

## 2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ

### 2.1 Πειραματική διερεύνηση συμπεριφοράς δοκών ενισχυμένων / επισκευασμένων με ΙΝΟΠ

Στον Πρώτο Τόμο της παρούσης, έγινε μια βιβλιογραφική επισκόπηση με αντικείμενο την πρόσφατη έρευνα σχετικά με την επισκευή και / ή ενίσχυση βάρων και υποστυλωμάτων με ΙΝΟΠ. Στην παρούσα επεκτείνεται η βιβλιογραφική διερεύνηση στην βιβλιογραφία που αφορά την καμψοδιατμητική ενίσχυση δοκών από ΟΣ με ΙΝΟΠ.

Οι Bencardino, Spadea και Swamy έλεγξαν πειραματικά έξι ορθογωνικές δοκούς με διαφορετικές αντοχές σκυροδέματος, ποσοστό εγκάρσιου οπλισμού και ίδιο διατμητικό μήκος 6.7. Οι δοκοί ενισχύθηκαν εξωτερικά με ύφασμα ΙΝΟΠ άνθρακα (CFRP) σε δύο διευθύνσεις. Τα πειράματα έγιναν υπό στατική φόρτιση, σε καθαρή κάμψη. Η εφαρμογή των υφασμάτων έγινε σε κάθε δοκίμιο με διαφορετικό τρόπο αγκύρωσης (πλήρης ή ελλειψής περιτύλιξη).

Οι Pellegrino και Modena (2002) έλεγξαν πειραματικά ένδεκα ορθογωνικές δοκούς με διατμητικό μήκος 3 υπό στατική μονοτονική φόρτιση σε καθαρή κάμψη. Με βάση την πειραματικά αποτιμώμενη μειωμένη διατμητική αντοχή, σε σύγκριση με τις θεωρητικές προβλέψεις που προτείνονται για τη διαστασιολόγηση των υφασμάτων σε διάτμηση βάσει της άθροισης των αντοχών του σκυροδέματος, του εγκάρσιου οπλισμού και του εξωτερικού FRP, προτείνουν ένα ανώτατο όριο στην αποτελεσματικότητα της διατμητικής ενίσχυσης ορθογωνικών διατομών οπλισμένων στις παρειές ή υπό μερική περιτύλιξη μορφής U, λόγω της επιρροής της διαμόρφωσης της ρηγμάτωσης του υπόβαθρου σε διάτμηση, σε συνάρτηση με το υπάρχον ποσοστό εγκάρσιου οπλισμού. Για την ποσοτική έκφραση αυτού του ανώτατου ορίου χρησιμοποιείται ο λόγος των αξονικών δυσκαμψιών των μηχανισμών παραλαβής διάτμησης, δηλαδή οπλισμού και υφάσματος ( $\rho_{s,f} = E_s A_s / E_f A_f$ ).

Οι Chaallal, Shahawy και Hassan (2002) έλεγξαν πειραματικά αμφιέριστες δοκούς διατομής T σε φυσική κλίμακα, με διατμητικό λόγο ίσο προς δύο,

ενισχυμένες εξωτερικά σε διάτμηση με ύφασμα CFRP. Σαν παράμετρος του πειράματος διερευνήθηκε η απόσταση των συνδετήρων. Αντικείμενο των πειραμάτων αποτελούσε η αποτίμηση της αύξησης της διατμητικής αντοχής σε διάτμηση, καθώς και η συνεισφορά του υφάσματος FRP στην συνολική διατμητική αντοχή. Τα πειραματικά αποτελέσματα απέδωσαν αύξηση αντοχής έως και 36% της αντοχής των μη ενισχυμένων δοκιμίων. Απεδείχθη επίσης ότι α) οι διατμητική αντοχή κατά ACI 318 των μη ενισχυμένων δοκιμίων (χωρίς εφαρμογή συντελεστών ασφαλείας λόγω σχεδιασμού) υποεκτιμούν τις πειραματικές αντοχές κατά 80% και β) ότι η φαινόμενη συνεισφορά των FRP, με βάση τις μετρήσεις των ανηγμένων παραμορφώσεων του ΙΝΟΠ και την αναγωγή τους με το προσομοίωμα του δικτύωματος, εκφράζεται με μια φθίνουσα συνάρτηση, ως προς το ποσοστό του εγκάρσιου οπλισμού.

