

## ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΡΡΟΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΩΝ ΑΤΕΛΕΙΩΝ ΣΤΗΝ ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΩΝ ΩΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΥΠΟ ΑΞΟΝΙΚΟ ΦΟΡΤΙΟ: ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ

Δήμητρα Β. Αχιλλοπούλου<sup>1\*</sup>

*1\**: Δρ. Πολιτικός Μηχανικός Δ.Π.Θ., Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica, Università di Roma 'La Sapienza', [dimitra.achillopoulou@uniroma1.it](mailto:dimitra.achillopoulou@uniroma1.it), [dimiach@civil.duth.gr](mailto:dimiach@civil.duth.gr)

Αθανάσιος Ι. Καραμπίνης<sup>2</sup>

*2*: Δρ. Πολιτικός Μηχανικός Δ.Π.Θ., Καθηγητής Τμ. Πολιτικών Μηχανικών Δ.Π.Θ., Εργαστήριο Ωπλισμένου Σκυροδέματος

### Εισαγωγή

Για την επισκευή κρίσιμων δομικών στοιχείων από ωπλισμένο σκυρόδεμα, όπως είναι τα υποστυλώματα χρησιμοποιούνται πληθώρα υλικών και πληθώρα τεχνικών κατά περίπτωση. Διεθνή πρότυπα και κανονισμοί θέτουν το θεωρητικό υπόβαθρο και τις τεχνικές προδιαγραφές ώστε να επιτυγχάνεται ασφαλής και αποδοτική επισκευή.

Στη διάρκεια ζωής της, μια κατασκευή υφίσταται βλάβες από διάφορες αιτίες. Τέτοιες βλάβες μπορεί να οφείλονται σε:

- Κατασκευαστικές ατέλειες: ελλιπής συμπίκνωση και συντήρηση σκυροδέματος, μεγάλος κόκκος αδρανούς κλπ.
- Σεισμικές καταπονήσεις: υπέρβαση του φορτίου σεισμού σχεδιασμού κατά τη σεισμική διέγερση
- Έκθεση σε περιβαλλοντικές συνθήκες: παγετός, θερμοκρασιακές μεταβολές, έκθεση σε χλωριόντα, ενανθράκωση, χημικά
- Φωτιά: έκθεση σε θερμοκρασίες άνω των 600° C
- Αλλαγή χρήσης: αλλαγή φορτίων σχεδιασμού

Τέτοιου είδους βλάβες συναντώνται στις κατασκευές συνδυαστικά. Τα διάφορα κανονιστικά πλαίσια θεωρούν ότι μετά την επισκευή τα δομικά στοιχεία έχουν αποκατασταθεί ως προς την αντοχή τους επαρκώς. Μάλιστα, τα υλικά επισκευής κατηγοριοποιούνται ανάλογα με τις μηχανικές τους ιδιότητες τους. Για παράδειγμα το ευρωπαϊκό πρότυπο EN-1504-3 και EN 1504-6 ορίζουν την κατηγορία R4 για χαλύβδινα αγκύρια. Η κατηγορία περιλαμβάνει θιξοτροπικά κονιάματα έτοιμα προς χρήση. Μάλιστα, οι μηχανικές ιδιότητες και η πρόσφυση μεταξύ κονιάματος και σκυροδέματος είναι αυξημένη και ενισχυμένη ενώ ταυτόχρονα δεν παρουσιάζουν διόγκωση και περαιτέρω ρηγματώσεις. Στην παρούσα μελέτη εξετάζεται η επιρροή των κατασκευαστικών ατελειών στην απόκριση υποστυλωμάτων Ω.Σ., τόσο πειραματικά όσο και αναλυτικά. Σκοπός της εργασίας δεν είναι μία παραμετρική ανάλυση της επιρροής των διαφορετικών υλικών στην επισκευή αλλά η ασφαλής πρόβλεψη της συμπεριφοράς των υποστυλωμάτων (διαρροή, μετελαστική συμπεριφορά).

### Πειραματικό Πρόγραμμα

Για τους σκοπούς της έρευνας καταρτίστηκε εκτενές πειραματικό πρόγραμμα. Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται 10 δοκίμια που προσομοιώνουν υποστυλώματα Ω.Σ.. Τα δοκίμια κατασκευάστηκαν υπό κλίμακα τετραγωνικής διατομής 1:2 (150x150mm<sup>2</sup>) και ύψους 500mm. Το σκυρόδεμα που χρησιμοποιήθηκε ήταν ονομαστικής θλιπτικής αντοχής 24MPa (δοκιμές θλιπτικής αντοχής κυλινδρικών δοκιμίων στις 28 μέρες) ενώ ο χάλυβας του διαμήκουσ οπλισμού είχε ονομαστική

εφελκυστική αντοχή ίση με 500MPa και 220MPa ο χάλυβας συνδετήρων. Τα δοκίμια οπλίστηκαν συμμετρικά με δύο διαμήκεις ράβδους οπλισμού διαμέτρου 8mm ανά παρειά. Ως εγκάρσιος οπλισμός χρησιμοποιήθηκαν κλειστοί συνδετήρες διαμέτρου 5,5mm και τοποθετήθηκαν σε αποστάσεις 100mm ( $\omega_c=0.075$ ) και 50mm ( $\omega_c=0.15$ ). Όλες οι ράβδοι οπλισμοί αγκυρώθηκαν κατάλληλα. Τα μηχανικά ποσοστά που εξετάστηκαν είναι σε συμφωνία με τα ποσοστά που ορίζουν οι κανονισμοί για την αποφυγή φαινομένων κλίμακας. Το ποσοστό διαμήκους οπλισμού ( $\rho_{min}=1\%$ ) είναι ίσο με το ελάχιστο που ορίζουν οι κανονισμοί για υποστυλώματα μέσης πλαστιμότητας στις κρίσιμες διατομές.

Κατά τη σκυροδέτηση η συμπίκνωση του σκυροδέματος ήταν ελλιπής με στόχο την ελεγχόμενη δημιουργία κατασκευαστικών ατελειών σε 8 υποστυλώματα. Για το λόγο αυτό, οι προδιαγραφές του προτύπου EN206-1 και ACI309R-06 αντίστοιχα δεν εφαρμόστηκαν πλήρως. Τα πρότυπα ορίζουν ότι στις περιπτώσεις συμπίκνωσης σκυροδέματος με εσωτερικό δονητή για χυτό σκυρόδεμα σε λεπτότοιχα στοιχεία πρέπει να χρησιμοποιείται δονητής διαμέτρου 20-40mm και ρυθμός έγχυσης σκυροδέματος 1-5yd. Ως αποτέλεσμα η διάμετρος επιρροής είναι 80-150mm. Χρησιμοποιήθηκε δονητής διαμέτρου 20mm και ο ρυθμός έγχυσης ήταν μεγαλύτερος από τον προβλεπόμενο. Μάλιστα, το χρησιμοποιούμενο σκυρόδεμα περιείχε μέγιστο κόκκο αδρανούς ίσος με 32mm, δηλαδή μεγάλο για την εξεταζόμενη διατομή.

Δύο δοκίμια κατασκευάστηκαν χωρίς βλάβες (ένα για κάθε κατηγορία περίσφιγξης) και θεωρούνται ως δοκίμια αναφοράς. Για την επισκευή των δοκιμίων χρησιμοποιήθηκε υψηλής αντοχής ινοπλισμένο θιξοτροπικό ψευδοπλαστικό τσιμεντοκονίαμα μηδενικής συρρίκνωσης και όλα τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε αξονική επαναλαμβανόμενη θλιπτική καταπόνηση κύκλων ανηγμένης αξονικής παραμόρφωσης ίσης με 1‰ έως 10‰. Η διαδικασία προφόρτισης δημιούργησε ρωγμές υπερκαταπόνησης όπως σε πραγματικές φορτιστικές καταστάσεις.

**Πίνακας 1:** Χαρακτηριστικά δοκιμίων

Specimen	$\omega_c$	$d_s$ (%)	$d_h$ (%)	$d_v$ (%)
R <sub>c</sub> -2	0.075	-	-	-
D <sub>m</sub> R <sub>c</sub> -1	0.075	25	10	32
D <sub>m</sub> R <sub>c</sub> -2	0.075	31	14	40
D <sub>m</sub> R <sub>c</sub> -3	0.075	25	14	35
D <sub>m</sub> R <sub>c</sub> -4	0.075	13	14	25
R <sub>c</sub> -1	0.15	-	-	-
D <sub>m</sub> R <sub>c</sub> -1	0.15	25	20	40
D <sub>m</sub> R <sub>c</sub> -3	0.15	13	24	34
D <sub>m</sub> R <sub>c</sub> -4	0.15	25	28	46
D <sub>m</sub> R <sub>c</sub> -5	0.15	37	26	54
D <sub>m</sub> R <sub>c</sub> -6	0.15	31	22	46

### Δείκτες Βλάβης

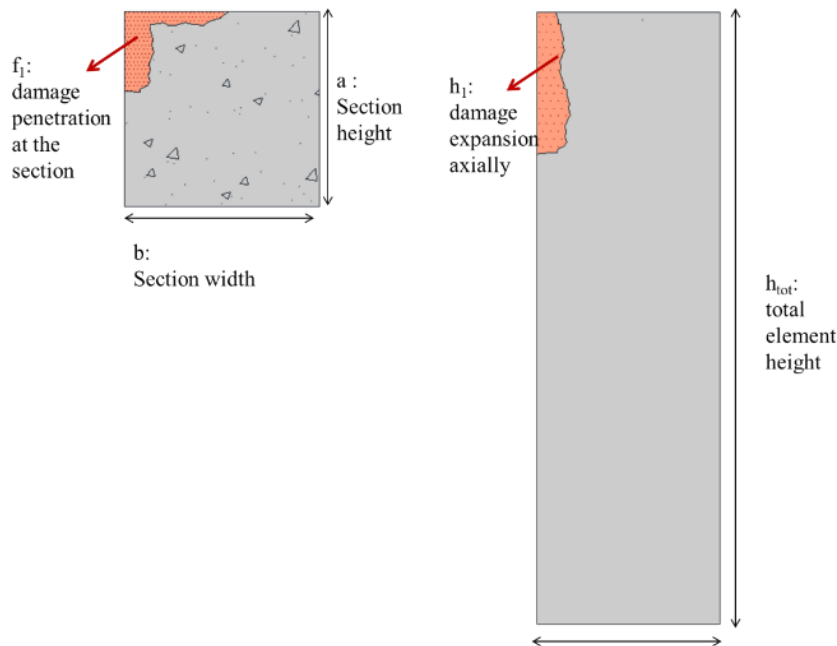
Για την ποσοτικοποίηση των βλαβών χρησιμοποιήθηκαν οι δείκτες που προτάθηκαν από τους Achilloroulou&Karabinis 2015. Οι τρεις αυτοί δείκτες βλάβης μετρούν την εισχώρηση της βλάβης στη διατομή και την έκταση της στο μήκος του στοιχείου. Ο τελευταίος δείκτης είναι συνδυαστικός μετρώντας τον όγκο βλάβης:

$$d_s = f_1 / f_{tot} \quad (\Sigma\chi. 1)$$

$$d_h = h_1 / h_{tot} \quad (\Sigma\chi. 2)$$

$$d_v = 1 - [(1-d_s) \cdot (1-d_h)] \quad (\Sigma\chi. 3)$$

όπου  $f_1$  είναι το εμβαδό εισχώρησης βλάβης στην διατομή,  $f_{tot}$  είναι το ονομαστικό εμβαδό διατομής,  $h_1$ : μήκος έκτασης βλάβης αξονικά και  $h_{tot}$  είναι το συνολικό ύψος του δοκιμίου (Σχήμα 1).



Σχήμα 1: Σχηματική απεικόνιση βλαβών

Τα πλεονεκτήματα της χρήσης των δεικτών έγκειται στην οικονομία χρόνου και εξόδων του οπτικού αυτού ελέγχου. Ουσιαστικά, χωρίς κόστος εξοπλισμού και αναλύσεων αποτελεί μία μη-καταστρεπτική μέθοδο προσδιορισμού του βαθμού βλάβης των δομικών στοιχείων.

Ωστόσο, μόνο οι δείκτες δεν είναι αρκετοί για να χαρακτηρίσουν την έκταση της βλάβης. Για αυτό το σκοπό προτάθηκε ένα αναλυτικό προσομοίωμα προσδιορισμού (Σχ.4, Σχ.5) του ορίου διαρροής και αστοχίας τέτοιων επισκευασμένων στοιχείων. Το προσομοίωμα αναπτύχθηκε για τα δοκίμια που παρουσίασαν πλαστική συμπεριφορά μετά την επισκευή, δηλαδή για δοκίμια με  $d_h \leq 0.40$  και  $d_v \leq 0.55$ . οι σχέσεις 4 και 5 προτείνονται για τον υπολογισμό της μειωμένης ικανότητας σε αξονικό θλιπτικό φορτίο ως συνάρτηση του δείκτη βλάβης διατομής και της αξονικής παραμόρφωσης διαρροής ως συνάρτηση του ογκομετρικού δείκτη αντίστοιχα.

$$\frac{f_{cdm}}{f_{co}} = a + b * \left(\frac{f_{cc}}{d_s}\right)^{3/4}, \quad d_h \leq 0.40 \text{ \& } d_v \leq 0.55 \quad (\Sigma\chi.4)$$

$$\frac{\varepsilon_{ccy}^d}{\varepsilon_{c0y}} = c + d \cdot \left[ 1 + \frac{\left(\frac{0.85 \cdot d_v \cdot \varepsilon_{ccy}}{1000}\right)^{2/3}}{\varepsilon_{c0y}} \right], \quad d_h \leq 40\% \text{ \& } d_v \leq 55\% \quad (\Sigma\chi.5)$$

Όπου:

$f_{cdm}$ : θλιπτική ικανότητα επισκευασμένου στοιχείου (κατασκευαστικές ατέλειες)

$f_{co}$ : θλιπτική αντοχή μη περισφιγμένου σκυροδέματος

$f_{cc}$ : θλιπτική αντοχή περισφιγμένου σκυροδέματος

$\varepsilon_{ccy}^d$ : ανηγμένη αξονική παραμόρφωση διαρροής επισκευασμένου δοκιμίου

$\varepsilon_{ccy}$ : ανηγμένη αξονική παραμόρφωση διαρροής περισφιγμένου σκυροδέματος

$\varepsilon_{c0y}$ : ανηγμένη αξονική παραμόρφωση απερίσφιγτου σκυροδέματος

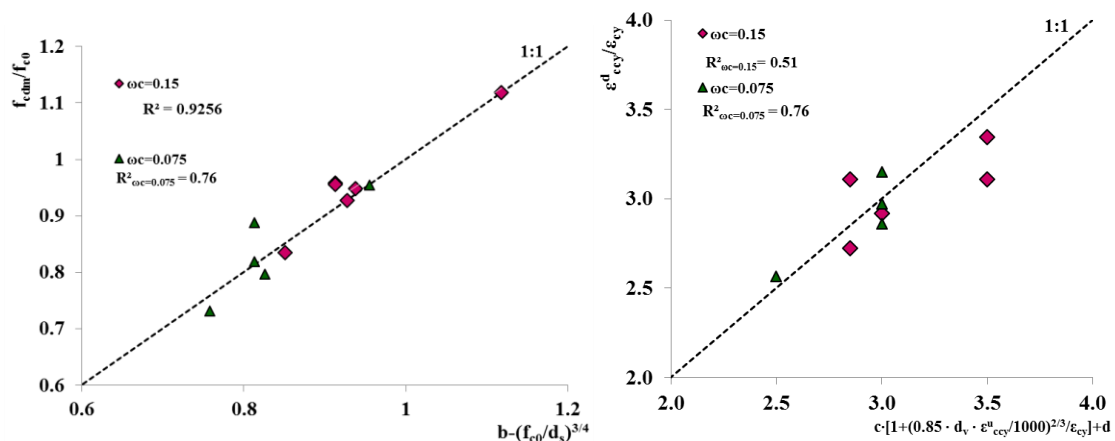
$a, b, c, d$ : συντελεστές βαθμονόμησης

Το θεωρητικό προσομοίωμα πρόβλεψης της συμπεριφοράς του περισφιγμένου σκυροδέματος που προτείνει ο ευρωκώδικας EN 1998-1: 2004 δίνεται από τη σχέση:

$$\sigma_c = f_{cd} \cdot \left[ 1 - \left( 1 - \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c2}} \right)^n \right] \text{ for } 0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{c2} \quad (\text{Σχ. 6})$$

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{c2} \left[ 1 + 5 \left( \frac{f_{cc}}{f_c} - 1 \right) \right] \quad (\text{Σχ. 7})$$

Χρησιμοποιώντας τις σχέσεις (4) και (5) ως πολλαπλασιαστικό συντελεστή στη σχέση 6 και 7 προκύπτει η συνολική συμπεριφορά του επισκευασμένου στοιχείου. Το σχήμα 2 δείχνει την βαθμονόμηση του προτεινόμενου προσομοιώματος καθιστώντας το κάθε άλλο παρά επισφαλής για την εκτίμηση της απόκρισης με απλό, οικονομικό και ταχύ τρόπο.



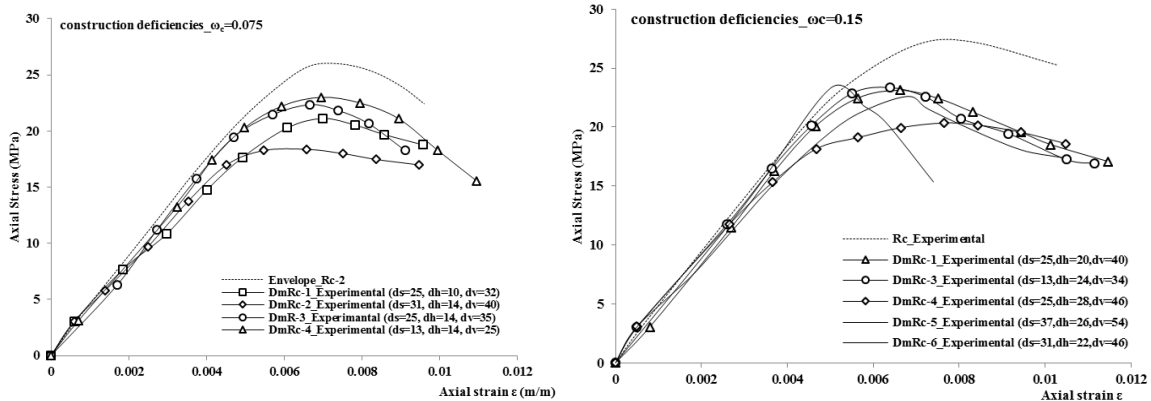
Σχήμα 2: Βαθμονόμηση προτεινόμενου μοντέλου πρόβλεψης

### Πειραματικά Αποτελέσματα

Το σχήμα 2 παρουσιάζει τις περιβάλλουσες τάσεων ανηγμένων παραμορφώσεων των δοκιμών με χαμηλό ποσοστό περισφιγξης ( $w_c=0.075$ ). Σημειώνεται πως οι τάσεις ανάγονται ως προς τη μέγιστη τάση σχεδιασμού της αρχικής διατομής.

Όπως φαίνεται, για παραμορφώσεις μέχρι τις 3% όλες οι καμπύλες συμπίπτουν ανεξάρτητα από τον δείκτη βλάβης. Για ανηγμένες παραμορφώσεις που ξεπερνούν το 3% ( $\varepsilon > 3\%$ ) τα δοκίμια με κατασκευαστικές ατέλειες παρουσιάζουν μειωμένη θλιπτική αντοχή συγκριτικά με το δοκίμιο αναφοράς (Rc2). Όλα τα δοκίμια παρουσιάζουν μέγιστη τάση σε παραμόρφωση 7%. Μετά την εμφάνιση του μέγιστου φορτίου τα επισκευασμένα στοιχεία παρουσιάζουν φθίνοντα κλάδο με μείωση του φορτίου έως 22%. Σε αντίθεση με το δοκίμιο αναφοράς που παρουσίασε φθίνοντα κλάδο για παραμόρφωση μεγαλύτερου του 8%. Συγκρίνοντας τα πειραματικά αποτελέσματα των δοκιμών με ίδιο δείκτη βλάβης διατομής ( $d_s=25\%$ ), προκύπτουν ελάχιστες διαφοροποιήσεις σε όρους παραμόρφωσης (της τάξης του 6%). Ακόμα, παρατηρείται, πώς ο συνδυασμένος ογκομετρικός δείκτης βλάβης ( $d_v$ ) φαίνεται να παίζει ρόλο στη μηχανική συμπεριφορά για παραμορφώσεις μεγαλύτερες του 8%. Πράγματι, τα δοκίμια με αυξημένο δείκτη  $d_v$  παρουσίασαν μεγαλύτερα ποσοστά μείωσης φορτίου (τάσης).

Αναφορικά με τα δοκίμια που περιέχουν υψηλό ποσοστό περίσφιγξης ( $\omega_c=0.15$ ) η μέγιστη τάση παρατηρείται σε τιμές ανηγμένης παραμόρφωσης ίσης με 5-6%. Η τιμή της ανηγμένης παραμόρφωσης που αντιστοιχεί στη μέγιστη τάση είναι αυξημένη λόγω της εσωτερικής ολίσθησης των αδρανών. Στα υψηλά επίπεδα βλάβης- εντός των ποσοστών βλάβης που εξετάζονται σε αυτήν την εργασία- (DmRc5) η μέγιστη τάση είναι περισσότερο μειωμένη (22%). Στις περιπτώσεις που η εισχώρηση της βλάβης στη διατομή ξεπερνά το 17% ( $d_s>25\%$ ) η παραμόρφωση αστοχίας είναι 5% και παρουσιάζεται απότομη πτώση του αναλαμβανόμενου φορτίου λόγω πρώιμου λυγισμού των διαμήκων ράβδων οπλισμού και αποκόλλησης του επισκευαστικού υλικού. Σε αυτές τις περιπτώσεις η αστοχία είναι ψαθυρή και όχι πλαστική.



**Σχήμα 3:** Περιβάλλουσες τάσεων παραμορφώσεων επισκευασμένων δοκιμίων από αρχικές κατασκευαστικές ατέλειες για τα διαφορετικά ποσοστά περίσφιγξης



**Σχήμα 4:** Λυγισμός διαμήκους ράβδου οπλισμού

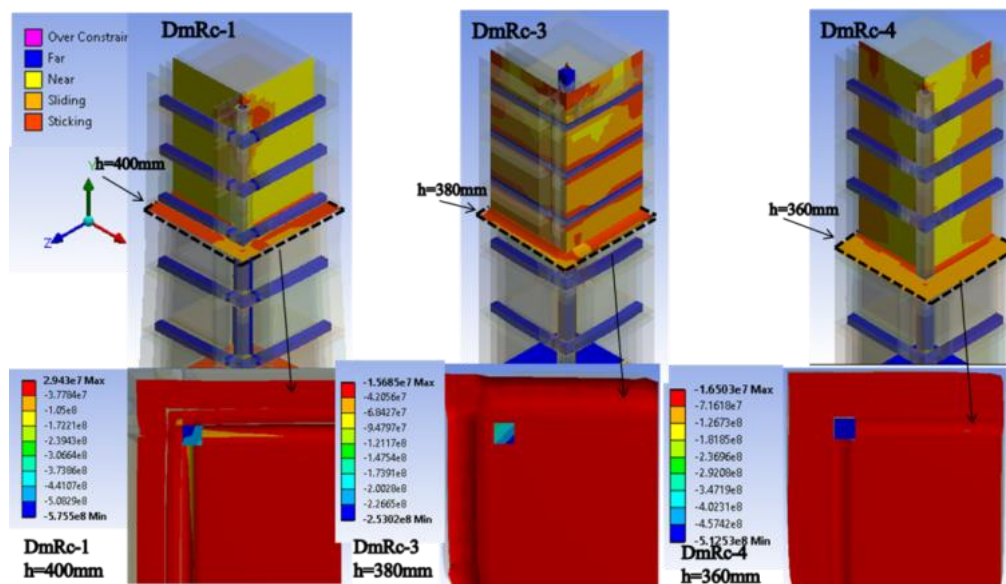
### Πεπερασμένα Στοιχεία

Η ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία είχε ως σκοπό την κατανόηση της αστοχίας επισκευαστικού υλικού και σκυροδέματος αλλά και την απεικόνιση της διάδοσης των τάσεων μέσω της διεπιφάνειας του.

Για την προσομοίωση επιλέχθηκε κατάλληλο εξάεδρο στερεό οριζόμενο από 20 κόμβους τόσο για το σκυρόδεμα όσο και για το χάλυβα, χρησιμοποιώντας διγραμμικό νόμο τάσεων παραμορφώσεων. Για την προσομοίωση της διεπιφάνειας επιλέχθηκαν επιφανειακά τριγωνικά στοιχεία 6 ή 8 κόμβων που ακολουθούν νόμο αποκόλλησης και μοντέλο αστοχίας.

Η επίλυση του μη γραμμικού προβλήματος έγινε με την επαναληπτική μέθοδο Newton-Raphson. Για την βήμα προς βήμα επίλυση επιλέχθηκε κατάλληλη διακριτοποίηση με ελάχιστο μήκος στοιχείου μεγαλύτερο από την επιβαλλόμενη μετακίνηση (μεταξύ κεφαλής και πόδα στοιχείου).

Η ανάλυση μέσω πεπερασμένων στοιχείων προβλέπει επιτυχώς τον τρόπο αποκόλλησης επισκευαστικού υλικού. Το μοντέλο προβλέπει τη σταδιακή αποκόλληση του επισκευαστικού κονιάματος σε κάθε κύκλο φόρτισης που σχετίζεται με τις ορθές τάσεις που προκαλούνται στη διεπιφάνεια λόγω της διόγκωσης του σκυροδέματος (Σχ.5). Η αποκόλληση του υλικού παρατηρείται με υπέρβαση του ορίου διάτμησης της διεπιφάνειας



Σχήμα 5: Αποκόλληση επισκευαστικού υλικού (FEM)

### Συμπεράσματα

Οι κατασκευαστικές ατέλειες επηρεάζουν την συνολική συμπεριφορά των δοκιμών οδηγώντας σε μικρότερα επίπεδα ανάληψης φορτίου. Η μείωση της ικανότητας φτάνει το 22% και αντιστοιχεί σε αυξημένη αξονική παραμόρφωση (5-7%) ανάλογα με την έκταση της βλάβης. Με την υπέρβαση ενός ορίου βλάβης διατομής ( $d_s=25\%$ ) η συμπεριφορά είναι κυρίως ψαθυρή και εμφανίζεται λυγισμός των διαμήκων ράβδων οπλισμού.

Το φαινόμενο λυγισμού πρέπει να λαμβάνεται υπόψιν όταν η βλάβη διατομής ξεπερνά το 25%. Το προτεινόμενο μοντέλο δεν περιλαμβάνει την συμπεριφορά τέτοιων στοιχείων μετά το μέγιστο που κυρίως περιγράφεται από απότομο φθίνοντα κλάδο (ψαθυρή αστοχία).

Οι προτεινόμενοι δείκτες με την ενσωμάτωσή τους στο μοντέλο του EN 1998-1:2004 αποδεικνύεται ότι αποτελεί ένα ασφαλές εργαλείο αποτίμησης της συμπεριφοράς αυτών των στοιχείων χωρίς χρήση μη-καταστρεπτικών κοστοβόρων μεθόδων χωρίς ανάγκη εξοπλισμού και επεξεργασίας.



## Βιβλιογραφία

- Achillopoulou D.V.; Karabinis A.I. (2015), 'Repaired Concrete Columns With Fiber Reinforced Thixotropic Mortar: Experimental & FEA Approach', *Computers and concrete*, Vol. 15, No. 1, 635-656
- Saand, A., Ismail, M., Sumadi, S.R., Afridi, M.U.K. Behaviour of pre-damaged reinforced concrete beams repaired with polymer-modified mortar (2006) *Materials, Experimentation, Maintenance and Rehabilitation - Proceedings of the 10th East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction, EASEC 2010*, pp. 27-32
- European Standard EN (2005), "Eurocode 8 Design of structures for earthquake resistance, Part 3: Assessment and retrofitting of Buildings"
- Organisation of Seismic Design and Protection (2012), "Greek Retrofit Code Attuned to EN 1998/3"
- American Concrete Institute (2008), "Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-08) and Commentary", *ACI -318R-08 Building Code*
- Achillopoulou D.V.; Karabinis A.I., (2015): 'Assessment of Concrete Columns Repaired With Fiber Reinforced Mortar through Damage Indexes and Numerical Model.' *Construction and Building Materials* (81) 248-256.
- Achillopoulou D.V.; Karabinis I. A. (2013), 'Investigation of shear transfer mechanisms in repaired damaged concrete columns strengthened with RC jackets', *Structural Engineering and Mechanics*, Vol. 47, No. 4, 575-598.
- Achillopoulou D.V.; Rousakis T.C.; Karabinis I. A. (2012) , "Force transfer between existing concrete columns with reinforced concrete jackets subjected to pseudoseismic axial loading" *Proceeding of 15<sup>th</sup> WCEE, Lisbon*.
- Larosche, C.J. (2009) 'Types and causes of cracking in concrete structures' *Failure, Distress and Repair of Concrete Structures*, pp. 57-83.
- Kovler, K., Chernov, V. (2009) 'Types of damage in concrete structures' *Failure, Distress and Repair of Concrete Structures*, pp. 32-56.
- Karayannis, C. & Chalioris, C. (2000). 'Capacity of RC joints subjected to early-age cyclic loading' *Journal of Earthquake Engineering*, pp. 4 (4), pp. 479-509.
- Karayannis, C., Chalioris, C. & Sideris, K., (1998). Effectiveness of RC beam-column connection repair using epoxy resin injections. *Journal of Earthquake Engineering*, pp. 2 (2), pp. 217-240
- Penttala, V., Al-Neshawy, F. (2002) 'Stress and strain state of concrete during freezing and thawing cycles' *Cement and Concrete Research*, 32 (9), pp. 1407-1420.
- Lu, W., Lubbad, R., Løset, S. (2014) 'Simulating ice-sloping structure interactions with the cohesive element method' *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 136 (3), art. no. 031501
- Lachemi, M., Al-Bayati, N., Sahmaran, M., Anil, O. (2014) 'The effect of corrosion on shear behavior of reinforced self-consolidating concrete beams' *Engineering Structures*, 79, pp.1-12.
- Ma, Y., Xiang, Y., Wang, L., Zhang, J., Liu, Y. (2014) 'Fatigue life prediction for aging RC beams considering corrosive environments' *Engineering Structures*, 79, pp. 211-221.
- Sideris K.K. and Savva A.E. (2005). 'Durability of Mixtures Containing Calcium Nitrite Based Corrosion Inhibitor'. *Cement and Concrete Composites*, Vol. 27, Issue 2, 277-287.
- Sharma, U.K., Kumar, V., Kamath, P., Singh, B., Bhargava, P., Singh, Y., Usmani, A., Torero, J., Gillie, M., Pankaj, P. (2014) 'Testing of full-scale RC frame under simulated fire following earthquake' *Journal of Structural Fire Engineering*, 5 (3), pp. 215-228.

EN 1504: European Standard: Products and systems for the protection and repair of concrete structures - Definitions, requirements, quality control and evaluation of conformity, European Committee for Standardization, (April 2013).

EN 206-1: European Standard: Concrete- Part1: Specification, performance, production and conformity (December 2000), European Committee for Standardization.

ACI 309R-06: Guide for Consolidation of Concrete, ACI Committee 309 (May 2006), American Concrete Institute.