



Ενίσχυση κατασκευών με χρήση προηγμένων σκυροδεμάτων υψηλής επιτελεστικότητας

Χριστίνα Ιωακειμίδου - 22/07/2026

Σεισμός στη Βενεζουέλα 2026 | Πηγή εικόνας: chinadailyhk.com

Στην ομιλία του στο Building Strengthening Show 2025, ο κ. Ανδρέας Λαμπρόπουλος, Επίκουρος Καθηγητής του τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του ΕΜΠ, αναφέρει πως η σεισμική δραστηριότητα παραμένει ένας από τους πιο καταστροφικούς φυσικούς κινδύνους παγκοσμίως. Όπως τονίζεται στην εισήγηση, σύμφωνα με στατιστικά στοιχεία, κατά την περίοδο 1994-2013 οι σεισμοί προκάλεσαν σχεδόν 750.000 θανάτους παγκοσμίως, αποτελώντας τον φυσικό κίνδυνο με τον μεγαλύτερο αριθμό θυμάτων. Πρόσφατα γεγονότα, όπως η τραγική καταστροφή στη Μιανμάρ, υπενθυμίζουν ότι ο κίνδυνος συχνά υποτιμάται έως ότου εκδηλωθεί μια μεγάλη καταστροφή.

Επιπλέον, η κατάρρευση κτιρίων οπλισμένου σκυροδέματος σε τέτοιες περιπτώσεις οφείλεται συστηματικά στις κακοτεχνίες, στον ελλιπή σχεδιασμό, ο οποίος συχνά δεν περιλαμβάνει αντισεισμικό κανονισμό ή εκτελείται με άλλους παλαιότερους κανονισμούς, αλλά και στη χρήση υλικών που δεν πληρούν τις απαιτούμενες προδιαγραφές ποιότητας και αντοχής. Πέρα από τις ανθρώπινες απώλειες, όπως υπογραμμίζει ο κ. Λαμπρόπουλος, οι άμεσες και έμμεσες οικονομικές συνέπειες των σεισμικών βλαβών στις κατασκευές και της διακοπής λειτουργίας κρίσιμων υποδομών μπορούν να είναι ιδιαίτερα σημαντικές. Για τον λόγο αυτό, η έγκαιρη αξιολόγηση της υφιστάμενης κατάστασης και η εφαρμογή προληπτικών επεμβάσεων ενίσχυσης αποτελούν μια οικονομικά και τεχνικά ορθολογική στρατηγική για τη μείωση της σεισμικής διακινδύνευσης.



Σεισμός Μιανμάρ 2025 | Πηγή εικόνας: [icchef.bbc.co.uk](https://www.bbc.com/news/world-asia-61822222)

Η σημασία της Ανθεκτικότητας («Resilience») και της Βιώσιμης Ανάπτυξης

Η σύγχρονη προσέγγιση στον σχεδιασμό των κατασκευών δεν επικεντρώνεται μόνο στην εξασφάλιση της στατικής επάρκειας, αλλά στη συνολικότερη έννοια της Ανθεκτικότητας (Resilience), η οποία περιλαμβάνει τη δυνατότητα περιορισμού των βλαβών και ταχείας επαναφοράς της λειτουργικότητας μετά από ένα σεισμικό συμβάν. Σύμφωνα με τον ομιλητή, μια ανθεκτική κατασκευή είναι ικανή να παρουσιάζει μειωμένες απώλειες και να επανέρχεται γρήγορα σε κατάσταση λειτουργίας.



