

## 9. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στο Δεύτερο Τόμο της Τελικής Έκθεσης, συνοψίζονται τα παρακάτω συμπεράσματα σχετικά με την ενίσχυση δοκών από ΟΣ με ΙΝΟΠ μορφής υφάσματος ή ράβδων σε ανακυκλιζόμενη καταπόνηση.

### 9.1 Σύγκριση πειραματικής και αναλυτικής συμπεριφοράς

1. Ο έλεγχος των καταγεγραμμένων μεγεθών με πρόσθετες (*redundant*) μετρήσεις αντιδράσεων έδειξε ότι η πειραματική διάταξη είναι αξιόπιστη στην υλοποίηση της συνεχούς δοκού δύο ανοιγμάτων με το στατικό προσομοίωμα του Κεφαλαίου 4.
2. Η πλαστιμότητα του δοκιμίου **NEAK MONO** δεν είναι ενδεικτική της πραγματικής ικανότητας του δοκιμίου λόγω περιορισμών της διάταξης που κρίθηκαν απαραίτητοι για τη βαθμονόμησή της με πρόσθετες κυψέλλες φορτίου στις αντιδράσεις. Η συμπεριφορά του δοκιμίου ήταν καθ' όλα καμπτική με πλήρη αποφυγή διατμητικής αστοχίας, ακόμα και στο μεσαίο τμήμα που είχε χαμηλό λόγο διάτμησης, τόσο σε μονότονη όσο και σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση.
3. Η μεγαλύτερη φέρουσα ικανότητα σε σχέση με την προβλεπόμενη που ανέπτυξε η δοκός **NEAK MONO** αποδίδεται στην επαρκή αγκύρωση και στην ικανότητα του εφελκυσμένου χάλυβα να παραμορφωθεί πέραν του 2%, με συνεπαγόμενη κρατόνηση του χάλυβα. Λαμβάνοντας υπόψη την κράτυνση στον υπολογισμό της ροπής αντοχής, η απόκλιση του πειραματικού αποτελέσματος από τις θεωρητικές εκτιμήσεις ελαχιστοποιείται.
4. Το δοκίμιο με ενίσχυση ΙΝΟΠ στις παρειές, **G60 MONO**, απέδωσε μια αύξηση της αντοχής του της τάξης του 130% της προβλεπόμενης θεωρώντας μέγιστη παραμόρφωση του G60-AR ίση με 0,8%, ουσιαστικά υποδηλώνοντας συνεισφορά του ΙΝΟΠ πέραν της παραμόρφωσης αυτής: ανάλυση της υπεραντοχής του δοκιμίου βάσει πειραματικών χαρακτηριστικών των υλικών με

την παραδοχή της δημιουργίας δύο αρθρώσεων με ίδια καμπτική αντοχή, αντιστοιχεί σε συμμετοχή του ΙΝΟΠ στην ακρότατη εφελκυσόμενη ίνα ίση με  $\varepsilon_f = 16,0 \%$ . Το δοκίμιο, έως την παραμόρφωση των 85mm, έπεσε σε ελάχιστη αντοχή τουλάχιστον 15% της μέγιστης (κρατυνόμενης) αντοχής του δοκιμίου ελέγχου **NEAK MONO**. Η σημασία της πρόβλεψης της μέγιστης συμμετοχής του ΙΝΟΠ στον ικανοτικό σχεδιασμό είναι καθοριστική για την αποφυγή πρόωμης διατμητικής αστοχίας.

5. Το γεγονός αυτό, σε συνδυασμό με την αυξημένη πλαστιμότητα σε όρους μετατοπίσεων (8,70) που εμφάνισε το στοιχείο [ξεπερνώντας τις απαιτήσεις του Ευρωκώδικα 8 (CEN, 2002) που καθορίζουν  $\mu_\delta$  τουλάχιστον 4] καθιστούν τον συγκεκριμένο τρόπο ενίσχυσης ελκυστικό, συνυπολογίζοντας και το συγκριτικά χαμηλό κόστος του σύνθετου υλικού.

6. Το ενισχυμένο στοιχείο **C1-30 MONO** και η συγκεκριμένη μέθοδος ενίσχυσης έδωσε τα πτωχότερα αποτελέσματα από όλες τις συγκρινόμενες, με μέγιστη πλαστιμότητα (σε αστοχία 85% της μέγιστης αντοχής) μεταξύ 2,3 και 3,10, λόγω ψαθυρής αστοχίας, ή ακόμη και κάτω από 2,0 σε ισοδύναμη διγραμμική συμπεριφορά. Τίθεται, επομένως, υπό αμφισβήτηση η αξιοπιστία αυτού του τρόπου άνω και κάτω ενίσχυσης με ΙΝΟΠ οιασδήποτε μορφής, σε σχέση με τον εναλλακτικό τρόπο που μελετήθηκε στην παρούσα, με εφαρμογή των ΙΝΟΠ στις παρειές (όπου αυτό είναι εφικτό). Το δοκίμιο απέδωσε αύξηση της αντοχής 117% της προβλεπόμενης θεωρώντας μέγιστη παραμόρφωση του C1-30 ίση με 0,6%.

7. Η ενίσχυση με ράβδους Mbar στο δοκίμιο **MBAR MONO** απέδωσε αύξηση της φέρουσας ικανότητας σε σχέση με τη μη ενισχυμένη δοκό **NEAK MONO** ίση με 139%, τιμή που αντιστοιχεί στη δημιουργία δύο πλαστικών αρθρώσεων με καμπτική αντοχή για συμμετοχή της ακρότατης ράβδου ΙΝΟΠ ίση με  $\varepsilon_f = 7,0\%$ . Η καταγραφείσα αντοχή ήταν κατά 8% μεγαλύτερη της προβλεπόμενης, θεωρώντας μέγιστη παραμόρφωση του Mbar ίση με 0,6%. Επί πλέον, καλύπτει τις απαιτήσεις του Ευρωκώδικα 8 (CEN, 2002) σχετικά με τις

απαιτήσεις πλαστιμότητας παρέχοντας πλαστιμότητα ίση με 6,40. Η αντοχή αυτή αντιστοιχεί σε συμμετοχή του ΙΝΟΠ στην ακρότατη εφελκυσόμενη ίνα ίση με  $\varepsilon_f = 10,0 \%$ .

8. Επί πλέον, σε αντίθεση με τη συμβατική μέθοδο ενίσχυσης, ο ρυθμός απομείωσης της αντοχής των δοκιμίων **G60 MONO** και **MBAR MONO** μετά τη μέγιστη τιμή της είναι πολύ πιο μικρός για αυξανόμενη παραμόρφωση, αποδίδει δε και τις μεγαλύτερες παραμορφωσιμότητες στις δοκούς, καταγράφοντας παραμορφώσεις με αντοχή μεγαλύτερη από την προτέρα μεταξύ 90 και 110 mm, σε σύγκριση με τη συμβατική άνω και κάτω μέθοδο ενίσχυσης με C1-30, που δεν παρείχε πέραν των 15 mm.

9. Ο συγκεκριμένος τρόπος ενίσχυσης με ΙΝΟΠ άρα, υπό μορφή διαμήκους υφάσματος ή ράβδων ΙΝΟΠ, τοποθετημένων κατά μήκος των πλαϊνών παρειών της δοκού, όπου αυτό είναι εφικτό, εμφανίζει ένα μεγάλο συγκριτικό πλεονέκτημα αφού όχι μόνο δεν καθιστά ψαθυρή τη συνολική συμπεριφορά και τοπική μορφή αστοχίας του εν λόγω ενισχυμένου στοιχείου αλλά προσφέρει σημαντικά μεγαλύτερη πλαστιμότητα και σταθερή ενεργειακή απορρόφηση σε σχέση με τον συμβατικό τρόπο ενίσχυσης άνω και κάτω, που, πλέον, είναι συγκρίσιμη με τα μη ενισχυμένα στοιχεία κατά ΕΑΚ (ΟΑΣΠ, 2000), στα οποία βασίζονται οι σημερινοί συντελεστές συμπεριφοράς σχεδιασμού των νέων κατασκευών.

## 9.2 Επιρροή της ανακύκλισης στη φέρουσα ικανότητα

10. Το δοκίμιο **NEAK CYCLIC**, οπλισμένο συμβατικά με μανδύα συμβατικού χάλυβα υψηλής αντοχής Φ8/100, απέδωσε ιδανική συμπεριφορά και σταθερή υστερετική απόκριση έως πλαστιμότητα 3,30, ικανοποιώντας το κριτήριο της απομείωσης στο 85%, παρά το μικρό διατμητικό μήκος του δοκιμίου στο μεσαίο τμήμα του ( $M/Vd = 1,30$ ). Τόσο στην μονοτονική όσο και κατά την ανακύκλιση, η συμπεριφορά του ήταν καμπτική.

11. Η μεγαλύτερη μείωση φέρουσας ικανότητας σε ανακύκλιση εμφανίζεται στο δοκίμιο **MBAR CYCLIC** ενώ στο **C1-30 CYCLIC** η φέρουσα ικανότητα παραμένει πρακτικά σταθερή. Αυτό, όμως, δεν σημαίνει ότι το δοκίμιο **C1-30 CYCLIC** δεν επηρεάζεται από την ανακύκλιση αλλά, όπως σημειώθηκε και πιο πάνω, η ενίσχυση έπαψε να υφίσταται μετά από τους πρώτους κύκλους, οπότε το δοκίμιο πρακτικά σταθεροποιείται στην μη ενισχυμένη του αντοχή. Ουσιαστικά, μετά την αστοχία των **INOPI**, το δοκίμιο **C1-30 CYCLIC** συμπεριφέρθηκε ως μη ενισχυμένο, κάτι που φαίνεται και από τη σχεδόν ταύτιση των τιμών τις φέρουσας του ικανότητας του με αυτών του δοκιμίου **NEAK MONO**. Το δοκίμιο **G60 CYCLIC** έχασε απότομα μεγάλο μέρος από τη φέρουσα ικανότητα του στον 4<sup>ο</sup> κύκλο αλλά από εκεί και πέρα αυτή παρέμεινε σχετικά σταθερή και σημαντικά μεγαλύτερη από ότι στα υπόλοιπα δοκίμια (σε ποσοστό 110 % της αντοχής του **NEAK MONO** στη μέγιστη παραμόρφωση που υπεβλήθη).

### 9.3 Σύγκριση δυσκαμψίας και παραμένουσας αντοχής των μονοτονικών δοκιμών

12. Η ενίσχυση στην άνω και κάτω παρειά του δοκιμίου (**C1-30 MONO**) προσδίδει τη μεγαλύτερη δυσκαμψία μετά τη ρηγμάτωση, από ότι οι άλλες μορφές ενίσχυσης, σε βαθμό περίπου 10% αυτής του δοκιμίου ελέγχου. Αντίθετα, οι άλλες δυο μορφές ενίσχυσης, η πλαϊνή ενίσχυση (**G60 MONO**) και η ενίσχυση με ράβδους (**MBAR MONO**) έχουν την ίδια δυσκαμψία με το μη ενισχυμένο δοκίμιο ελέγχου **NEAK MONO**.

13. Το δοκίμιο με άνω και κάτω ενίσχυση (**C1-30 MONO**) μετά την αστοχία του διαθέτει φέρουσα ικανότητα ίση με τη αυτήν του μη ενισχυμένου δοκιμίου (**NEAK MONO**), ενώ, μετά την πλήρη εφελκυστική αστοχία του νήματος **C1-30** στην άνω παρειά, το δοκίμιο συμπεριφέρεται ως μη ενισχυμένο. Στα δοκίμια με τις δύο άλλες μορφές ενίσχυσης, η παραμένουσα φέρουσα ικανότητα ήταν σημαντικά μεγαλύτερη αυτής του **NEAK MONO**, μέχρι το πέρας του πειράματος, σε παραμόρφωση μεταξύ 80 και 110 mm, υποδηλώνοντας ότι και οι

ενισχύσεις συνέχισαν να λειτουργούν και υπήρξε μεγαλύτερη ανακατανομή φορτίων.

#### 9.4 Σύγκριση απορροφώμενης ενέργειας

14. Την καλύτερη συμπεριφορά ως προς την απορρόφηση ενέργειας είχε το δοκίμιο **C1-30 CYCLIC** με ενίσχυση στην άνω και κάτω παρειά. Για το δοκίμιο αυτό οι τιμές του «β» παρέμειναν σχεδόν σταθερές περί το 17% για μεγάλο αριθμό βρόχων. Η συμπεριφορά αυτή όμως αποδίδεται στην πρακτικά ισοδύναμη ανακυκλιζόμενη απόκριση του δοκιμίου αυτού με το **NEAK CYCLIC**, έχοντας χάσει κάθε συνεισφορά του ΙΝΟΠ στην ενίσχυση. Από πλευράς πλαστιμοτήτων βέβαια, το δοκίμιο αυτό, υπό μονοτονική φόρτιση, είχε την μικρότερη παρεχόμενη πλαστιμότητα.

15. Το δοκίμιο **G60 CYCLIC** που παρείχε την βέλτιστη συμπεριφορά από πλευράς ανακύκλισης και απομείωσης της αντοχής είχε το μικρότερο λόγω ισοδύναμης ενεργειακής απορρόφησης β, σταθερά περίπου ίσο με 10%. Αντίθετα, τα δύο άλλα ενισχυμένα δοκίμια απέδωσαν τιμές περί το 25% σε πλαστιμότητα 3,30, όπως και το δοκίμιο ελέγχου.

#### 9.5 Σύγκριση παραλαμβανόμενης τέμνουσας

16. Στο δοκίμιο **MBAR MONO**, τα δύο μηχανοσκόπετρα κατέγραψαν παρόμοιες τιμές διατμητικής παραμόρφωσης, γεγονός που συνηγορεί υπέρ της αξιοπιστίας τους. Σε αντίθεση με το δοκίμιο **G60 MONO**, το εγκάρσιο ΙΝΟΠ υάλου παραλαμβάνει σε αυτή την περίπτωση ένα μέγιστο φορτίο περίπου 20 kN, τιμή υποτριπλάσια, στη μέγιστη παραμόρφωση και για συγκρίσιμες αντοχές, αυτής του **G60 MONO**, όπου η συμμετοχή του εγκάρσιου ΙΝΟΠ ήταν καθοριστικότερη.

17. Επί πλέον, στο δοκίμιο **MBAR MONO** εμφανίζεται σταθερή διαφορά μεταξύ του ποσοστού της παραλαμβανόμενης διάτμησης από συνδετήρες συν το

ΙΝΟΠ, και της απαιτούμενης δράσης ( $Q-(V_w+V_f)$ ), ακόμη και σε μεγάλες παραμορφώσεις, ενώ στο δοκίμιο **G60 MONO**, αυτή η διαφορά σταδιακά εκμηδενίζεται όσο αυξάνεται η παραμόρφωση του δοκιμίου, με το συνολικό ποσοστό της εξωτερικής διάτμησης να παραλαμβάνεται τελικά από την μετρούμενη δύναμη ( $V_w+V_f$ ).

18. Στην περίπτωση του **MBAR MONO**, στους μηχανισμούς παραλαβής τέμνουσας συμβάλλουν αρχικά σε μεγαλύτερο βαθμό στην ανάληψη της δρώσας τέμνουσας οι ράβδοι Mbar, υπό μορφή δράσης βλήτρου, κάτι που δεν υφίσταται στο δοκίμιο **G60 MONO**. Μετά το πέρας του πειράματος, παρατηρήθηκε αστοχία μίας ράβδου ΙΝΟΠ σε λειτουργία βλήτρου.

19. Και στους τρεις εναλλακτικούς τρόπους ενίσχυσης, παρατηρείται ότι οι μηχανισμοί ανάληψης τέμνουσας από τα εγκάρσια ΙΝΟΠ δεν ενεργοποιούνται από την έναρξη της επιβολής του φορτίου στο δοκίμιο. Προφανώς η τέμνουσα μέχρι το σημείο ενεργοποίησης (πάντοτε πριν από τη μέγιστη αντοχή) αναλαμβάνεται μόνο από τους δευτερεύοντες μηχανισμούς ανάληψης τέμνουσας ( $V_c$ ) λόγω του ότι δεν έχει ενεργοποιηθεί διατμητική ρηγμάτωση.

20. Η παραδοχή κατά το σχεδιασμό για τον υπολογισμό της απαιτούμενης διατμητικής ενίσχυσης, ότι η συμμετοχή του ΙΝΟΠ αντιστοιχεί σε μέγιστη ανηγμένη παραμόρφωση της ενίσχυσης ίση με 0,6% είναι μακράν μη συντηρητική και κατά της ασφαλείας. Με βάση τις υπολογισθείσες αντοχές που επετεύχθησαν πειραματικά, η συμμετοχή του ΙΝΟΠ, κατά περίπτωση, έφτασε ως και το 1,6% σε πλαϊνή ενίσχυση, ή σε 1,0% σε άνω και κάτω ενίσχυση, τιμές που πρέπει να θεωρούνται εφικτές στον ικανοτικό σχεδιασμό.

21. Παράλληλα, η μέγιστη παραμόρφωση του υφάσματος στον υπολογισμό της προσφοράς του υφάσματος στην διατμητική αντοχή, ενδέχεται να μειώνεται και κάτω του 0,25%.

## 9.6 Επάρκεια ενίσχυσης

22. Παρά τη σχετικά μικρότερη απορρόφηση ενέργειας, η εφαρμογή διαμήκους ενίσχυσης με ΙΝΟΠ οιασδήποτε μορφής (υφάσματος ή ράβδου) σε πλαϊνή διάταξη είναι πλέον αξιόπιστη από την συμβατική πρακτική της εφαρμογής των ΙΝΟΠ στην άνω και κάτω παρειά της δοκού. Τα πειράματα έδειξαν ότι στην πρώτη περίπτωση η παρεχόμενη υπεραντοχή σε συνάρτηση με την παραμόρφωση διατήρησης της δεδομένης αντοχής είναι σαφώς μεγαλύτερη από τη δεύτερη περίπτωση, πλησιέστερα στην συμπεριφορά που αποδίδει ένα συμβατικά οπλισμένο δοκίμιο από ΟΣ βάσει ΕΑΚ (ΟΑΣΠ, 2000).

23. Ο σχεδιασμός ενισχύσεων ΙΝΟΠ για την ενίσχυση δοκών με μικρό διατμητικό μήκος (περίπου 1,00) δεν είναι επαρκής σε ανακυκλιζόμενη συμπεριφορά, ακόμη και αν ληφθούν υπόψη κατά τον σχεδιασμό οι διατάξεις περί μηδενικής παραλαβής διατμητικού φορτίου από δευτερεύοντες μηχανισμούς στο σκυρόδεμα, η δε συνεισφορά του ΙΝΟΠ σε διάτμηση τηρηθεί σε απόλυτα συντηρητικά επίπεδα, βάσει των ισχυουσών διατάξεων (FIB-TG 9.3, 2001). Αν και η αναμενόμενη διατμητική αντοχή είναι εφικτό να παραληφθεί, η ανακυκλιζόμενη συμπεριφορά του στοιχείου (δυσκαμψία και ενεργειακή απορρόφηση) είναι κακή σε σύγκριση με τη συμβατικά οπλισμένη διατομή από ΟΣ.

24. Ως εκ τούτου, η χρήση αθροιστικών προσομοιωμάτων τύπου δικτυώματος για τον σχεδιασμό σε διάτμηση δεν οδηγεί σε επιθυμητά αποτελέσματα σε ανακύκλιση.

25. Σε αντίθεση με τα υποστυλώματα που ελέγχθηκαν στην Α φάση του ερευνητικού, η παρουσία των ΙΝΟΠ σε κρίσιμες περιοχές με ισχυρή απαίτηση διάτμησης (άρα και σχετικά μεγαλύτερη απαίτηση διαγώνιας θλίψης) δεν είναι σε θέση να καθυστερήσει πολύ περισσότερο δε να αποσοβήσει τα φαινόμενα λυγισμού στις αραιά συγκρατούμενες ράβδους του διαμήκους οπλισμού, με εμφανή αποτελέσματα στην φέρουσα ικανότητα τόσο σε καμπτικό όσο και σε διατμητικό επίπεδο.