Archetype



Προσιτή σεισμική μόνωση για ελαφριά κτίρια και άλλες κατασκευές

Χριστίνα Ιωακειμίδου - 25/03/2026

Εικόνα Εξωφύλλου: Σεισμός στο Νεπάλ (2015) Πηγή εικόνας: huffingtonpost.gr

Η εισήγηση του κ. Μιχάλη Βασιλείου, Καθηγητή/Ερευνητή στο Πολυτεχνείο της Ζυρίχης, και επίκουρου καθηγητή του τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Ε.Μ.Π., στο *Building Strengthening Show 2025*, εστιάζει στην επιτακτική ανάγκη ανάπτυξης προσιτών συστημάτων σεισμικής μόνωσης, με ιδιαίτερη έμφαση στις ελαφριές κατασκευές και στις ανάγκες των αναπτυσσόμενων χωρών.

Ο ομιλητής ξεκινά την ανάλυσή του από το κοινωνικοοικονομικό παράδοξο της σύγχρονης σεισμικής μηχανικής: ενώ η τεχνογνωσία για την προστασία των κτιρίων υπάρχει, το κόστος εφαρμογής της παραμένει απαγορευτικό για ένα μεγάλο μέρος του παγκόσμιου πληθυσμού. Φέρνοντας ως παράδειγμα τους σεισμούς στην Αϊτή το 2010 και το 2021, επισημαίνει ότι οι παραδοσιακοί αντισεισμικοί κανονισμοί συχνά αποτυγχάνουν στην πράξη, όχι λόγω τεχνικής ανεπάρκειας, αλλά επειδή οι κάτοικοι στερούνται των πόρων για την πιστή εφαρμογή τους. Υπογραμμίζεται ότι, αν μια λύση αποδειχθεί αποτελεσματική και οικονομικά βιώσιμη σε τέτοια απαιτητικά περιβάλλοντα, μπορεί να υιοθετηθεί παγκοσμίως, καθώς οι φυσικοί νόμοι και οι σεισμικές επιταχύνσεις δεν διαφοροποιούνται βάσει της οικονομικής ευρωστίας μιας περιοχής. Η σεισμική μόνωση, ενώ αποτελεί την ιδανική τεχνική λύση για την πλήρη αποφυγή βλαβών, παραμένει έως σήμερα ένα

προνόμιο για ακριβά κτίρια ή κρίσιμες υποδομές, αφήνοντας την πλειονότητα των οικιστικών μονάδων εκτεθειμένη. Ο στόχος, λοιπόν, της έρευνας είναι να εκδημοκρατίσει την πρόσβαση σε αυτή την τεχνολογία, προσαρμόζοντάς την στις ανάγκες της ελαφράς δόμησης και στις περιορισμένες οικονομικές δυνατότητες των πολλών περιοχών, χωρίς όμως να θυσιάζεται η επιστημονική αρτιότητα και η ασφάλεια της κατασκευής.

Περιορισμοί Υφιστάμενων Συστημάτων και η Πρόταση Κύλισης

Συνεχίζοντας με την εξέταση των υφιστάμενων συστημάτων, ο κ. Βασιλείου αναφέρεται στους περιορισμούς των συμβατικών μεθόδων. Τα ελαστομερή εφέδρανα, που αποτελούν την κύρια λύση για γέφυρες και βαριές κατασκευές, κρίνονται ακατάλληλα για ελαφριά κτίρια λόγω της δυσκαμψίας τους και των απαιτούμενων φορτίων. Στη σύγχρονη πρακτική κυριαρχεί το Friction Pendulum System (FPS), το οποίο βασίζεται στην ολίσθηση ενός στοιχείου πάνω σε μια κοίλη σφαιρική επιφάνεια, ενώ η δύναμη επαναφοράς σε αυτό το σύστημα παρέχεται από την ίδια τη βαρύτητα. Παρόλο που η γεωμετρία του συστήματος είναι απλή, το υψηλό κόστος του FPS πηγάζει από τα εξειδικευμένα υλικά επικάλυψης, όπως το **τεφλόν**, που απαιτούνται για να διατηρείται ο συντελεστής τριβής σταθερός και προβλέψιμος για δεκαετίες. Αυτή η οικονομική παράμετρος, εξηγεί ο ομιλητής, οδηγεί την έρευνα προς την οικονομικότερη λύση, η οποία συνίσταται στην αντικατάσταση της ολίσθησης από την κύλιση. Τα μεταλλικά συστήματα κύλισης είναι επίσης ακριβά και παρουσιάζουν χαμηλή απόσβεση, επομένως προτείνεται η χρήση ενός συνδυασμού πλακών σκυροδέματος και ελαστικών σφαιρών από σκληρό καουτσούκ, που μειώνουν τις τάσεις επαφής και αυξάνουν την τριβή κύλισης. Η κύλιση προσφέρει το πλεονέκτημα της χαμηλής αντίστασης στην κίνηση, αλλά απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή στον έλεγχο της απόσβεσης, έτσι ώστε να μην αναπτύσσονται υπερβολικές μετακινήσεις κατά τη διάρκεια ενός σεισμού.