Οι Micelli, Raghuand και Nanni (2002) έλεγξαν σε στατική φόρτιση δώδεκα διαδοκίδες διατομής T που πάρθηκαν από ένα υπάρχον κτίσμα που επρόκειτο να κατεδαφισθεί. Οι διαδοκίδες είχαν διατμητικό μήκος  $a/d$  ίσο προς 2.50 και ενισχύθηκαν (σε αφόρτιστη κατάσταση) σε διάτμηση πριν το πείραμα με υφάσματα FRP εξωτερικής εφαρμογής. Λόγω του σχήματος διατομής T των διαδοκίδων, τα FRP αγκυρώθηκαν με τη βοήθεια μίας διαμήκου ράβδου τοποθετημένης μέσα σε μία διαμήκη σχισμή στο κάτω μέρος της πλάκας, στο σημείο που συναντά τις παρειές της δοκού. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι, το συμβατικό αθροιστικό προσομοίωμα υπολογισμού για τον υπολογισμό της αντοχής βάσει του δικτύωματος (Khalifa A., Gold W., Nanni A. και M. Abdel Aziz, 1998, Triantafyllou και Antonopoulos, 2000 και ACI 440, 2002), υπερεκτίμησαν την πειραματική αντοχή σε διάτμηση μεταξύ 200% και 800%, για FRP αγκυρωμένα κάτω από την πλάκα, λόγω της πρόιμης αποκόλλησης των FRP και της υπερεκτίμησης, από το δίκτυωμα, της κλίσης της διατμητικής ρωγμής κατά την αστοχία.

Συνοπτικές βιβλιογραφικές αναφορές πειραμάτων με ανάλυση πειραματικών αποτελεσμάτων ως προς τον τρόπο αστοχίας και την επιρροή

των παραμέτρων του προβλήματος της ενίσχυσης δοκών έναντι κάμψης και διάτμησης με χρήση FRP, έχουν γίνει από τους Triantafillou και Antonopoulos (2000), Bonacci και Maalej (2001) και Bousselham και Chaallal (2004). Οι Triantafillou και Antonopoulos (2000) αναφέρουν, με βάση περαιτέρω πειραματικά δεδομένα, μια τροποποιημένη μορφή της αθροιστικής εξίσωσης σχεδιασμού σε διάτμηση ( $V_R = V_f + V_s + V_c$ ), όπως αυτή υιοθετείται από την FIB (2001) και την Επιτροπή 440 του ACI (2002), με βάση το ανάλογο ισορροπίας του δικτυώματος και την εν παραλλήλω συνεισφορά των μηχανισμών αντίστασης. Οι Bousselham και Chaallal (2004) χρησιμοποιούν τα αποτελέσματα από μία ευρύτερη βάση δεδομένων για να αμφισβητήσουν τη χρήση μεθοδολογίας και προσομοιώματος, βασιζόμενοι σε πειραματικές μετρήσεις ανηγμένων παραμορφώσεων αλλά και τάσεων στα πειραματικά αποτελέσματα για να τεκμηριώσουν την άποψή τους. Και οι δύο μελέτες συμπεραίνουν ότι η συνεισφορά των FRP στην ενίσχυση –είτε σε μορφή οριακής παραμόρφωσης  $\varepsilon_f$  είτε σε μορφή οριακής δύναμης  $V_f$  – φθίνει εκθετικά ως προς τον λόγο  $E_f \rho_f / f_c^{2/3}$ . Οι Bousselham και Chaallal (2004), συγκεκριμένα, αναγνωρίζουν περαιτέρω επιρροή στη  $V_R$  α) του διατμητικού μήκους  $a/d$  και β) του μηχανικού ογκομετρικού ποσοστού εγκάρσιων οπλισμών  $E_s \rho_s / E_f \rho_f$ .

Σε αυτή την κατεύθυνση κινούμενοι και οι Bonacci και Maalej (2001), κατηγοριοποιούν τα πειραματικά αποτελέσματα και αναλύουν διαφορετικούς δείκτες συμπεριφοράς (όπως η αποτελεσματικότητα του FRP, η διατιθέμενη υπεραντοχή και ο τρόπος αστοχίας) με βάση όμως διαφορετικές παραμέτρους των πειραμάτων απότι οι προηγούμενοι, όπως α) ο λόγος εμβαδού οπλισμού προς το απαιτούμενο εμβαδόν για ταυτόχρονη αστοχία FRP και διαρροή του οπλισμού (ο λόγος ισορροπίας), β) ο λόγος διατμητικής αντοχής προς ικανοτική διάτμηση αστοχίας και γ) ο λόγος της ακαμψίας των FRP ως προς την ακαμψία του οπλισμού.