Από τον σεισμό Τουρκίας-Συρίας (2023) | Πηγή εικόνας: cam.ac.uk

Στην εισήγησή του ο κ. Λαμπρόπουλος εξηγεί μέσω γραφήματος πώς η Ανθεκτικότητα αναπαριστάται από το εμβαδό του γραφήματος με άξονες την απώλεια της λειτουργικότητας και τον χρόνο αποκατάστασης, με την ανθεκτικότητα (resilience) να είναι αντιστρόφως ανάλογη του εμβαδού της επιφάνειας αυτής. Στο πλαίσιο αυτό, εφαρμόζονται οι τρεις πυλώνες της Βιώσιμης Ανάπτυξης («Reduce, Reuse και Recycle») μέσω της αξιοποίησης καινοτόμων, βιώσιμων υλικών για την επισκευή και ενίσχυση κατασκευών, συμβάλλοντας στην προσαρμογή του κατασκευαστικού τομέα στις σύγχρονες προκλήσεις της κλιματικής αλλαγής, της ενεργειακής κρίσης και της αυξανόμενης πληθυσμιακής πίεσης.

Προκλήσεις στον τομέα των ενισχύσεων των υφιστάμενων κατασκευών με χρήση νέων σκυροδεμάτων

Όπως αναφέρει ο ομιλητής, η έρευνα την οποία έχει πραγματοποιήσει στον τομέα αυτόν, περιλαμβάνει εκτενείς προσομοιώσεις με πεπερασμένα στοιχεία και συγκρίσεις με πειραματικά δεδομένα από εργαστηριακές δοκιμές, ενώ έχει αναλύσει κρίσιμες παραμέτρους όπως η συνάφεια χάλυβα-σκυροδέματος, η συμπεριφορά στη διεπιφάνεια των υλικών και η συστολή ξήρανσης. Μέσω αυτών των προσομοιωμάτων υπολογίστηκαν συντελεστές μονολιθικότητας που χρησιμοποιούνται για τον σχεδιασμό ενισχυμένων στοιχείων. Τα αποτελέσματα επιβεβαιώνουν, ότι η ολίσθηση στη διεπιφάνεια επηρεάζει σημαντικά την απόκριση, ενώ η συστολή ξήρανσης προκαλεί περαιτέρω μείωση της αντοχής των ενισχυμένων μελών. Τέλος, όπως αναφέρεται στην ομιλία, για την αποτελεσματική αντιμετώπιση αυτών των φαινομένων, εξετάστηκαν τεχνικές όπως η εκτράχυνση της διεπιφάνειας και η χρήση βλήτρων, εξασφαλίζοντας βελτιωμένη σύνδεση μεταξύ παλαιού και νέου σκυροδέματος.