Πειραματική Διερεύνηση Ελαστομερών Σφαιρών

Η πειραματική διερεύνηση αυτών των ελαστομερών σφαιρών αποκάλυψε σημαντικές αποκλίσεις από τη θεωρία του στερεού σώματος. Όπως επισημαίνει ο κ. Βασιλείου, κατά τη διάρκεια δοκιμών στο Πανεπιστήμιο του Μπάφαλο παρατηρήθηκε μια απρόσμενη αύξηση της δυσκαμψίας που δεν μπορούσε να εξηγηθεί με τα κλασικά μοντέλα. Η δική του ερευνητική ομάδα στο Πολυτεχνείο της Ζυρίχης και πλέον στο ΕΜΠ, διαπίστωσε ότι, υπό το βάρος του φορτίου, η ελαστική σφαίρα υφίσταται ερπυσμό και παραμορφώνεται μόνιμα, αποκτώντας ένα ελλειψοειδές σχήμα. Αυτή η παραμόρφωση εμποδίζει την ομαλή κύλιση, καθώς η σφαίρα δεν ανακτά ακαριαία το σχήμα της. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση βρόχων υστέρησης μεταβαλλόμενης δυσκαμψίας. Η μελέτη επικεντρώθηκε σε σφαίρες από σκληρό καουτσούκ (Shore Hardness 95A), καθώς το ζητούμενο δεν ήταν η ελαστική παραμόρφωση του συστήματος για τη μόνωση, αλλά η κύλιση ως μηχανισμός αποσύνδεσης από την κίνηση του εδάφους. Οι δοκιμές έδειξαν ότι η μπάλα διαρκώς αλλάζει σχήμα κατά την κύλιση. Αυτό καθιστά την πρόβλεψη της συμπεριφοράς του συστήματος μια πρόκληση που απαιτεί προηγμένα μοντέλα ανάλυσης, πέρα από τους απλουστευτικούς κανόνες της στατικής τριβής, όπως εξηγεί ο ομιλητής.

Μηχανισμός Απόσβεσης και Διασφάλιση Ποιότητας

Το εύρημα αυτό οδήγησε σε μια θεμελιώδη κατανόηση του μηχανισμού απόσβεσης –γνώση που στην κοινότητα των Μηχανολόγων Μηχανικών ήταν μάλλον γνωστή: στην κύλιση, η ενέργεια δεν χάνεται στη διεπιφάνεια των υλικών, όπως συμβαίνει στην ολίσθηση, αλλά απορροφάται εσωτερικά από το ίδιο το υλικό της σφαίρας λόγω της ανακυκλικής της παραμόρφωσης. Η διαπίστωση αυτή έχει τεράστια πρακτική αξία για τη Σεισμική Μηχανική, καθώς καθιστά τη διασφάλιση ποιότητας πολύ πιο οικονομική, διότι αρκούν απλές δοκιμές ανακυκλικής θλίψης της σφαίρας αντί για σύνθετα πειράματα οριζόντιας μετακίνησης. Ειδικότερα, η τριβή κύλισης προκύπτει από το ότι η αντίδραση του εδάφους μετατοπίζεται προς τα εμπρός σε σχέση με το κέντρο της σφαίρας λόγω της τοπικής παραμόρφωσης, δημιουργώντας μια ροπή αντίστασης. Επειδή αυτή η διαδικασία συμβαίνει στο εσωτερικό της σφαίρας, ο συντελεστής απόσβεσης παραμένει σταθερός ανεξάρτητα από το εάν η επιφάνεια είναι λεία, τραχιά ή ακόμα και αν έχει επικαθίσεις σκόνης ή υγρασίας. Κατά τον κ. Βασιλείου, αυτό λύνει ένα από τα μεγαλύτερα προβλήματα των παραδοσιακών συστημάτων ολίσθησης, τα