Οι Li, Diagana και Del Mas (2001) διενήργησαν δεκατέσσερα πειράματα σε δοκούς ορθογωνικής διατομής υπό μονοτονική φόρτιση στα τρίτα του

ανοίγματος. Αν και το διατμητικό μήκος της δοκού παρέμεινε σταθερό και ίσο προς 2,90, τα πειράματα διερεύνθησαν την εναλλακτική εφαρμογή των εγκάρσιων ΙΝΟΠ από άνθρακα (χρησιμοποιήθηκαν ΙΝΟΠ σε διαξονική πλέξη, κατά 45° και 135° ως προς τον άξονα της δοκού), για τη διατμητική ενίσχυση, με διαφορετικό κάθε φορά μήκος αγκύρωσης και μήκος εφαρμογής στο δοκίμιο. Αποτέλεσμα της πειραματικής εργασίας τους ήταν μια πρόταση για τον υπολογισμό της διατμητικής αντοχής, καθώς επίσης και η παρατήρηση και από μέρους τους, ότι η αθροιστική εφαρμογή της εξίσωσης σχεδιασμού για τη συνολική αντοχή (άθροισμα συνεισφορών από ΙΝΟΠ, χάλυβα και σκυρόδεμα), δεν ισχύει. Επί πλέον, σημειώνουν ότι η σωστή εφαρμογή της ρητίνης είναι καθοριστικής σημασίας στην τελική αντοχή.

Οι Alagusundaramoorthy, Harik και Choo (2003) έλεγξαν πειραματικά δεκατέσσερεις αμφιέριστες ορθογωνικές δοκούς με διατμητικό μήκος 5.40, σε ανακυλιζόμενη, αρχικά και κατόπιν, μονοτονική φόρτιση, ως την αστοχία. Με χρήση αγκυρωμένων CFRP επετεύχθησαν λόγοι υπεραντοχής ως και 160%, ενώ οι αναλυτικές προβλέψεις με τη χρήση επιπεδότητας διατομών και του διαγράμματος τάσεων κατά Whitney απέδωσαν υψηλότερες προβλέψεις της μέγιστης αντοχής αλλά σχετικά καλή πρόβλεψη της αντίστοιχης παραμόρφωσης των δοκιμών.

Οι Brena, Wood και Kreger (Nov, Dec 2003) παρουσιάζουν πειραματικά αποτελέσματα τεσσάρων πλακοδοκών, σε φυσική κλίμακα, της μορφής που χρησιμοποιούνται στη γεφυροποιία, ενισχυμένων με διαμήκη και εγκάρσια ΙΝΟΠ άνθρακα στην κάτω παρειά, υπό στατική φόρτιση. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η αποκόλληση των διαμήκων υφασμάτων έλαβε χώρα σε ανηγμένη παραμόρφωση της τάξεως του 0.8% έως 1.1%, με αποτέλεσμα οι αντίστοιχες τιμές σχεδιασμού να είναι, κατα την εκτίμησή τους, συντηρητικές.

Οι Deniaud και Cheng (2003) έλεγξαν οκτώ πλακοδοκούς με διατμητικό άνοιγμα ίσο προς 3.0, σε καθαρή μονοτονική κάμψη. Σαν παράμετροι του πειράματος θεωρήθηκαν το ποσοστό του εγκάρσιου χαλύβδινου οπλισμού καθώς και τα διαφορετικά είδη και γωνία εφαρμογής, ως προς τον διαμήκη

άξονα, των ΙΝΟΠ (μονοαξονική κατά  $0^\circ$  και  $45^\circ$  καθώς και σε τρεις διευθύνσεις,  $0^\circ/60^\circ/120^\circ$  προς τη διαμήκη). Με τη βοήθεια εκτενούς και προσεκτικής ενοργάνωσης παρατηρήθηκε ότι η λογική της επιπεδότητας των διατομών μέσα στο διατμητικό μήκος δεν επαληθεύεται, ούτε καν σε μικρά επίπεδα φόρτισης, λόγω των θλιπτικών τροχιών εν είδη συμπεριφοράς αψίδας που δημιουργούνται. Επί πλέον, αποδείχθηκε, πάλι, η φθίνουσα συνεισφορά των υφασμάτων σε ενίσχυση, με αυξανόμενα ποσοστά FRP. Συμπερασματικά, οι ερευνητές προτείνουν ένα προσομοίωμα για τον υπολογισμό της ελάχιστης διατμητικής συνεισφοράς των FRP (για εξωτερικούς συνδετήρες από FRP αγκυρωμένους στις παρειές), που λαμβάνει υπόψη τα χαρακτηριστικά των υλικών, το ποσοστό του εγκάρσιου σιδηροπλισμού και το μήκος αγκύρωσης των FRP, για δεδομένη (υπολογιζόμενη) διεύθυνση της βασικής διατμητικής ρωγμής, που δημιουργείται μέσα στο διατμητικό μήκος, συναρτήσει των παραπάνω παραμέτρων.

Οι Grace, Abdel Sayed και Ragheb (2002) ανέπτυξαν και έλεγξαν πειραματικά ένα νέο ύφασμα ΙΝΟΠ με μονοαξονική πλέξη, που έχει σχετικά χαμηλή παραμόρφωση διαρροής ίση προς 0.35%, συγκρίσιμη περίπου με αυτή του συμβατικού χάλυβα. Το ΙΝΟΠ εφαρμόσθηκε σε οκτώ αμφιέριστες δοκούς, κυρίως σε ενίσχυση σε κάμψη, που ελέγχθηκαν έως την αστοχία σε καθαρή κάμψη έχοντας ένα διατμητικό μήκος  $a/d$  ίσο προς 3.60. Ο σχεδιασμός των δοκών έγινε ώστε να επέλθει ταυτόχρονη διαρροή τόσο του χάλυβα όσο και του FRP κατά την αστοχία. Οι δοκοί έφτασαν σε υψηλότερο φορτίο αστοχίας σε σχέση με αντίστοιχες δοκούς που ενισχύθηκαν με συμβατικά CFRP του εμπορίου, που παραμένουν ελαστικά ως την αστοχία τους. Επί πλέον, απέδωσαν παρόμοια πλαστιμότητα με τα συμβατικά δοκίμια, που ήταν όμως μικρότερη από αυτή των μη ενισχυμένων δοκιμίων ελέγχου.

Οι ίδιοι ερευνητές (Grace, Abdel Sayed και Ragheb, 2003) αναπτύσσουν περαιτέρω το ΙΝΟΠ με τις παραπάνω μηχανικές ιδιότητες, αλλά σε τρίκλωνη πλέξη, σε διαμήκη διεύθυνση και υπό γωνίες  $45^\circ$  και  $135^\circ$  ως προς τη διαμήκη. Κατόπιν, παρουσίασαν τα αποτελέσματα των πειραμάτων σε δώδεκα

αμφιέριστες δοκούς ορθογωνικής διατομής με διατμητικό μήκος περίπου 3.50, σε μονοτονική φόρτιση υπό καθαρή κάμψη. Τα δοκίμια ενισχύθηκαν με το νέο τριαξονικό ύφασμα INOΠ υάλου (GFRP) χαμηλής αντοχής σε διαρροή, τοποθετημένο στη διαμήκη εφελκυστική περιοχή και/η στις παριές, για ενίσχυση σε κάμψη και διάτμηση. Οι ενισχυμένες δοκοί ελέγχθηκαν σε σύγκριση με όμοιες, συμβατικές δοκούς, ενισχυμένες με χρήση χαλύβδινων ελασμάτων ή εφελκυσμένου CFRP. Τα δοκίμια με το νέο ύφασμα απέδωσαν πλάσιμη συμπεριφορά, αστοχώντας είτε σε λυγισμό σε θλίψη του υφάσματος είτε λόγω αποκόλλησης στις διαμήκεις παριές, σε όλο το μήκος της δοκού.

Τέλος, σε ότι αφορά την πρόσφυση των INOΠ σε μορφή ράβδων οπλισμού, οι De Lorenzis και Nanni (2001, 2002) διερεύνησαν πειραματικά τα χαρακτηριστικά πρόσφυσης και αγκύρωσης ράβδων από FRP τοποθετημένων στην επικάλυψη της διατομής. Οι ράβδοι είχαν διαφορετικά μήκη αγκύρωσης και επιφανειακή τράχυνση, ενώ έγινε παραμετρική διερεύνηση του μήκους αγκύρωσης καθώς και του σχήματος και των διαστάσεων του καναλιού τοποθέτησης. Καθορίστηκαν τα χαρακτηριστικά της αστοχίας σε κάθε περίπτωση (ρηγμάτωση του σκυροδέματος, εξόλκευση της ράβδου, εφελκυσμός ή συνδυασμοί αυτών). Η μελέτη έδειξε ότι η καλύτερη αγκύρωση επετεύχθη με τη χρήση νευρώσεων αντί για αμμοβολή στην επιφάνεια και αυξημένη επικάλυψη σε ένα βέλτιστο βάθος 25mm.

Από την έρευνα της βιβλιογραφίας καθίσταται φανερό ότι υπάρχει ένα έλλειμμα εμπειρίας και αξιόπιστων καταστατικών προσομοιωμάτων για τον υπολογισμό και την πρόβλεψη αστοχίας δοκών από ΟΣ, ενισχυμένων με INOΠ. Η παρούσα Ερευνητική Εργασία και το αντικείμενο που πραγματεύεται, αποτελεί ουσιαστική συνεισφορά στην πλέον αξιόπιστη χρήση των υλικών αυτών, στο βαθμό που αυτά έχουν εφαρμογή για την επέκταση της χρήσης και της διάρκειας λειτουργίας υφιστάμενων φορέων.

## 2.2 Δημοσίευση των αποτελεσμάτων του Ερευνητικού Προγράμματος

Η περιγραφή του σχεδιασμού, της κατασκευής των δοκιμίων και της διάταξης, και τα πειραματικά αποτελέσματα των δοκών, που περιγράφονται

στον Δεύτερο Τόμο, αναπτύσσονται στην Πτυχιακή εργασία των Ι. Αναστασάκη και Ι. Κυριακίδη (2003), Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ, που εκπονήθηκε υπό την επίβλεψη του Επιστημονικού Υπευθύνου στο Εργαστήριο Οπλισμένου Σκυροδέματος (Εργ. ΟΣ) ΕΜΠ. Πρόσθετες αριθμητικές επιλύσεις της απόκρισης των δοκιμών με πεπερασμένα στοιχεία κύβου, περιγράφονται στην Πτυχιακή εργασία του Γ. Τσόλκα (2005), Πολιτικού Μηχανικού ΕΜΠ, την οποία εκπόνησε υπό την επίβλεψη του Επιστημονικού Υπευθύνου. Τα πειραματικά αποτελέσματα του πρώτου μέρους του Προγράμματος (πειράματα σε υποστυλώματα) και η κατασκευή των δοκών έχουν ήδη παρουσιασθεί στις Πρώτες δύο Εκθέσεις Προόδου (Ζέρης, 2001, 2003) και στον Πρώτο Τόμο του Ερευνητικού που συνυποβάλλεται.

Επί πλέον, τα αποτελέσματα των πειραμάτων εναλλακτικών τρόπων ενίσχυσης δοκών με χαμηλό λόγο διατμητικού μήκους του παρόντος και τα πειράματα ενίσχυσης με ΙΝΟΠ υφισταμένων υποστυλωμάτων από ΟΣ του Πρώτου Τόμου έχουν υποβληθεί ή υποβάλλονται, αντίστοιχα, προς δημοσίευση στα έγκριτα περιοδικά Structures Journal του American Concrete Institute και ASCE Journal of Composites in Construction (Zeris, προς δημοσίευση), ενώ ανακοινώσεις των παραπάνω πρόκειται να ανακοινωθούν και στα επόμενα Ελληνικά Συνέδρια Συνθέτων Υλικών ή Σκυροδέματος.

#### **ΔΗΛΩΣΗ:**

Ευχαριστούμε από τη θέση αυτή τον Οργανισμό Αντισεισμικού Σχεδιασμού και Προστασίας (ΟΑΣΠ) για την αμέριστη συμπαράστασή τους στη χρηματοδότηση. Τα συμπεράσματα, οι θέσεις και τα αποτελέσματα της παρούσης είναι ευθύνη του Επιστημονικού Υπευθύνου και δεν εκφέρουν απαραίτητα τη θέση του ΟΑΣΠ.