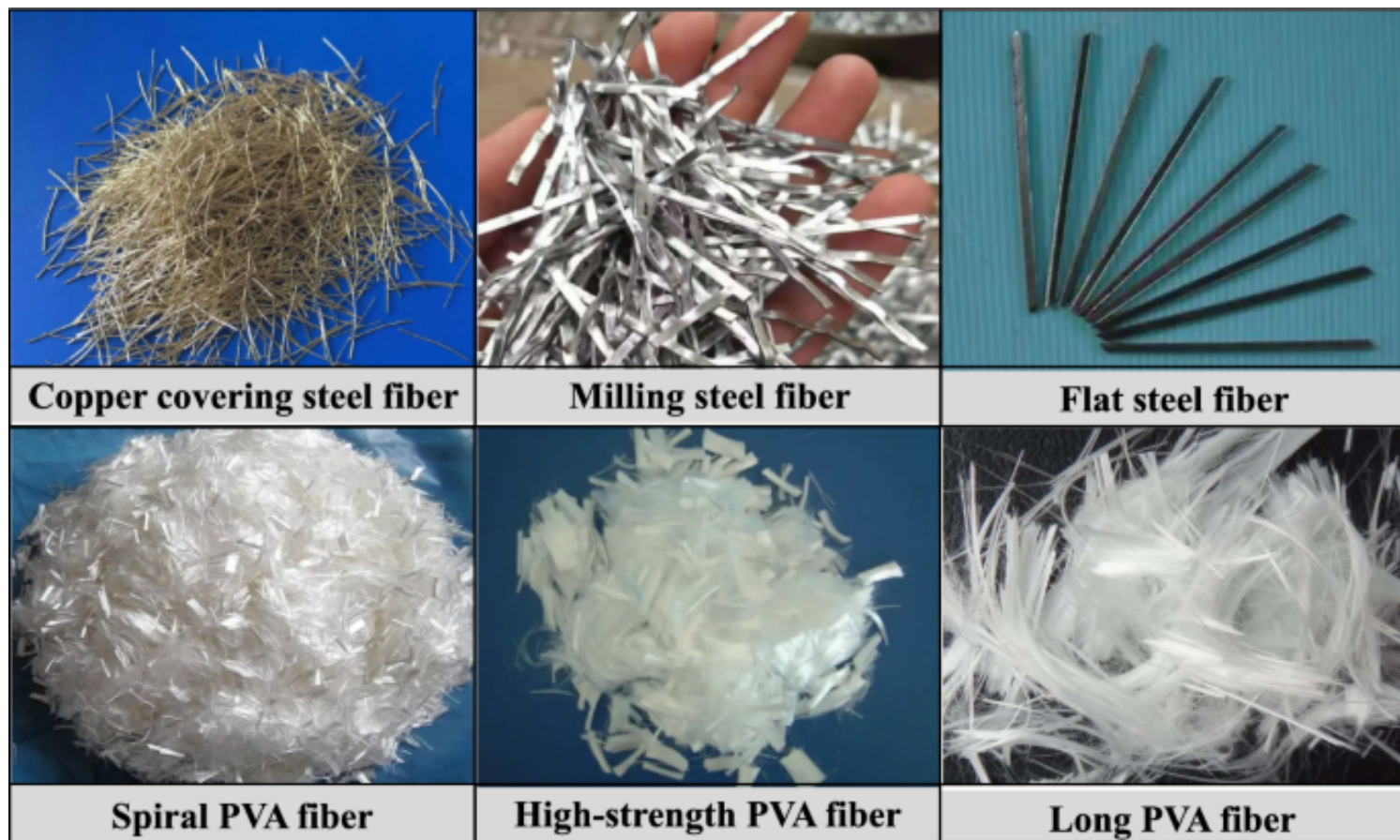
Σκυροδέματα Υπερυψηλής Επιτελεστικότητας (UHPFRC)

Στην ομιλία, ο κ. Λαμπρόπουλος κάνει λόγο για τα σκυροδέματα Υπερυψηλής Επιτελεστικότητας (Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete-UHPFRC) τα οποία αποτελούν προηγμένα δομικά υλικά με εξαιρετικά υψηλές μηχανικές ιδιότητες, λόγω της ειδικής σύνθεσής τους και του υψηλού ποσοστού ινών χάλυβα (2-3% κατ' όγκο). Η σύνθεσή τους είναι εξειδικευμένη, καθώς απαιτείται τσιμέντο, σκωρία υψικαμίνου, άμμος (χωρίς αδρανή), πολύ χαμηλός λόγος νερού/τσιμέντου και η χρήση σημαντικών ποσοτήτων υπερ-ρευστοποιητών για την παραγωγή του μείγματος. Τα πειραματικά αποτελέσματα δείχνουν θλιπτικές αντοχές 150-200 MPa και εφελκυστικές αντοχές 10-15 MPa.

Ιδιαίτερη σημασία δίνεται στην απορρόφηση ενέργειας του υλικού και στην ικανότητα διατήρησης υψηλών αντοχών ακόμα και μετά την ρηγμάτωση του υλικού, επιτρέποντας υψηλή παραμορφωσιμότητα και επιτυχημένη εφαρμογή σε κατασκευές με υψηλές απαιτήσεις αντοχής και πλαστιμότητας. Οι ίνες, σύμφωνα με τον κ. Λαμπρόπουλο, επιτυγχάνουν τη "γεφύρωση" των ρωγμών, επιτρέποντας στο υλικό να εφαρμοστεί ακόμα και ως λεπτή στρώση πάχους μερικών εκατοστών, παρέχοντας σημαντική αντοχή είτε με παρουσία ράβδων οπλισμού, είτε ακόμα και χωρίς αυτές. Επιπλέον, σε δοκιμές υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση, αποδείχθηκε ότι τα UHPFRC δεν εμφανίζουν σημαντική απομείωση των χαρακτηριστικών τους, καθιστώντας τα ιδανικά για αντισεισμική ενίσχυση κτιρίων.

Ινοπλισμένα γεωπολυμερή

Όπως τονίζεται στην ομιλία, τα ινοπλισμένα γεωπολυμερή προσφέρουν μια πρωτοποριακή εναλλακτική λύση χωρίς τη χρήση τσιμέντου. Αξιοποιώντας βιώσιμα υλικά όπως η ιπτάμενη τέφρα (PFA) και η σκωρία υψικαμίνου (GGBS), και ταυτόχρονα ενεργοποιώντας τα με αλκαλικούς χημικούς ενεργοποιητές, όπως υδροξείδιο του νατρίου (NaOH) ή του καλίου (KOH), καθώς και πυριτικό νάτριο (Na_2SiO_3) ή πυριτικό κάλιο (K_2SiO_3), επιτυγχάνεται η δημιουργία σκυροδέματος με υψηλές μηχανικές αντοχές και βελτιωμένη ανθεκτικότητα. Επιπλέον, ενώ παλαιότερα η ανάπτυξη υψηλών αντοχών απαιτούσε σκλήρυνση υπό υψηλές θερμοκρασίες (σε φούρνους ή δεξαμενές), η πρόσφατη έρευνα ανέπτυξε μείγματα που αποκτούν αντοχή σε κανονική θερμοκρασία περιβάλλοντος. Διαπιστώθηκε ότι η αυξημένη αναλογία σκωρίας υψικαμίνου επιτρέπει την απόκτηση υψηλής αντοχής σε νεαρή ηλικία, επιτυγχάνοντας στις 28 ημέρες να φτάνουν έως και τα 50 MPa.



Chen, P., Li, Y., Yin, L. et al. Review on Mechanical Properties of Fiber-Reinforced Geopolymer Concrete After High-Temperature Exposure. Iran J Sci Technol Trans Civ Eng 48, 3829–3851 (2024). [doi.org](https://doi.org/10.1007/s40201-024-00000-0) | Πηγή εικόνας: media.springernature.com

Η προσθήκη διαφόρων τύπων ινών (από χάλυβα, γυαλί ή πολυβινύλιο) επιτρέπει στο υλικό να εμφανίσει υψηλή ενέργεια απορρόφησης, αποφεύγοντας ψαθυρές αστοχίες. Όπως τονίζεται στην εισήγηση, η επιλογή της σωστής κατηγορίας και μήκους ινών είναι κρίσιμη για να μην υπάρξει σημαντική ολίσθηση και να επιτευχθεί αποτελεσματικά η "γεφύρωση" των ρωγμών. Σε δοκιμές επιταχυνόμενης διάβρωσης (με χρήση ρεύματος), τα γεωπολυμερή έδειξαν εξαιρετική προστασία του οπλισμού: Μετά την αποκάλυψη του οπλισμού διαπιστώθηκε ότι ο χάλυβας δεν παρουσίαζε σημαντική απώλεια διαμέτρου, διατηρώντας την αντοχή των ενισχυμένων στοιχείων σχεδόν αμετάβλητη, σε αντίθεση με το συμβατικό σκυρόδεμα που εμφάνισε σημαντικές βλάβες λόγω διάβρωσης.

Νανοϋλικά και πρόληψη της μικρο-ρηγματώσεως

Η χρήση νανοϋλικών, όπως νανοσωλήνες άνθρακα και γραφένιο με διάμετρο περίπου ενός νανομέτρου, αποτελεί μια καινοτόμο προσέγγιση. Στην περιγραφή του ο κ. Λαμπρόπουλος αναφέρει, ότι τα υλικά αυτά εισάγονται στο μείγμα μέσω ειδικής διαδικασίας διασποράς, με σκοπό να γεφυρώσουν τις μικρορωγμές στα αρχικά στάδια της ανάπτυξής τους, πριν ακόμη αυτές καταστούν ορατές. Παρόλο που το κόστος τους είναι υψηλό, καθιστώντας τα λιγότερο ανταγωνιστικά για αποκλειστική αύξηση της αντοχής σε σύγκριση με φθηνότερα υλικά, το κύριο πλεονέκτημά τους έγκειται στη σημαντική μείωση της συστολής ξήρανσης και στη βελτίωση της ανθεκτικότητας. Η θωράκιση του χάλυβα από τη διάβρωση μέσω του περιορισμού της μικρο-ρηγματώσεως αποτελεί το σημαντικότερο όφελος από τη χρήση αυτών των νανοτεχνολογιών.

Πρακτικές εφαρμογές, προκατασκευή και μελλοντικές κατευθύνσεις

Ο κ. Λαμπρόπουλος στο τέλος της ομιλίας του τονίζει, ότι η μετάβαση από το εργαστήριο στην πράξη έχει ήδη πραγματοποιηθεί με επιτυχία, μέσω της συνεργασίας με εταιρείες για τη δημιουργία σύνθετων, προκατασκευασμένων στοιχείων. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η ανάπτυξη θερμομονωτικών

προκατασκευασμένων στοιχείων, τα οποία αποτελούνται από στρώσεις γεωπολυμερούς υψηλής αντοχής με ενδιάμεσο θερμομονωτικό υλικό. Τα στοιχεία αυτά θα μπορούσαν να αποτελέσουν μια καινοτόμο λύση για την κατασκευή κατοικιών, καθώς συνδυάζουν ταχεία εφαρμογή, βελτιωμένη μηχανική και ενεργειακή απόδοση, καθώς και μειωμένο κόστος κατασκευής.

Στο μέλλον, η έρευνα αναμένεται να προσανατολιστεί στην ανάπτυξη μιας ολιστικής προσέγγισης για την αντιμετώπιση πολλαπλών κινδύνων, μέσω της αξιοποίησης υλικών και τεχνολογιών που παρέχουν προστασία έναντι σεισμών, πυρκαγιάς και άλλων φυσικών ή ανθρωπογενών κινδύνων, σε συνδυασμό με την ενσωμάτωση θερμομονωτικών υλικών. Σύμφωνα με τον ομιλητή, η χρήση προκατασκευασμένων δομικών στοιχείων μπορεί να εξασφαλίσει σημαντικά αυξημένη ταχύτητα κατασκευής και υψηλή ποιότητα, συμβάλλοντας παράλληλα στη μείωση του κόστους κατασκευής και στον περιορισμό των απωλειών υλικών.

Η συνέχιση του σχεδιασμού και της ανάπτυξης τέτοιων τεχνολογιών αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για την ασφάλεια και τη βιωσιμότητα των κατασκευών Οπλισμένου Σκυροδέματος.

Συνοψίζοντας την εισήγησή του, ο κ. Λαμπρόπουλος επισήμανε ότι ο συνδυασμός της έρευνας στα σκυροδέματα υπερυψηλής επιτελεστικότητας (UHPRFC), στα ινοπλισμένα γεωπολυμερή και στην χρήση νανοϋλικών, σε συνέργεια με τις πρακτικές της προκατασκευής, δημιουργεί νέες προοπτικές στον τομέα των κατασκευών, συμβάλλοντας στην αποτελεσματικότερη θωράκιση των υποδομών έναντι των σεισμικών δράσεων με τρόπο σύγχρονο, βιώσιμο και αποδοτικό.

Δείτε ολόκληρη την παρουσίαση του κυρίου **Ανδρέα Λαμπρόπουλου** στο **Building Strengthening Show 2025**: