

## ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΩΝ ΜΕ ΜΙΚΡΑ ΜΗΚΗ ΜΑΤΙΣΗΣ. ΕΜΦΑΣΗ ΣΤΑ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ.

ΑΝΤΩΝΕΛΛΗΣ ΓΡΗΓΟΡΙΟΣ

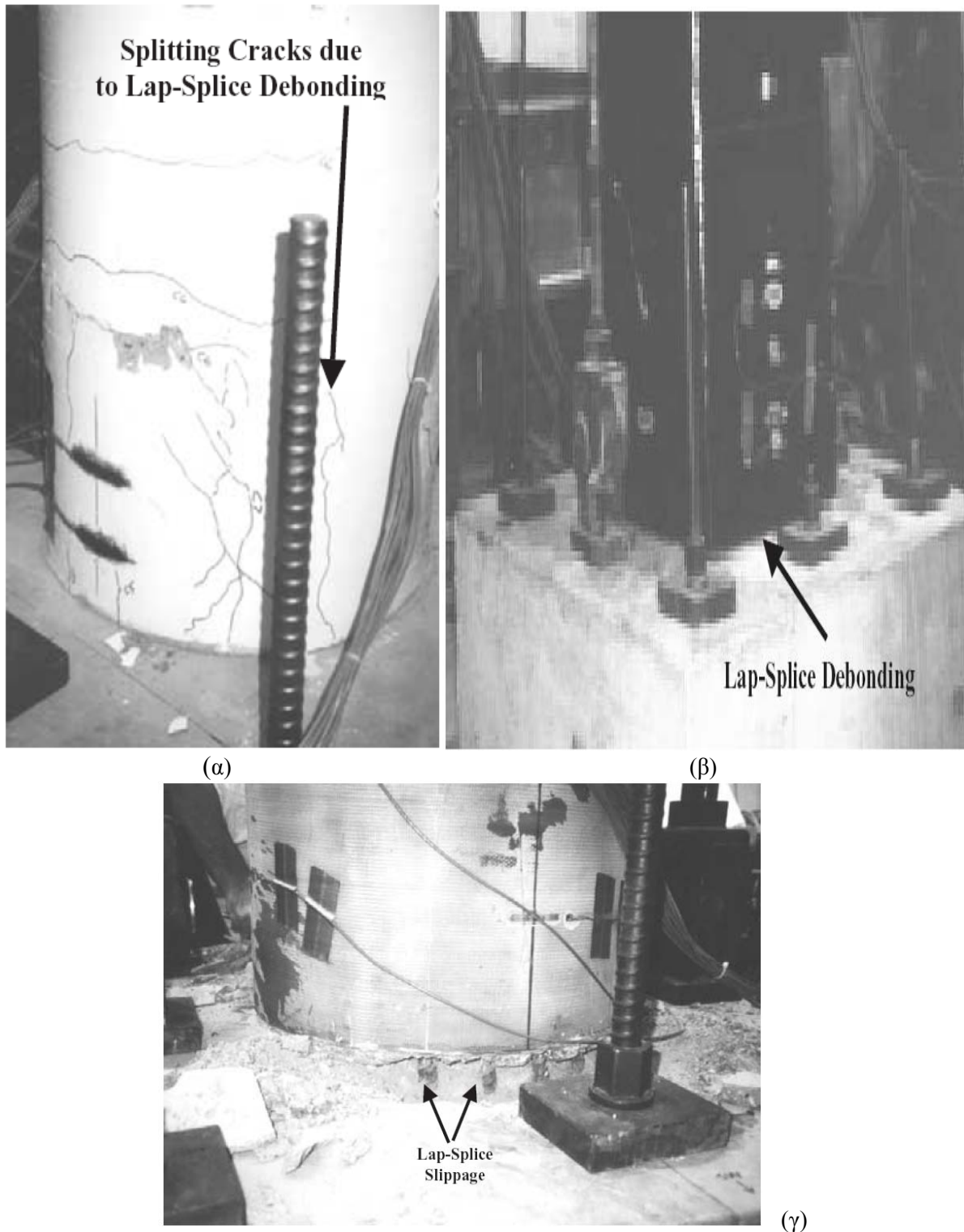
### Περίληψη

*Τα σημαντικότερα προβλήματα των υφιστάμενων κατασκευών εντοπίζονται στις κατασκευαστικές λεπτομέρειες όπλισης των διαφόρων μελών και, κυρίως, στην απουσία εγκάρσιων οπλισμών και επαρκούς περίσφιγξης. Η παρούσα εργασία αναφέρεται στο πρόβλημα της ύπαρξης ανεπαρκών μήκων μάτισης σε υφιστάμενα κτίρια αλλά και γέφυρες. Για τον λόγο αυτό γίνεται μία αναφορά σε διάφορες μεθόδους αντιμετώπισης του προβλήματος αυτού, με έμφαση στην τοποθέτηση μανδύων FRP, ενώ εν συνεχεία παρουσιάζεται ένας αναλυτικός τρόπος μοντελοποίησης της περιοχής μάτισης των διαμήκων ράβδων οπλισμού. Η διαδικασία αυτή έχει ως αποτέλεσμα τον σχεδιασμό και την διαστασιολόγηση του απαιτούμενου πάχους μανδύα FRP για την επίτευξη της απαιτούμενης πλαστιμότητας και την αποφυγή της πρόωρης αστοχίας λόγω ολίσθησης του διαμήκους οπλισμού.*

### 1. ΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ

Είναι γνωστό ότι με τους σύγχρονους αντισεισμικούς κανονισμούς οι νέες κατασκευές σχεδιάζονται ούτως ώστε να έχουν επαρκή πλαστιμότητα, γεγονός το οποίο επιτυγχάνεται κυρίως με την αύξηση του εγκάρσιου οπλισμού, και γενικότερα δίνοντας έμφαση και προσοχή στις κατασκευαστικές λεπτομέρειες, ειδικά στις ακραίες κρίσιμες περιοχές των δοκών και των υποστυλωμάτων. Επιπλέον είναι σύνηθες η περιοχή μάτισης των διαμήκων ράβδων των υποστυλωμάτων να συμπίπτει με τις κρίσιμες περιοχές τους. Σύμφωνα με τους ισχύοντες κανονισμούς, ο εγκάρσιος οπλισμός στις κρίσιμες περιοχές είναι πλέον πολλαπλάσιος σε σχέση με αυτόν σε κτίρια σχεδιασμένα με παλαιότερους κανονισμούς, ενώ σε περιπτώσεις ματίσεων τοποθετείται σε αποστάσεις το πολύ  $4\Phi_L$ , όπου  $\Phi_L$  το μέγεθος της ράβδου που ματίζεται [1]. Έτσι γίνεται φανερό το μέγεθος του προβλήματος αν λάβουμε υπόψη μας το γεγονός ότι πολλά κτίρια στον Ελλαδικό χώρο έχουν εγκάρσιο οπλισμό  $\Phi 8/300$ , ο οποίος σπανίως έχει αγκυρωθεί σωστά, ενώ επίσης η όποια διάβρωση υπάρχει επιβαρύνει πρώτα και κύρια τα εξωτερικά στρώματα οπλισμών, δηλαδή τους συνδετήρες. Αντίστοιχα προβλήματα υπάρχουν και στο εξωτερικό, όπου για παράδειγμα στα βάθρα γεφυρών ήταν σύνηθες το μήκος μάτισης να είναι μόλις  $20\Phi$ , ενώ οι αποστάσεις των εγκάρσιων οπλισμών ήταν 12in. (περίπου 30cm) [2].

Αξίζει επίσης να σημειωθεί ότι η αστοχία λόγω ολίσθησης των ράβδων είναι ψαθυρή, ενώ οι παράγοντες που επηρεάζουν την αντοχή της μάτισης είναι η επικάλυψη σκυροδέματος, η διάμετρος της ράβδου, το μήκος μάτισης, η θλιπτική αντοχή σκυροδέματος, η γεωμετρία των ραβδώσεων και η περίσφιγξη του σκυροδέματος [3]. Κατά την αστοχία παρατηρούνται ρωγμές παράλληλα στις ράβδους (Σχήμα 1α), ενώ πολλές φορές είναι εμφανής η ολίσθηση στην βάση του υποστυλώματος (Σχήμα 1β και γ).



Σχήμα 1. Αστοχίες υποστυλωμάτων λόγω ολίσθησης των ράβδων που ματίζονται [2].

## 2. ΤΡΟΠΟΙ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗΣ-ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το πρόβλημα της μη ύπαρξης επαρκούς μήκους υπερκάλυψης εντοπίζεται σε πολλά κοινά οικοδομικά έργα και γέφυρες, ενώ πολύ κοινό στην Ελλάδα είναι και το πρόβλημα των κοντών αναμονών. Τα τελευταία χρόνια έχουν προταθεί αρκετοί τρόποι αντιμετώπισης οι οποίοι έχουν να κάνουν είτε με ηλεκτροσυγγόληση ή μηχανική εμπλοκή των ράβδων (περίπτωση κοντών αναμονών) είτε με επιβολή περίσφιξης μέσω μανδύα σκυροδέματος, μεταλλικών ελασμάτων ή μανδύα FRP [4]. Η παρούσα εργασία ασχολείται με την τοποθέτηση μανδύα FRP καθώς, παρόλο το πλούσιο ερευνητικό έργο που υπάρχει στην βιβλιογραφία, κανένας κανονισμός δεν έχει ακόμα υιοθετήσει σαφείς οδηγίες για την χρήση των FRP σε ενισχύσεις κατασκευών έναντι σεισμού [3].

Έτσι, αρχικά, αναφέρονται κάποιες σχέσεις διαστασιολόγησης των μανδύων FRP, οι οποίες έχουν προταθεί από διάφορους ερευνητές την τελευταία 20ετία. Οι σχέσεις αυτές είναι σχετικά εύκολες στην χρήση τους, και ενδείκνυνται για τους μηχανικούς της πράξης, στον σχεδιασμό ενισχύσεων για κοινά οικοδομικά έργα.

Εν συνεχεία, παρουσιάζεται μία πιο πολύπλοκη και σε βάθος ανάλυση της περιοχής μάτισης-κρίσιμης περιοχής υποστρωμάτων. Ως αποτέλεσμα αυτής, ο μηχανικός είναι σε θέση να καταλάβει και να αποτυπώσει καλύτερα την συμπεριφορά ενός στοιχείου το οποίο έχει ενισχυθεί με FRP για το μη επαρκές μήκος υπερκάλυψης. Επίσης, με την μέθοδο αυτή, γίνονται φανερά τα επιπλέον οφέλη από την παρουσία του μανδύα, όπως η αύξηση της πλαστιμότητας, της αντοχής κτλ. Αυτό είναι αρκετά πρακτικό καθώς σπανίως κάποιος μηχανικός θα κληθεί να ενισχύσει ένα μέλος ως προς μία μόνο παράμετρο. Επιπλέον, γίνεται μία αναφορά σε διάφορα πειραματικά δεδομένα που καταδεικνύουν τα ευεργετικά οφέλη της ενίσχυσης υποστρωμάτων με μανδύες FRP, και επιβεβαιώνουν την ορθότητα του προτεινόμενου μοντέλου για την περιοχή μάτισης.

Τέλος, για πληρότητα, παρουσιάζονται κάποια θέματα πρακτικής φύσεως ως προς τον σχεδιασμό μανδύων FRP για αύξηση της αντοχής σε κάμψη αλλά και τέμνουσα, καθώς επίσης και κάποιες κατασκευαστικές λεπτομέρειες που χρήζουν προσοχής.

### 3. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ-ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΑΝΔΥΩΝ FRP

Ακολουθούν ορισμένοι τύποι διαστασιολόγησης του μανδύα FRP, προς αποφυγήν αστοχίας του μέλους λόγω ολίσθησης των ράβδων που ματίζονται στην κρίσιμη περιοχή.

#### 3.1 PRIESTLEY AND SEIBLE [5], [3]

Το 1995 οι Priestley and Seible et al πρότειναν τον ακόλουθο τύπο για τον σχεδιασμό FRP μανδύα σε κυκλικά υποστρώματα ώστε να διασφαλίζεται επαρκής περίσφιξη στην περιοχή της μάτισης (μονάδες SI).

$$n_f * t_f = 500D * (f_l - f_h) / E_f \quad (1)$$

όπου  $n_f$  και  $t_f$  είναι ο αριθμός των στρώσεων και το πάχος κάθε στρώσης υφάσματος FRP αντίστοιχα,  $D$  είναι η διάμετρος της κυκλικής διατομής,  $E_f$  είναι το μέτρο ελαστικότητας του FRP,  $f_h$  η επιπλέον οριζόντια πίεση λόγω του υπάρχοντος εγκάρσιου οπλισμού για παραμόρφωση 0,1%, και  $f_l$  είναι η πλευρική δύναμη περίσφιξης που προσφέρει ο μανδύας FRP στο μήκος μάτισης  $L_s$  και η οποία υπολογίζεται ως:

$$f_l = A_b * f_y / \{ [(p/2n_{st}) + 2(d_b + c)] * L_s \} \quad (2)$$

όπου  $p$  είναι η περίμετρος της γραμμής στο επίπεδο της διατομής που διέρχεται από τα κέντρα των ράβδων που ματίζονται,  $n_{st}$  είναι ο συνολικός αριθμός των ράβδων που ματίζονται,  $A_b$  είναι το εμβαδόν της μιας ράβδου που ματίζεται,  $f_y$  το όριο διαρροής,  $c$  η επικάλυψη σκυροδέματος των κύριων ράβδων που ματίζονται και οι οποίες έχουν διάμετρο  $d_b$ .

Έτσι τελικά, αν επιθυμούμε οι ράβδοι που ματίζονται να παραλάβουν τάση  $f_s$  (γενικά  $\leq f_y$ ), αν θέσουμε  $A_b = \pi d_b^2 / 4$  και αν αγνοήσουμε την ευεργετική δράση του υπάρχοντος εγκάρσιου οπλισμού ( $f_h = 0$ ) τότε καταλήγουμε στον εξής τύπο:

$$n_f * t_f = 200D * f_s / \{ E_f * (L_s / d_b) * [p / (4n_{st} * d_b) + c / d_b + 1.0] \} \quad (3)$$

Η παραπάνω εξίσωση ισχύει και για ορθογωνικά υποστυλώματα, εφόσον τοποθετείται ελλειπτικός μανδύας (και πρόσθετα προκατασκευασμένα τμήματα σκυροδέματος) χρησιμοποιώντας την ισοδύναμη διάμετρο της έλλειψης στην θέση της διαμέτρου του κυκλικού υποστυλώματος. Για τις περιπτώσεις όπου δεν τοποθετείται ελλειπτικός μανδύας, τότε για υποστυλώματα με λόγο πλευρών  $\leq 1.5$  και για διαστάσεις 0,75m / 0,5m οι Seible et al. προτείνουν την τοποθέτηση μανδύα διπλάσιου πάχους από αυτόν που υπολογίζεται από τον ανωτέρω τύπο, με την χρησιμοποίηση φυσικά της ισοδύναμης διαμέτρου για το ορθογωνικό υποστυλώμα [5].

### 3.2 HAWKINS [3]

Το 2000 οι Hawkins et al παρουσίασαν μία διαφορετική προσέγγιση στον προσδιορισμό του απαιτούμενου πάχους μανδύα FRP για ενίσχυση κυκλικών υποστυλωμάτων (μονάδες SI). Πιο συγκεκριμένα πρότειναν ότι

$$n_f * t_f = D * f_{ci} / (2E_f * \epsilon_d) \quad (4)$$

όπου

$$f_{ci} = v_{cm} * [1 - (1.22 - 1.22v_{ci}/v_{cm})^{1/2}] \quad (5)$$

$$v_{cm} = f_c^{1/2} / [0.31 + 24w / (a + 16)] \quad (6)$$

$$v_{ci} = A_b * f_s / \{ [(\pi D' / n_{st}) - d_{b1} - d_{b2} + c] * L_s \} \quad (7)$$

$$w = D' * \epsilon_d / 2 \leq 0.75 \text{ mm} \quad (8)$$

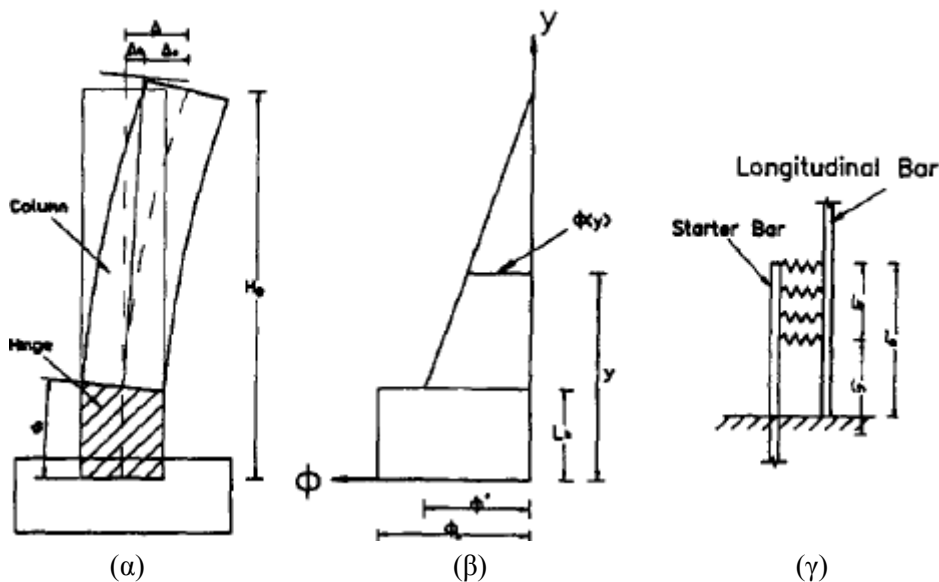
Στα ανωτέρω,  $D$  είναι η διάμετρος του κυκλικού υποστυλώματος,  $f_{ci}$  η πλευρική τάση που ασκεί ο μανδύας (όχι μικρότερη από 0.24 MPa),  $\epsilon_d$  ισούται με την μικρότερη τιμή μεταξύ του 1/3 της παραμόρφωσης αστοχίας του FRP και του 0.003,  $v_{cm}$  και  $v_{ci}$  είναι αντίστοιχα η μέγιστη διατμητική τάση που μπορεί να αναπτυχθεί μεταξύ των ράβδων και του σκυροδέματος, και η διατμητική τάση που πρέπει να αναπτυχθεί ούτως ώστε οι ράβδοι να αναπτύξουν ολόκληρη την τάση αντοχής τους σε εφελκυσμό,  $w$  είναι το εύρος της ρωγμής,  $a$  το μέγεθος του μέγιστου αδρανούς στο σκυρόδεμα,  $A_b$  το εμβαδόν της αρχικής ράβδου,  $D'$  η

διάμετρος του κύκλου που διέρχεται από τα κέντρα βάρη των ράβδων οπλισμού,  $d_{b1}$  και  $d_{b2}$  είναι οι διάμετροι των αρχικών και τελικών ράβδων οπλισμού αντίστοιχα, και  $c$  η επικάλυψη σκυροδέματος των αρχικών ράβδων.

Γίνεται φανερό ότι ο ανωτέρω τύπος χρησιμοποιεί περισσότερες παραμέτρους, αλλά ταυτοχρόνως γίνεται και πιο δύσχρηστος.

#### 4. ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΑΤΙΣΗΣ [6]

Το 1997 οι Xiao et al. πρότειναν την παρακάτω διαδικασία η οποία ουσιαστικά βασίζεται σε μία ανάλυση ροπής-καμπυλότητας, λαμβάνοντας όμως υπ' όψη την ολίσθηση των ράβδων που ματίζονται. Επίσης, θεωρείται μία πλαστική άρθρωση στην βάση του υποστυλώματος, ενώ το υπόλοιπο άνω τμήμα θεωρείται ελαστικό (Σχήμα 2α). Μέσα στο ύψος της πλαστικής άρθρωσης η καμπυλότητα θεωρείται σταθερή και μία γραμμική σχέση θεωρείται έξω από αυτήν (Σχήμα 2β). Τέλος, πάνω από την πλαστική άρθρωση θεωρούνται οι σύνδεσμοι μεταφοράς των δυνάμεων για όλες τις ματίσεις (Σχήμα 2γ)



Σχήμα 2. Μοντέλο Προσομοίωσης: (α) Υποστυλώμα, (β) Καμπυλότητα, (γ) Σύνδεσμοι [6].

Για τον υπολογισμό του ύψους της πλαστικής άρθρωσης χρησιμοποιείται η ημιεμπειρική σχέση που πρότειναν οι Priestley and Seible (1991):

$$L_h = 0.08h + 0.022d_{lb} * f_s \quad \text{για μη ενισχυμένα υποστυλώματα} \quad (9)$$

$$L_h = g + 0.044d_{lb} * f_s \quad \text{για ενισχυμένα υποστυλώματα} \quad (10)$$

όπου  $L_h$  το ύψος της πλαστικής άρθρωσης ως συνάρτηση της εφελκυστικής τάσης  $f_s$  των ακραίων ράβδων οπλισμού,  $h$  το ύψος του υποστυλώματος και  $d_{lb}$  η διάμετρος μιας τυπικής ράβδου που ματίζεται.

Για τον καταστατικό νόμο του περισφιγμένου σκυροδέματος χρησιμοποιείται το μοντέλο του Manders (1988). Σύμφωνα με αυτό υπολογίζεται μία ενεργός πλευρική τάση  $f_i$  που προκαλείται από τον μανδύα FRP ως εξής:

$$f_i = 2t_j * E_j * \varepsilon_j / (D_j - 2t_j) \quad (11)$$

όπου  $D_j$  και  $t_j$  η διάμετρος και το ενεργό πάχος του μανδύα,  $E_j$  το μέτρο ελαστικότητας του FRP στην εφαπτομενική διεύθυνση και  $\varepsilon_j$  η ενεργός παραμόρφωση του μανδύα που μπορεί να θεωρηθεί ίση με 0.001.

Για τους συνδέσμους θεωρείται ότι αυτοί φέρουν ίση τάση και κατανέμονται σε ένα μήκος  $L_b$  διαφορετικό από το  $L_s$  (μήκος υπερκάλυψης) και ίσο με:

$$L_b = L_s - 0.022d_{lb} * f_s \quad (12)$$

όπου  $f_s$  η τάση της διαμήκου ράβδου. Η μείωση αυτή θεωρείται ούτως ώστε να ληφθεί υπ' όψη η μη γραμμική κατανομή των τάσεων στους συνδέσμους κατά μήκος του μήκους  $L_s$ .

Επιπλέον χρησιμοποιείται ο καταστατικός νόμος  $\tau_b$  - ολίσθηση  $S_b$  (σχέση τάσης στους συνδέσμους - ολίσθηση) που βασίζεται σε μία σχέση του Popovics (1973) :

$$\tau_b = \tau'_b * r * (S_b/S_{bc}) / [r-1+(S_b/S_{bc})^r] \quad (13)$$

όπου

$$\tau'_{bc} = \tau'_{bo} + 1.4f_i \quad (14)$$

$$\tau'_{bo} = 20(f'_c)^{1/2} / d_{lb} \quad (15)$$

όπου  $\tau'_{bc}$  είναι η μέγιστη τάση στους συνδέσμους (δηλαδή η μέγιστη τάση μεταξύ της ράβδου και του περισφιγμένου σκυροδέματος),  $S_{bc}$  η ολίσθηση του σύνδεσμου που αντιστοιχεί στην τάση  $\tau'_{bc}$ ,  $\tau'_{bo}$  η τάση στους σύνδεσμους σε απερίσφικτο σκυρόδεμα,  $1.4f_i$  εκφράζει την αύξηση λόγω της περισφιγξης ( $f_i$  από τύπο 11), ενώ οι παράμετροι  $S_{bc}$  και  $r$  υπολογίστηκαν με περαιτέρω δοκιμές εξόλκευσης για διάφορους τύπους περισφιγξης από τους Giuriani et al. (1991) ως εξής:

$$S_{bc} = S_{bo} (1 + a * f_i / f'_c), \quad S_{bo} = 0.25 \text{ mm και } a = 75.0 \quad (16)$$

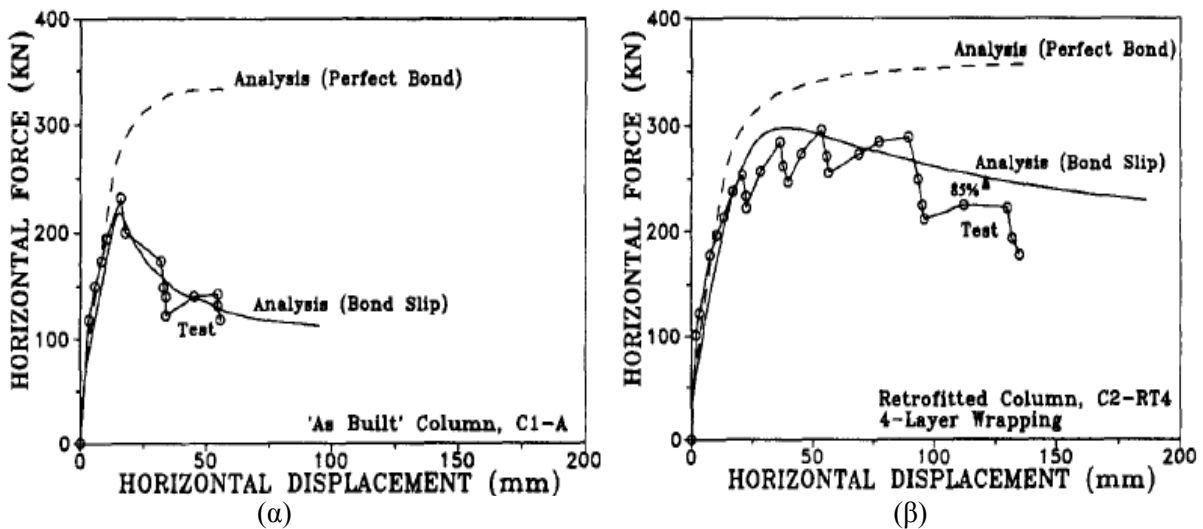
$$r = r_0 - k_r * f_i / f'_c \leq 1, \quad r_0 = 2.0 \text{ και } k_r = 13.0 \quad (17)$$

Ο υπολογισμός περιλαμβάνει δοκιμές λάθους στην διαδικασία εύρεσης του ύψους της θλιβόμενης ζώνης και της ολίσθησης κάθε ράβδου ξεχωριστά στην κρίσιμη περιοχή, για κάθε σταδιακή αύξηση της μετακίνησης κορυφής. Η εξίσωση ισορροπίας μεταξύ των συνδέσμων και της δύναμης εφελκυσμού χρησιμοποιείται ως κριτήριο για την εύρεση της ολίσθησης των ράβδων που ματίζονται. Η εξίσωση αυτή είναι [2]:

$$\pi * d_{bl} * \tau_b * L_b = (\pi * d_{bl}^2 / 4) * f_s \quad \text{και } \acute{\alpha}\rho\alpha$$

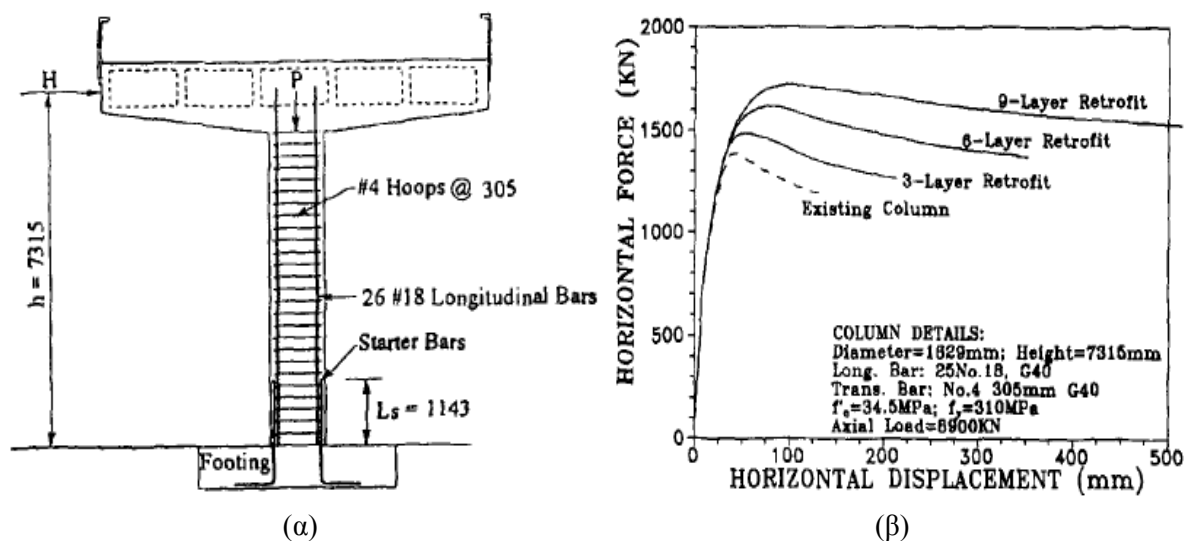
$$4\tau_b * L_b = d_{bl} * f_s \quad (18)$$

Τέλος, η εξίσωση ισορροπίας μεταξύ των εσωτερικών δυνάμεων και του επιβαλλόμενου αξονικού φορτίου χρησιμοποιείται ως επαλήθευση-διόρθωση της θέσεως του ουδέτερου άξονα που είχε υποτεθεί. Έτσι κατασκευάζεται το διάγραμμα ροπής καμπυλότητας της διατομής και εν συνεχεία με μία Pushover ανάλυση το διάγραμμα τέμνουσα βάσης-μετακίνηση κορυφής για κάθε εξεταζόμενο υποστύλωμα. Η σύγκριση του παραπάνω μοντέλου με πειραματικά δεδομένα φαίνεται στο Σχήμα 3α,β.



Σχήμα 3. Αναλυτικά αποτελέσματα: (α) Μη ενισχυμένο Υποστύλωμα, (β) Ενισχυμένο Υποστύλωμα

Η παραπάνω μεθοδολογία εφαρμόζεται στο παρακάτω πρόβλημα σχεδιασμού του μανδύα FRP σε ένα δοσμένο κυκλικό βάρθο γέφυρας (Σχήμα 4α). Η διαδικασία σχεδιασμού περιλαμβάνει την θεώρηση ενός ορισμένου αριθμού στρώσεων FRP και εν συνεχεία τον υπολογισμό του διαγράμματος Οριζόντια δύναμη-μετακίνηση κορυφής. Με τον τρόπο αυτό ο μηχανικός υπολογίζει τον δείκτη πλαστιμότητας που επιτυγχάνεται με τις παραπάνω στρώσεις FRP και εάν αυτός δεν τον ικανοποιεί δοκιμάζει εκ νέου με περισσότερες στρώσεις κ.ο.κ. Τα αποτελέσματα αυτής της διαδικασίας για το συγκεκριμένο παράδειγμα φαίνονται στο Σχήμα 4β.



Σχήμα 4. Παράδειγμα Σχεδιασμού: (α) Βάθρο Γέφυρας, (β) Υπολογισμένες αποκρίσεις [6].

Έτσι, εάν ο δείκτης πλαστιμότητας οριστεί ως ο λόγος της μετακίνησης για φορτίο 85% του μέγιστου προς την μετακίνηση στο μέγιστο φορτίο, τότε για 3 στρώσεις FRP η πλαστιμότητα είναι περίπου 5, για 6 στρώσεις περίπου 6.5 και για 9 στρώσεις περίπου 8.5.

## 5. ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΓΙΑ ΤΟΝ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΚΑΙ ΤΗΝ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΜΑΝΔΥΩΝ FRP. [5]

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, η τοποθέτηση μανδύων FRP σκοπεύει ταυτόχρονα και σε άλλες βελτιώσεις του ενισχυόμενου μέλους, όπως στην μετατροπή της αστοχίας από διατμητική, και άρα ψαθυρή, σε καμπτική, και άρα πλαστική, στην αύξηση της πλαστιμότητας των κρίσιμων περιοχών κτλ. Για όλες αυτές τις επιμέρους ενισχύσεις υπάρχει πληθώρα δημοσιεύσεων όπου μπορεί κανείς σχετικά εύκολα να υπολογίσει το πάχος του FRP που απαιτείται. Το ζήτημα όμως που προκύπτει είναι σε ποιο τμήμα του μέλους απαιτείται να τοποθετηθεί το υπολογισμένο πάχος και το τι συμβαίνει σε τμήματα όπου έχουμε υπολογίσει δύο διαφορετικά πάχη FRP (για δύο διαφορετικές ενισχύσεις-επεμβάσεις). Την απάντηση στο πρόβλημα αυτό μπορούμε να την βρούμε στην εργασία των Seible and Priestley όπου πολύ αναλυτικά αναφέρονται το απαιτούμενο πάχος FRP και το μήκος στο οποίο πρέπει να τοποθετηθεί για τις εξής τρεις περιπτώσεις:

### 1) Ενίσχυση για αποφυγή διατμητικής αστοχίας

Απαιτούμενο πάχος:  $t_j^v \sim (E_j D)^{-1}$  σε μήκος  $L_v$

### 2) Αύξηση πλαστιμότητας της κρίσιμης περιοχής

Απαιτούμενο πάχος:  $t_j^c \sim D * (f_{ju} * \epsilon_{ju})^{-1}$  σε μήκος  $L_{c1}$  και πάχος  $t_j^c / 2$  σε μήκος  $L_{c2}$

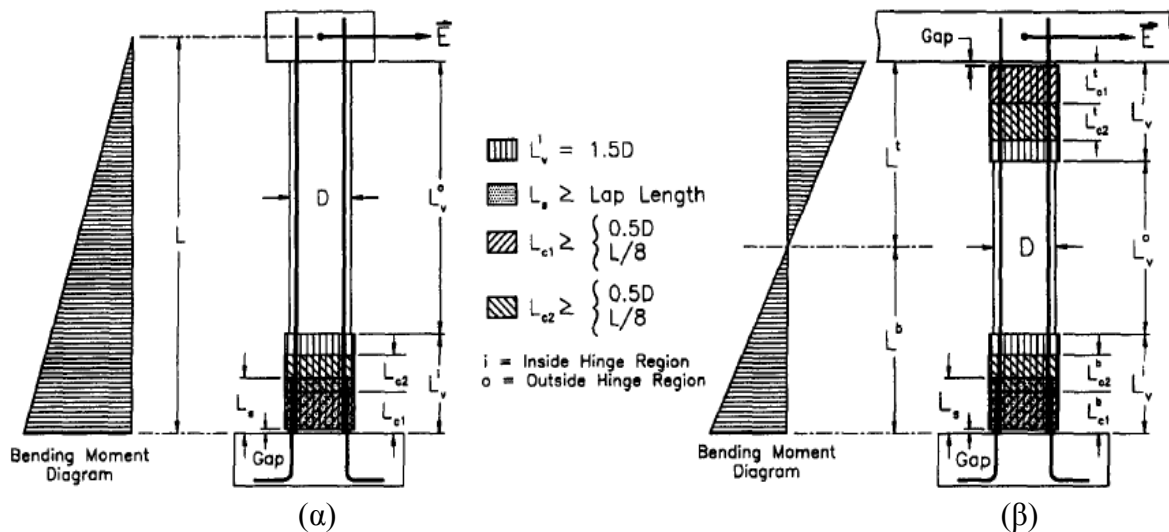
### 3) Περίσφιξη της περιοχής μάτισης

Απαιτούμενο πάχος:  $t_j^s \sim D * (E_j)^{-1}$  σε μήκος  $L_s$

Στους ανωτέρω τύπους το σύμβολο  $\sim$  δηλώνει αναλογία, ενώ  $D$  είναι η διάμετρος των κυκλικών υποστυλωμάτων,  $E_j$  το μέτρο ελαστικότητας του μανδύα FRP,  $f_{ju}$  η τάση αστοχίας



(θραύσης) του FRP και  $\epsilon_{ju}$  η παραμόρφωση αστοχίας του FRP. Στο Σχήμα 5 φαίνονται οι ορισμοί για τα μήκη  $L_v$ ,  $L_{c1}$ ,  $L_{c2}$  και  $L_s$ . Έτσι, αν υπολογίσουμε τα τρία διαφορετικά απαιτούμενα πάχη μανδύα FRP για μια ολοκληρωμένη ενίσχυση ενός υποστλώματος, και τα μήκη στα οποία αυτά πρέπει να τοποθετηθούν, τότε πολύ εύκολα για κάθε περιοχή τοποθετούμε το μεγαλύτερο πάχος μανδύα από αυτά που αντιστοιχούν στο συγκεκριμένο τμήμα.



Σχήμα 5. Περιοχές ενίσχυσης υποστλώματος με μανδύα FRP [5].

Στο Σχήμα 6 παρουσιάζεται μία ενδιαφέρουσα συγκριτική παρουσίαση του απαιτούμενου συνολικού πάχους μανδύα, τριών διαφορετικών υποθετικών «συστημάτων» Α, Β και C για την ενίσχυση του ίδιου υποστλώματος, για τις τρεις προαναφερθείσες περιπτώσεις. Τα μηχανικά τους χαρακτηριστικά φαίνονται στο ίδιο σχήμα, ενώ πρέπει να σημειωθεί ότι οι τιμές των υπολογισμένων  $t_j$  είναι κανονικοποιημένες ως προς το υπολογισμένο πάχος για το «σύστημα Α». Παρατηρούμε ότι για την περίπτωση 1 και 3, ευνοούνται τα υλικά με μεγάλο μέτρο ελαστικότητας (π.χ. τα σύνθετα FRP κτλ.), ενώ για την περίπτωση 2 μπορούν εξίσου ικανοποιητικά να χρησιμοποιηθούν και υλικά με πολύ μικρότερο μέτρο ελαστικότητας, αλλά με αρκετά μεγάλη παραμόρφωση αστοχίας (όπως π.χ. ο συμβατικός χάλυβας).

Τέλος, πρέπει να αναφέρουμε ότι κατά την τοποθέτηση του μανδύα πρέπει να υπάρχει ένα κενό ( $g$ ) της τάξεως των 25-50mm, μεταξύ της βάσης του υποστλώματος ή της δοκού κορυφής και του μανδύα FRP ούτως ώστε να επιτρέπεται η ελεύθερη στροφή της δημιουργούμενης πλαστικής άρθρωσης, χωρίς να προστίθεται επιπλέον δύναμη ή δυσκαμψία από την αξονική δράση του μανδύα.

System (1)	Mechanical characteristics (2)	Normalized Jacket Thickness		
		Shear strength (3)	Plastic hinge confinement (4)	Lap splice clamping (5)
System A	$E_j = 124 \text{ GPa}$ $f_{ju} = 1,300 \text{ MPa}$ $\epsilon_{ju} = 1\%$	1	1	1
System B	$E_j = 41 \text{ GPa}$ $f_{ju} = 690 \text{ MPa}$ $\epsilon_{ju} = 1.5\%$	3.0	1.3	3.0
System C	$E_j = 21 \text{ GPa}$ $f_{ju} = 552 \text{ MPa}$ $\epsilon_{ju} = 3\%$	6.0	0.8	6.0
Design relations		$t_j^v \sim \frac{1}{E_j D} C_v$	$t_j \sim \frac{D}{f_{ju} \epsilon_{ju}} C_c$	$t_j^l \sim \frac{D}{E_j} C_s$

Note: 1 MPa = 0.145 ksi; 1 GPa = 145 ksi.

Σχήμα 6. Σύγκριση υπολογιζόμενου πάχους υποθετικών μανδύων [5].

## 6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Φαρδής Μ. “ΜΑΘΗΜΑΤΑ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΜΕΡΟΣ ΙΙ”, Εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών, Πάτρα 2007.
- [2] Haroun M., Elsanadedy H. “Numerical Models for Composite-jacketed Reinforced Concrete Bridge Columns”, Journal of Reinforced Plastics and Composites, Vol 22, No. 13/2003, pp.1203-1219.
- [3] Harajli M., “Bond strengthening of lap spliced reinforcement using external FRP jackets: An effective technique for seismic retrofit of rectangular or circular RC columns”, Construction and Building Materials, Vol 23 (2009), pp.1265-1278.
- [4] Δρίτσος Σ., “ΕΝΙΣΧΥΣΕΙΣ / ΕΠΙΣΚΕΥΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΑΠΟ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ”, Εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών, Πάτρα 2007.
- [5] Seible F., Priestley M.J.N., Hegemier G.A., Innamorato D. “Seismic Retrofit of RC Columns with Continuous Carbon Fiber Jackets”, Journal of Composites for Construction, May 1997, pp.52-62.
- [6] Xiao Y., Ma R. “Seismic Retrofit of RC Circular Columns Using Prefabricated Composite Jacketing”, Journal of Structural Engineering, Vol. 123, No. 10, October 1997, pp.1357-1364.