορα επίπεδα φόρτισης. Ο δείκτης βλάβης που χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία είναι ο ευρέως χρησιμοποιούμενος στη διεθνή βιβλιογραφία συντελεστής της τετραγωνικής ρίζας της μέσης τετραγωνικής απόκλισης, μεταξύ της καταγεγραμμένης καμπύλης της αρχικής κατάστασης και κάθε επόμενης κατάστασης της κατασκευής για τον ίδιο αισθητήρα (Root Mean Square Deviation ή αλλιώς RMSD), (Naoum, Papadopoulos, Sapidis & Voutetaki, 2024).

Η αξιολόγηση του βαθμού βλάβης των δομικών στοιχείων, των ενισχύσεών τους και των συστημάτων ΚΔ μέσω πιεζοηλεκτρικών αισθητήρων (PZT), καταγράφουν σε πραγματικό χρόνο τις ηλεκτρικές αποκρίσεις τους. Ως σημείο αναφοράς χρησιμοποιείται η «Υγιής-Αρχική Κατάσταση» του δοκιμίου, πριν από οποιαδήποτε φόρτιση, ενώ κάθε επόμενη κατάσταση αντιστοιχεί σε διαφορετικό επίπεδο βλάβης

(«Βλάβη 1», «Βλάβη 2» κ.λπ.). Όταν εμφανίζεται βλάβη, η απόκριση καταγραφής τάσεων (voltage) για κάθε διαφορετική συχνότητα σήματος των PZT, μεταβάλλεται ανάλογα με τη σοβαρότητά της, γεγονός που ποσοτικοποιείται μέσω του στατιστικού δείκτη βλάβης RMSD (μέτρο της απόκλιση των καμπυλών από την αρχική). Οι συγκρίσεις των καμπυλών απόκρισης σε όρους τάσης (voltage) στο φάσμα συχνοτήτων 10–250 kHz, επιτρέπουν την παρακολούθηση της εξέλιξης της βλάβης, ενώ η σταθερή μεταβολή του δείκτη επιβεβαιώνει την αύξηση του βαθμού βλάβης. Στο Σχήμα 1 διακρίνεται η σταθερή αύξηση των τιμών του RMSD, στο αρχικό δοκίμιο -με αποχρώσεις του μπλε για δύο σεισμικές φορτίσεις (σε σχέση με την καταγραφή πριν την έναρξη των σεισμικών διεγέρσεων)- ειδικά στον αισθητήρα MOMM που βρίσκεται στην μέση της τοιχοποιίας. Στο ίδιο σχήμα, εμφανίζεται η σταθερή αύξηση των αντίστοιχων τιμών κατά την Β φάση των επεμβάσεων (σε σχέση με την αρχική καταγραφή μετά τις επεμβάσεις και πριν την έναρξη των διεγέρσεων της Β φάσης) - με αποχρώσεις του πράσινου για πέντε σεισμικές φορτίσεις.



Σχήμα 1. Δείκτης βλάβης RMSD για τους αισθητήρες που είναι επικολημένοι στην τοιχοποιία.

Η χρήση ενός δικτύου πιεζοηλεκτρικών αισθητήρων PZT σε προκαθορισμένες κρίσιμες θέσεις επιτρέπει την έγκυρη διάγνωση και τον προσδιορισμό τόσο της θέσης όσο και της έντασης της βλάβης, υπό διαφορετικά επίπεδα φόρτισης. Όσον αφορά την τοιχοποιία, όπου παρατηρήθηκαν οριζόντιες ρηγματώσεις και αποκόλληση από το πλαίσιο, ο αισθητήρας ο οποίος επικοληθήκε στο κέντρο της τοιχοποιίας (MOMM), κατά την πρώτη φάση κατέγραψε αυξημένες τιμές του δείκτη RMSD και για τις δύο τελευταίες σεισμικές διεγέρσεις. Στη δεύτερη φάση

παρατηρείται σταδιακή κλιμάκωση της αύξησης, με περαιτέρω μεταβολές μετά το επίπεδο διέγερσης των 1.3g, οι οποίες ωστόσο εμφανίζονται μειωμένες σε σχέση με εκείνες της πρώτης φάσης, καθώς ο δείκτης απόκλισης RMSD μετράται σε σχέση με την πρώτη καταγραφή του συστήματος μετά τις επεμβάσεις με κορδόνια, PUFJ, FRPU και τα ΚΔ.

Συμπεράσματα

Υφιστάμενες κατασκευές από ΩΣ, ιδιαίτερα όσες έχουν ανεγερθεί με παλαιότερους κανονισμούς, παρουσιάζουν συχνά δομικές ανεπάρκειες και βλάβες λόγω γήρανσης, διάβρωσης, ανεπαρκούς συντήρησης ή προηγούμενων σεισμικών διεγέρσεων. Στις περιπτώσεις επεμβάσεων για την ενσωμάτωση συστημάτων ΚΔ, καθίσταται κρίσιμη η έγκαιρη διάγνωση της ακεραιότητας της κατασκευής, ώστε να εντοπίζονται άμεσα τυχόν βλάβες και να λαμβάνονται έγκαιρα αποφάσεις συντήρησης ή ενίσχυσης. Η χρήση σύγχρονων συστημάτων ελέγχου δομικής ακεραιότητας με “ευφυή” υλικά έχει αποδειχθεί ιδιαίτερα αποτελεσματική για τη συνεχή παρακολούθηση και αξιολόγηση της συμπεριφοράς των κατασκευών. Στην παρούσα πειραματική έρευνα οι σταθερά αυξανόμενες τιμές του δείκτη βλάβης υποδεικνύουν τη δυνατότητα έγκαιρης αναγνώρισης βλαβών και αποτυπώνουν το βαθμό βλάβης της τοιχοποιίας πλήρωσης σε όλα τα στάδια φόρτισης. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η επέμβαση αποκατάστασης της τοιχοπλήρωσης με PUFJ και FRPU που πραγματοποιήθηκε για την ενσωμάτωση συστημάτων ΚΔ, συνέβαλε ουσιαστικά στη βελτίωση της σεισμικής της συμπεριφοράς, παρά την αύξηση του φορτίου της κατασκευής από τα ΚΔ και των ισχυρότερων και περισσότερων σεισμικών διεγέρσεων.

Το ερευνητικό Έργο με τίτλο «Ανθεκτική Αντισεισμική Ανακαίνιση Κατασκευών από Ωπλισμένο Σκυρόδεμα σε Κάθετο Δάσος» υλοποιείται στο πλαίσιο της δράσης του ΕΛ.ΙΔ.Ε.Κ. «Χρηματοδότηση της Βασικής Έρευνας (Οριζόντια υποστήριξη όλων των Επιστημών)» του Εθνικού Σχεδίου Ανάκαμψης και Ανθεκτικότητας «Ελλάδα 2.0» με τη χρηματοδότηση της Ευρωπαϊκής Ένωσης – NextGenerationEU (Αριθμός Έργου ΕΛ.ΙΔ.Ε.Κ.: 015376) GREENERGY <https://greenergy.civil.duth.gr/>

Βιβλιογραφία

1. Abubakar, I.R.; Alshammari, M.S. Urban Planning Schemes for Developing Low-Carbon Cities in the Gulf Cooperation Council Region. *Habitat Int.* 2023, 138, 102881.
2. Yang, X.; Yao, L.; Li, M.; Cao, J.; Zhong, Q.; Peng, W.; Wu, W.; Zhou, J. How Heat Waves and Urban Microclimates Affect Building Cooling Energy Demand? Insights from Fifteen Eastern Chinese Cities. *Appl. Energy* 2025, 384, 125424.
3. Al-Kodmany, K. Greenery-Covered Tall Buildings: A Review. *Buildings* 2023, 13, 2362.
4. Theodoridou, I., Vatitsi, K., Stefanidou, M., Vanian, V., Fanaradelli, T., Macha, M., Zaprís, A., Kytinou, V., Voutetaki, M., Rousakis, T., Mallinis, G., & Chalioris, C. (2025). Nature-Based Solutions for Urban Buildings—The Potential of Vertical Greenery: A Brief Review of Benefits and Challenges of Implementation. *Urban Science*, 9(10), 398.
5. Vanian, V., Rousakis, T., Fanaradelli, T., Voutetaki, M., Macha, M., Zaprís, A., Theodoridou, I., Stefanidou, M., Vatitsi, K., Mallinis, G., Kytinou, V., & Chalioris, C. (2025). Performance-Based Damage Quantification and Hazard Intensity Measures for Vertical Forest Systems on RC Buildings. *Buildings*, 15(5), 769.
6. Vanian, V., Fanaradelli, T., & Rousakis, T. (2025). A Comprehensive Review of Vertical Forest Buildings: Integrating Structural, Energy, Forestry, and Occupant Comfort Aspects in Renovation Modeling. *Fibers*, 13(8), 101.
7. Rousakis, T.; Lappa, M.; Zaprís, A.; Xynopoulos, I.; Voutetaki, M.; Vanian, V.; Kellis, S.; Sapidis, G.; Naoumi, M.; Papadonoulos, N.; et al. Seismic Response of Reinforced Concrete Structure with Infill Walls for Vertical Forest Applications - Seismic Table Tests. In *Proceedings of the 6th Panhellenic Conference on Earthquake Engineering and Technical Seismology (6ο ΠΣΑΜΤΣ)*; Athens, Greece, October 30-November 1, 2025.
8. Rousakis, T., Vanian, V., Lappa, M., Zaprís, A. G., Xynopoulos, I. P., Voutetaki, M., Kellis, S., Sapidis, G., Naoum, M., Papadopoulos, N., Kytinou, V. K., Karampini, M., Chalioris, C. E., & Thomoglou, A. (2025). Seismic performance monitoring of RC structures retrofitted with composite materials and vertical forest systems. Manuscript submitted for publication, *Polymers*.
9. Rousakis, T., Ilki, A., Kwiecien, A., Viskovic, A., Gams, M., Triller, P., Ghiassi, B., Benedetti, A., Rakicevic, Z., Colla, C., Halici, O. F., Zając, B., Hojdys, Ł., Krajewski, P., Rizzo, F., Vanian, V., Sapalidis, A., Papadouli, E., & Bogdanovic, A. (2020). Deformable Polyurethane Joints and Fibre Grids for Resilient Seismic

- Performance of Reinforced Concrete Frames with Orthoblock Brick Infills. *Polymers*, 12(12), 2869. <https://doi.org/10.3390/polym12122869>.
10. Voutetaki ME, Naoum MC, Papadopoulos NA, Chalioris CE. Cracking Diagnosis in Fiber-Reinforced Concrete with Synthetic Fibers Using Piezoelectric Transducers. *Fibers* 2022; 10(1): 5. DOI: 10.3390/fib10010005.
 11. Naoum MC, Sapidis GM, Papadopoulos NA, Voutetaki ME (2023) An Electromechanical Impedance-Based Application of Realtime Monitoring for the Load-Induced Flexural Stress and Damage in Fiber-Reinforced Concrete. *Fibers* 11:34. <https://doi.org/10.3390/fib11040034>
 12. Naoum MC, Papadopoulos NA, Sapidis GM, Voutetaki ME (2024) Efficacy of PZT Sensors Network Different Configurations in Damage Detection of Fiber-Reinforced Concrete Prisms under Repeated Loading. *Sensors* 24:5660. <https://doi.org/10.3390/s24175660>