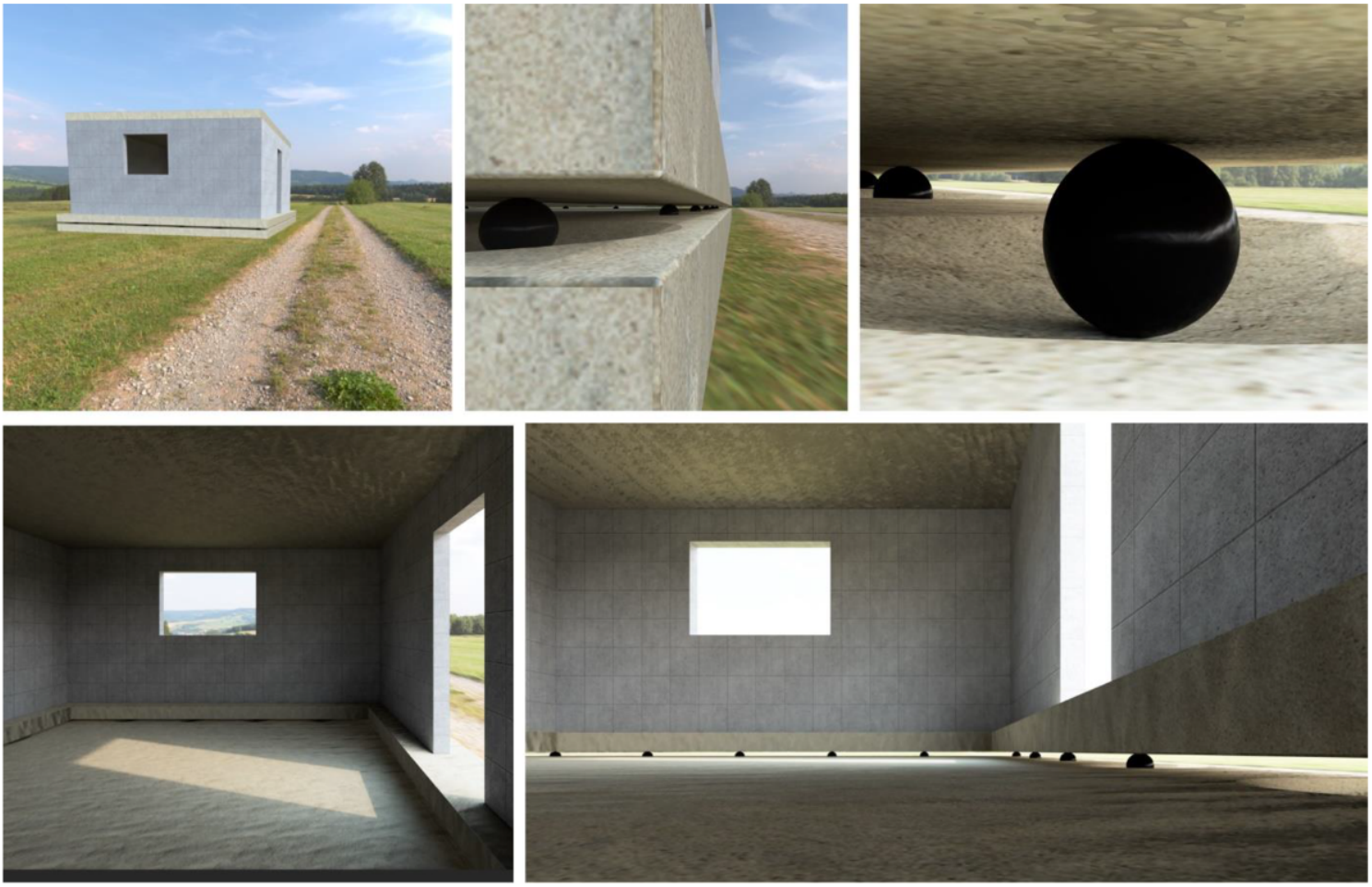
οποία απαιτούν ειδική και ακριβή επικάλυψη της επιφάνειας ολίσθησης για να μην αλλάξει ο συντελεστής τριβής με το πέρασμα του χρόνου. Έτσι, το κόστος μειώνεται, καθιστώντας την τεχνολογία ιδανική για απομακρυσμένες ή φτωχές περιοχές.



Πηγή εικόνας: users.ntua.gr

Αριθμητική Προσομοίωση και Βελτιστοποίηση

Για την ακριβή προσομοίωση αυτών των φαινομένων, αναπτύχθηκε ένα σύνθετο αριθμητικό μοντέλο με 24 παραμέτρους, ικανό να προβλέψει τη συμπεριφορά του συστήματος σε διαφορετικές χρονικές κλίμακες. Όπως αναφέρει ο ομιλητής, η ανάλυση έδειξε ότι, ενώ ο ερπυσμός εντοπίζεται στον πυρήνα της σφαίρας, η απόσβεση ενέργειας πραγματοποιείται στον εξωτερικό φλοιό λόγω των τάσεων που αναπτύσσονται κατά την κύλιση. Αυτό επέτρεψε τη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού με την προσθήκη ενός σκληρού πυρήνα από χάλυβα ή σκυρόδεμα στο εσωτερικό της σφαίρας. Με αυτόν τον τρόπο, περιορίζεται η παραμόρφωση λόγω ερπυσμού (λόγω του ωοειδούς σχήματος), ενώ διατηρείται η ικανότητα απόσβεσης από το εξωτερικό ελαστικό στρώμα, οδηγώντας σε μια πιο προβλέψιμη και γραμμική συμπεριφορά του συστήματος. Η ερευνητική ομάδα χρησιμοποίησε πειραματικά δεδομένα από δοκιμές υλικού σε μικρή κλίμακα για να «εκπαιδεύσει» το μοντέλο, διασφαλίζοντας πως οι προσομοιώσεις αντιστοιχούν στην πραγματική απόκριση των εφεδράνων υπό σεισμική φόρτιση. Η βελτιστοποίηση αυτή οδήγησε στη δημιουργία σφαιρών που συνδυάζουν τη φέρουσα ικανότητα ενός σκληρού υλικού με τις αποσβεστικές ιδιότητες ενός ελαστομερούς, επιτυγχάνοντας την επιθυμητή ισορροπία μεταξύ ασφάλειας και κόστους.



Πηγή εικόνας: users.ntua.gr

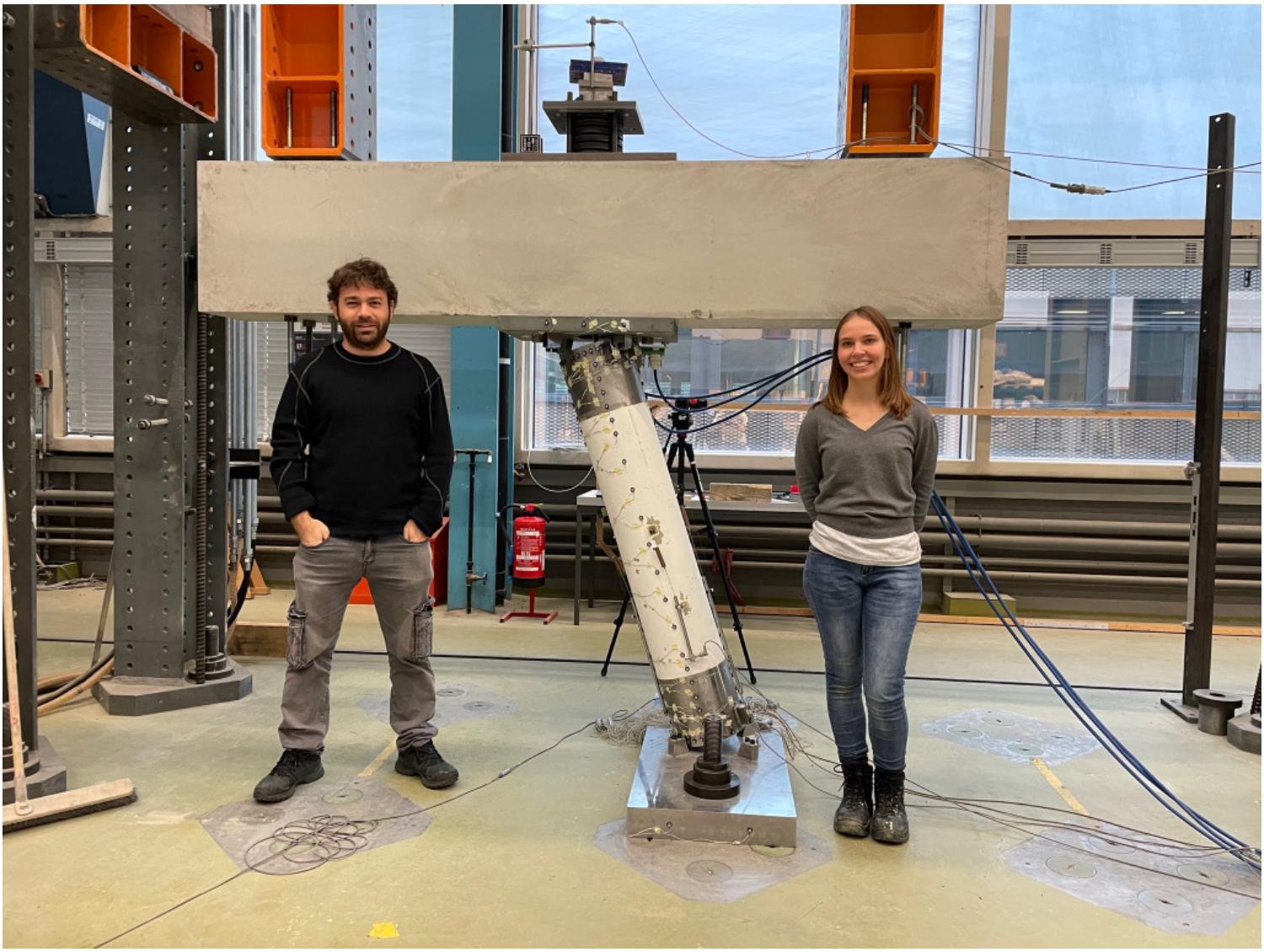
Η Εναλλακτική της Μπάλας Τένις

Στην ομιλία του, ο κ. Βασιλείου επισήμανε πως, στο πλαίσιο της αναζήτησης ακόμα πιο οικονομικών λύσεων, διερευνήθηκε μια καινοτόμος ιδέα: η χρήση **κοινών μπαλών τένις** γεμισμένων με τσιμεντοκονία. Παρά την απλότητά τους, οι μπάλες αυτές επέδειξαν αξιοσημείωτη αντοχή και ικανοποιητική φέρουσα ικανότητα για ελαφριές κατασκευές, της τάξης των 20 έως 35 kN ανά σφαίρα. Το εξωτερικό ελαστικό περίβλημα της μπάλας λειτουργεί ενισχυτικά για το εσωτερικό σκυρόδεμα, βελτιώνοντας την κατανομή των τάσεων και αποτρέποντας την πρόωρη θραύση, ενώ παράλληλα παρέχει την απαραίτητη τριβή κύλισης για την απόσβεση ενέργειας. Η λύση αυτή είναι εξαιρετικά πρακτική για περιοχές όπως η Κούβα ή η Αϊτή, αφού οι μπάλες τένις μπορούν να βρεθούν ακόμα και ως απορρίμματα, και το γέμισμα με τσιμέντο είναι μια διαδικασία που δεν απαιτεί εξειδικευμένο προσωπικό ή εξοπλισμό. Πειράματα που έγιναν, έδειξαν ότι η συμπεριφορά τους είναι διγραμμική και σταθερή, ξεπερνώντας σε ορισμένες περιπτώσεις ακόμη και τις αμιγώς ελαστικές σφαίρες όσον αφορά την προβλεψιμότητα της κίνησης. Αυτό αποδεικνύει, κατά τον ομιλητή, ότι η υψηλή τεχνολογία δεν απαιτεί πάντα ακριβά υλικά, αλλά έξυπνη εφαρμογή των νόμων της μηχανικής βάσει των διαθέσιμων πόρων.

Δοκιμές σε Σεισμική Τράπεζα και Συμπεράσματα

Η αποτελεσματικότητα των προτεινόμενων συστημάτων επιβεβαιώθηκε μέσω δοκιμών σε σεισμική τράπεζα στο Πολυτεχνείο της Ζυρίχης και στο Ε.Μ.Π. Ένα ομοίωμα κτιρίου από φέρουσα τοιχοποιία υπό κλίμακα 1 προς 1,6 υποβλήθηκε σε επιταχύνσεις που ξεπερνούσαν κατά τρεις φορές την ένταση ιστορικών σεισμών, όπως αυτού της Μανάγουα. Τα αποτελέσματα ήταν εντυπωσιακά, διότι το κτίριο παρέμεινε ανέπαφο χωρίς καμία δομική βλάβη ή ρωγμή, παρά την ευαισθησία της τοιχοποιίας σε σεισμικές δονήσεις. Ωστόσο, όπως υπογραμμίζει ο κ. Βασιλείου, οι δοκιμές ανέδειξαν και ορισμένα τεχνικά ζητήματα, όπως η ολίσθηση αντί για κύλιση σε περιπτώσεις όπου η τριβή μεταξύ σφαίρας και πλάκας δεν επαρκούσε. Αυτό προκάλεσε τοπικές φθορές στο ελαστικό και οδήγησε σε παραμένουσες μετακινήσεις του κτιρίου, δηλαδή το κτίριο δεν

επέστρεφε ακριβώς στην αρχική του θέση μετά το πέρας της δόνησης. Επίσης, σημειώθηκε μια μόνο αστοχία σε μία μπάλα τένις. Όπως τονίζεται στην ομιλία, αυτά τα ευρήματα είναι κρίσιμα για την περαιτέρω εξέλιξη του συστήματος, καθώς υποδεικνύουν την ανάγκη για χρήση ινών στο σκυρόδεμα.



Πηγή εικόνας: users.ntua.gr

Μελλοντικές Κατευθύνσεις και Ερωτήσεις

Κλείνοντας την εισήγησή του, ο κ. Βασιλείου αναφέρθηκε στις μελλοντικές προοπτικές της έρευνας, οι οποίες επικεντρώνονται στην επίλυση των προβλημάτων που παρατηρήθηκαν. Προτείνεται η χρήση συστημάτων διπλής καμπυλότητας, όπου η μεταφορά της τέμνουσας δύναμης επιτυγχάνεται μέσω της κλίσης των επιφανειών και όχι αποκλειστικά μέσω της τριβής, εξασφαλίζοντας έτσι την κύλιση. Επιπλέον, εξετάζονται απλούστερες γεωμετρίες, όπως τα κωνικά καλούπια, που μπορούν να κατασκευαστούν εύκολα από μεταλλικά φύλλα σε οποιοδήποτε σιδηρουργείο, μειώνοντας ακόμα περισσότερο το κόστος παραγωγής. Στο πλαίσιο των ερωτήσεων, ο ομιλητής ξεκαθάρισε ότι υλικά όπως η διογκωμένη πολυστερίνη (φελιζόλ) παρουσιάζουν σημαντικά μειονεκτήματα στη χρήση τους ως σεισμική μόνωση, αφού στερούνται δύναμης επαναφοράς. Χωρίς αυτήν, ακόμα και μια ελάχιστη κατασκευαστική απόκλιση στην οριζοντιότητα μπορεί να προκαλέσει επικίνδυνη συσσώρευση μετακινήσεων και τελικά την κατάρρευση της μόνωσης. Συμπερασματικά, όπως τονίζεται από τον κ. Μιχάλη Βασιλείου, η έρευνα αποδεικνύει ότι η χρήση ελαστικών σφαιρών με σκληρό πυρήνα αποτελεί μια επιστημονικά έγκυρη και οικονομικά προσιτή μέθοδο, η οποία μπορεί να γεφυρώσει το χάσμα μεταξύ της υψηλής τεχνολογίας και των αναγκών των λιγότερο προνομιούχων περιοχών, προσφέροντας ασφάλεια σε παγκόσμιο επίπεδο. Η μετάβαση από το εργαστήριο στην πραγματική εφαρμογή, σύμφωνα με τον ίδιο, απαιτεί επιπλέον μελέτες μακροχρόνιας γήρανσης, ώστε να διασφαλιστεί η αξιοπιστία του συστήματος για όλη τη διάρκεια ζωής της κατασκευής.

Δείτε ολόκληρη την παρουσίαση του κυρίου Μιχάλη Βασιλείου στο Building Strengthening Show 2025: