

# Αναλυτικές προσεγγιστικές σχέσεις για τη διαστασιολόγηση δοκών ενισχυμένων με νέες στρώσεις σκυροδέματος

Ο.Θ. Τσιούλου

Πολιτικός Μηχανικός, MSc

Σ.Η. Δρίτσος

Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών

dritsos@upatras.gr

*Λέξεις κλειδιά:* διεπιφάνεια, διατμητική τάση, οπλισμός ενίσχυσης, δοκός οπλισμένου σκυροδέματος

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ:** Η παρούσα εργασία ασχολείται με την καμπτική ενίσχυση δοκών με προσθήκη νέων στρώσεων σκυροδέματος στο εφελκόμενο ή στο θλιβόμενο πέλμα. Στα πλαίσια της εργασίας αυτής γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από προσεγγιστικές σχέσεις που έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία για τον υπολογισμό της διατμητικής τάσης στη διεπιφάνεια της ενισχυμένης δοκού (CEB Bul.162 1983, E.M.Π. 1987, Δρίτσος 2005), καθώς και του οπλισμού της στρώσης ενίσχυσης (σχέδιο 2 ΚΑΝ.ΕΠΕ. 2005), με τα αντίστοιχα αποτελέσματα που δίνουν ακριβείς αναλυτικές επιλύσεις που λαμβάνουν υπ' όψιν τους την ολίσθηση στις διεπιφάνειες.

## 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στόχος της παρούσας εργασίας είναι η σύγκριση απλοποιητικών προσεγγιστικών σχέσεων που έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία (CEB Bul.162 1983, E.M.Π. 1987, Δρίτσος 2005) για τον υπολογισμό της διατμητικής τάσης στη διεπιφάνεια δοκών οπλισμένου σκυροδέματος ενισχυμένων με νέες στρώσεις σκυροδέματος, καθώς και για τον υπολογισμό του απαιτούμενου οπλισμού ενίσχυσης, με τα αποτελέσματα που προκύπτουν από ακριβείς αναλυτικές επιλύσεις που λαμβάνουν υπ' όψιν τους την ολίσθηση στις διεπιφάνειες. Τα σχετικά αναλυτικά προσομοιώματα έχουν παρουσιαστεί σε παλαιότερες εργασίες ( Kotsira et al. 1993, Dritsos 1994, Dritsos et al. 1995) και οι υπολογισμοί εκτελούνται με χρήση ενός εξειδικευμένου λογισμικού (πρόγραμμα ACESCL) που δημιουργήθηκε σε γλώσσα προγραμματισμού FORTRAN στο παρελθόν (Lampropoulos et al. 2004). Για την πραγματοποίηση αυτών των ελέγχων χρησιμοποιήθηκαν τέσσερις ομάδες δοκιμίων (Α, Β, Γ, Δ) για την περίπτωση της ενίσχυσης στο εφελκόμενο πέλμα και πέντε ομάδες δοκιμίων (Ε, Στ, Ζ, Η, Κ) για την περίπτωση της ενίσχυσης στο θλιβόμενο πέλμα. Τα δοκίμια αυτά είναι αμφιέριστες δοκοί οπλισμένου σκυροδέματος κατηγορίας C16/20, με άνοιγμα 5m. Η διατομή τους είναι ορθογωνική με πλάτος 250mm και ύψος 400mm και είναι οπλισμένες με 4Φ12 S500. Κάθε μια δοκός ενισχύεται στο εφελκόμενο ή στο θλιβόμενο πέλμα με προσθήκη νέας στρώσης οπλισμένου σκυροδέματος πάχους  $t$ , κατηγορίας σκυροδέματος C16/20 και ποιότητας γάλυβα S500.

## 2 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

Η ενίσχυση δοκών με νέες στρώσεις σκυροδέματος, έχει αποτελέσει κατά το παρελθόν αντικείμενο αρκετών ερευνητικών προσπαθειών.

Πειραματικά αποτελέσματα που αφορούν στην ενίσχυση δοκών οπλισμένου σκυροδέματος με νέες στρώσεις σκυροδέματος έχουν βρεθεί στη Διδακτορική Διατριβή του Βασιλείου (1975), στη

Διπλωματική εργασία των Ζερβού και Μπελδέκα (1995) και στις δημοσιευμένες εργασίες των Trikha et al. (1991) και Altun (2004).

Από τις εργασίες αυτές, η Διδακτορική Διατριβή του Βασιλείου (1975) ασχολείται με την πειραματική μελέτη στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος επισκευασμένων ή ενισχυμένων σε κάμψη ή διάτμηση, με χρήση στρώσεων και μανδύων σκυροδέματος. Στη συγκεκριμένη εργασία η αντοχή και η παραμορφωσιμότητα κάθε ενισχυμένου ή επισκευασμένου στοιχείου, συγκρίνεται με τα αντίστοιχα μεγέθη του αντίστοιχου μονολιθικού στοιχείου. Σχετικά με την καμπτική ενίσχυση δοκών οπλισμένου σκυροδέματος με στρώση οπλισμένου σκυροδέματος, τα αποτελέσματα που προέκυψαν ήταν ότι με την ενίσχυση παρατηρήθηκε αύξηση της αντοχής των δοκών.

Οι Ζερβός και Μπελδέκας (1995), ασχολήθηκαν με την πειραματική μελέτη αμφίεριστων δοκών οπλισμένου σκυροδέματος, φορτισμένες κεντρικά, που έχουν ενισχυθεί με προσθήκη νέας στρώσης σκυροδέματος στο εφελκόμενο ή θλιβόμενο πέλμα. Στόχος της εργασίας αυτής ήταν η μελέτη της επιρροής του υλικού ενίσχυσης καθώς και του τρόπου σύνδεσης των στρώσεων ενίσχυσης με το αρχικό δοκίμιο, στο βαθμό απόδοσης της μεθόδου. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν ήταν ότι παρατηρήθηκε αύξηση της αντοχής της δοκού μετά από την ενίσχυση, για κάθε τρόπο ενίσχυσης. Επίσης γίνεται και σύγκριση των αποτελεσμάτων των ενισχυμένων δοκιμίων με τα αποτελέσματα των αντίστοιχων μονολιθικών δίνοντας συντελεστές μονολιθικότητας.

Η πειραματική εργασία των Trikha et al. (1991), αναφέρεται στην ενίσχυση δοκών οπλισμένου σκυροδέματος με προσθήκη νέας στρώσης σκυροδέματος είτε στο ένα πέλμα μόνο, εφελκόμενο ή θλιβόμενο, είτε στις δύο πλευρές της δοκού αυξάνοντας το πλάτος της, είτε στις τρεις πλευρές της δοκού. Τα πειράματα έδωσαν καμπύλες φορτίου – βέλους κάμψης για κάθε δοκίμιο και παρατηρήθηκε ότι υπήρξε αύξηση της αντοχής του αρχικού δοκιμίου για κάθε τρόπο ενίσχυσης, με μεγαλύτερη αυτή για την τρίπλευρη ενίσχυση.

Τέλος, η πειραματική εργασία του Altun (2004) αναφέρεται στην ενίσχυση δοκών οπλισμένου σκυροδέματος με χρήση μανδύων οπλισμένου σκυροδέματος και μελετά τα αποτελέσματα που είχε η μέθοδος αυτή ενίσχυσης στην αντοχή του μέλους. Στα πλαίσια αυτής της εργασίας γίνεται επίσης και μια σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων για το ενισχυμένο μέλος με τα αντίστοιχα θεωρητικά κάνοντας την υπόθεση τέλει σύνδεσης μεταξύ παλιού και νέου σκυροδέματος.

Κατά τη σύνδεση δύο επιμέρους ανεξάρτητων μελών προκύπτει ένα σύνθετο μέλος το οποίο μπορεί να συμπεριφερθεί ως εξής: Είτε ως μονολιθικό που είναι και ο στόχος της ενίσχυσης, είτε να μην υπάρξει καμία αλληλεπίδραση ανάμεσα στα δύο συνδεόμενα μέλη και καθένα από αυτά να λειτουργεί ανεξάρτητα, είτε να υπάρξει μερική αλληλεπίδραση των δύο συνδεόμενων μελών.

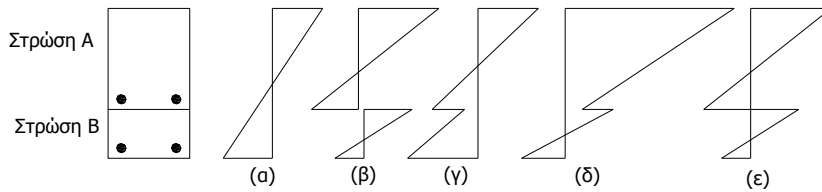
Στην περίπτωση που υπάρχει πλήρης αλληλεπίδραση μεταξύ των επιμέρους μελών (σχήμα 1.α), που είναι και ο στόχος κάθε ενίσχυσης, ικανοποιείται το συμβιβαστό των παραμορφώσεων και δεν παρατηρείται καμία ασυνέχεια παραμορφώσεων στο επίπεδο της διεπιφάνειας.

Στην περίπτωση πλήρους αποσύνδεσης των επιμέρους μελών (σχήμα 1.β), οι παραμορφώσεις στη διεπιφάνεια είναι εντελώς ανεξάρτητες μεταξύ τους.

Τέλος στην περίπτωση της μερικής αλληλεπίδρασης των επιμέρους μελών (σχήμα 1.γ,δ,ε), οι παραμορφώσεις στο επίπεδο της διεπιφάνειας παρουσιάζουν μία ασυνέχεια.

Στην πράξη, λόγω της ρηγμάτωσης του σκυροδέματος και της ελαστικότητας του συνδετικού μέσου στη διεπιφάνεια, η ολίσθηση μεταξύ των δύο μελών δεν μπορεί να αποφευχθεί εντελώς. Έτσι η περίπτωση της μερικής αλληλεπίδρασης είναι η πιο συνηθισμένη.

Στην περίπτωση αυτή τρεις είναι οι πιθανές κατανομές των παραμορφώσεων καθ' ύψος της διατομής της ενισχυμένης δοκού. Στην πρώτη, η θλιβόμενη ζώνη περιλαμβάνει τμήμα από το ανώτερο μέλος μόνο (σχήμα 1.γ), στη δεύτερη περίπτωση η θλιβόμενη ζώνη περιλαμβάνει όλο το ανώτερο και τμήμα του κατώτερου μέλους (σχήμα 1.δ) και η τρίτη περίπτωση είναι η θλιβόμενη ζώνη να περιλαμβάνει τμήματα και από τα δύο συνδεόμενα μέλη (σχήμα 1.ε).



Σχήμα 1. Κατανομή παραμορφώσεων καθ' ύψος της ενισχυμένης διατομής για α) πλήρη αλληλεπίδραση, β) πλήρη αποσύνδεση και γ,δ,ε) μερική αλληλεπίδραση

Στη βιβλιογραφία έχουν βρεθεί αρκετές εργασίες που ασχολούνται με το θέμα της μερικής αλληλεπίδρασης των συνδεόμενων μελών (Saidi et al. 1990, Kotsira et al. 1993, Dritsos 1994, Dritsos et al. 1995, Dritsos 1996a, Δρίτσος κ.α. 1996, Nie & Cai 2003, Nie et al. 2004). Όλες αυτές οι εργασίες ασχολούνται με την καμπτική ενίσχυση δοκών οπλισμένου σκυροδέματος με προσθήκη νέων στρώσεων σκυροδέματος. Υιοθετώντας ένα προσομοίωμα μεταφοράς της διατμητικής τάσης στη διεπιφάνεια της ενισχυμένης δοκού και θεωρώντας τις εξισώσεις ισορροπίας στη διεπιφάνεια καθώς και στο συνολικό “σύνθετο” στοιχείο, εξάγονται αναλυτικές σχέσεις από τις οποίες προσδιορίζονται οι παραμορφώσεις του χάλυβα και του σκυροδέματος καθ' ύψος της διατομής του ενισχυμένου μέλους.

Από τα παραπάνω είναι φανερό ότι η συμπεριφορά του ενισχυμένου στοιχείου επηρεάζεται σημαντικά από τις συνθήκες σύνδεσης. Διάφορα προσομοιώματα μεταφοράς της διατμητικής τάσης στη διεπιφάνεια του ενισχυμένου μέλους έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία: Από την E. Βιντζηλαίου (Βιντζηλαίου 1984), τον Θ. Τάσιο (Τάσιος 2003) καθώς και από το σχέδιο 2 του ΚΑΝ.ΕΠΕ (2005) προτείνονται διαγράμματα, και σχέσεις, που συνδέουν τη διατμητική τάση με την ολίσθηση ανάλογα με τον τρόπο σύνδεσης των συνδεόμενων μελών. Κάποιες άλλες εργασίες προτείνουν σχέσεις που συνδέουν τη διατμητική τάση με την παραμόρφωση ολίσθησης στη διεπιφάνεια της ενισχυμένης δοκού (Saidi et al., 1990 Kotsira et al. 1993, Dritsos 1994, Dritsos & Pilakoutas 1996). Σ' αυτές τις εργασίες με δεδομένη τη σχέση που δίνει τη διατμητική τάση στη διεπιφάνεια της ενισχυμένης δοκού, υπολογίζεται η δύναμη στη διεπιφάνεια της δοκού και με χρήση των εξισώσεων ισορροπίας υπολογίζεται η παραμορφωσιακή κατάσταση της ενισχυμένης δοκού. Επίσης υπάρχουν ανάλογες εργασίες που αναφέρονται σε σύνθετα μέλη τα οποία είναι κατασκευασμένα από οπλισμένο σκυροδέμα και κάποιο άλλο υλικό όπως χάλυβας (Nie & Cai 2003, Nie et al. 2004) ή ξύλο (Frangi & Fontana 2003). Στις εργασίες των Nie και Cai (Nie & Cai 2003, Nie et al. 2004), όπου μελετάται η συμπεριφορά σύνθετων δοκών που αποτελούνται από χάλυβα και μια στρώση σκυροδέματος, προτείνεται μια γραμμική σχέση μεταξύ της διατμητικής τάσης και της ολίσθησης στη διεπιφάνεια του ενισχυμένου μέλους και με βάση την ισορροπία δυνάμεων στη δοκό γίνεται μια πρόβλεψη της κατανομής της ολίσθησης στη διεπιφάνεια των σύνθετων δοκών. Με ανάλογο τρόπο οι Frangi και Fontana (Frangi & Fontana 2003), εξήγαγαν εξισώσεις που δίνουν τις ορθές τάσεις και τη διατμητική τάση σε μια δοκό σκυροδέματος ενισχυμένη με ξύλινη στρώση με χρήση βλήτρων για την εξασφάλιση σύνδεσης στη διεπιφάνεια.

Πολλές από τις παραπάνω προτάσεις, λόγω της πολυπλοκότητας των υπολογισμών που απαιτούνται έχουν προγραμματιστεί σε ηλεκτρονικό υπολογιστή (Saidi et al. 1990, Kotsira et al. 1993). Σε μια προηγούμενη δημοσίευση (Lampropoulos et al. 2004), ο προγραμματισμός μιας αναλυτικής διαδικασίας που ελάμβανε υπ' όψιν της την ολίσθηση της διεπιφάνειας καθώς και τις προαναφερθείσες πιθανές εικόνες κατανομής των παραμορφώσεων καθ' ύψος της “σύνθετης” διατομής (Kotsira et al. 1993, Dritsos 1994, Dritsos et al. 1995, Dritsos 1996a ), κατέληξε στη δημιουργία του προγράμματος ACESCL (Analysis Concrete Element Strengthened by Concrete Layers). Στο παραπάνω αναλυτικό εργαλείο η προσομοίωση της συμπεριφοράς της διεπιφάνειας εκφράζεται από μία γραμμική σχέση μεταξύ της μέσης τιμής της διατμητικής τάσης ( $\tau$ ) στην περιοχή που ορίζεται από την διατομή μέγιστης ροπής μέχρι την στήριξη και της παραμόρφωσης ολίσθησης ( $\epsilon_L$ ) στη μεσαία διατομή με την μορφή  $\tau = k \cdot \epsilon_L$ . Το πρόγραμμα αυτό δίνει τη δυνατότητα υπολογισμού των παραμορφώσεων του σκυροδέματος και του χάλυβα καθ' ύψος της μεσαίας διατομής της ενισχυμένης δοκού, του φορτίου αστοχίας, καθώς και της μέσης τιμής της διατμητικής τάσης. Τα αποτελέσματα του ACESCL θα χρησιμοποιηθούν στη συνέχεια για τον

έλεγχο αξιοπιστίας σχετικών προσεγγιστικών σχέσεων που έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία, για τον υπολογισμό της διατμητικής τάσης και του απαιτούμενου οπλισμού ενίσχυσης.

### 3 ΕΛΕΓΧΟΣ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΤΙΚΩΝ ΣΧΕΣΕΩΝ ΓΙΑ ΤΗ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗ ΤΑΣΗ

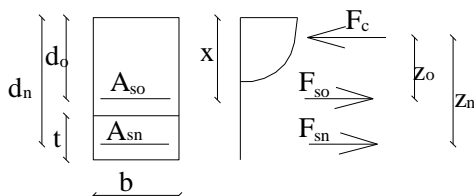
Κατά την ενίσχυση δοκών με νέες στρώσεις σκυροδέματος, όπως είναι γνωστό δημιουργείται μια διεπιφάνεια μεταξύ παλιού και νέου σκυροδέματος. Η σύνδεση της διεπιφάνειας αυτής μπορεί να ελεγχθεί με διάφορες απλοποιητικές σχέσεις που προτείνονται στη βιβλιογραφία (CEB Bul.162 1983, E.M.P. 1987, Δρίτσος 2005). Οι σχέσεις αυτές υπολογίζουν τη διατμητική τάση στη διεπιφάνεια θεωρώντας τη διατομή μονολιθική και τα αποτελέσματα που δίνουν συγκρίνονται με τα αντίστοιχα αποτελέσματα του αναλυτικού προσομοιώματος.

#### 3.1 Ενίσχυση στο εφελκόμενο πέλμα

Από τη βιβλιογραφία (CEB Bul.162 1983, E.M.P. 1987, Πενέλης 1990, Δρίτσος 2005) για την περίπτωση δοκών ενισχυμένων στο εφελκόμενο πέλμα, η διατμητική τάση σε μια τυχαία διατομή  $i$ , μπορεί να εκτιμηθεί από την ακόλουθη θεωρητική εξίσωση.

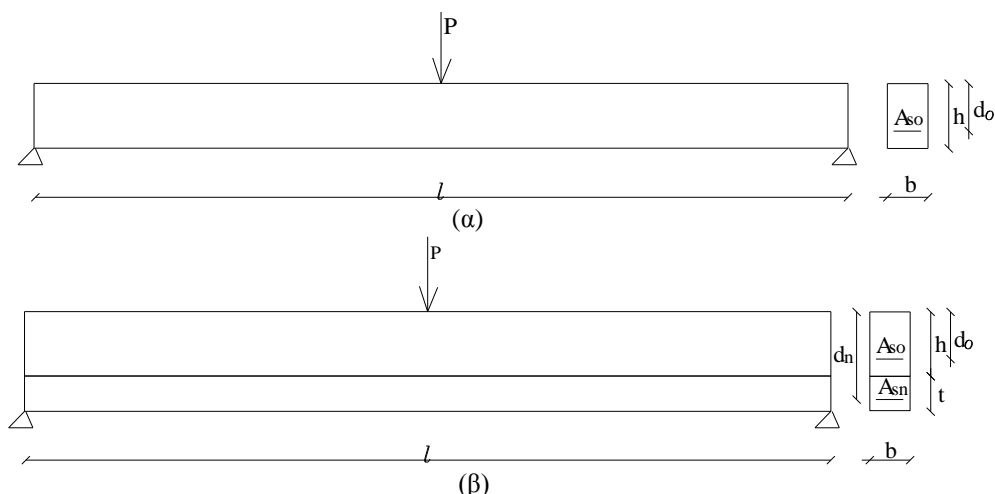
$$\tau_i^{\text{διεπ}} = \frac{V_{sd,i}}{b * z_n * \left( 1 + \frac{A_{so}}{A_{sn}} \cdot \frac{d_o - x}{d_n - x} \cdot \frac{z_o}{z_n} \right)} \quad (1)$$

όπου  $V_{sd,i}$ : Η τέμνουσα δύναμη μετά την επέμβαση,  $A_{so}$ : Ο υπάρχων εφελκόμενος οπλισμός της αρχικής δοκού,  $A_{sn}$ : Ο πρόσθετος οπλισμός της νέας στρώσης σκυροδέματος,  $b$ : Το πλάτος της διατομής,  $t$ : Το πάχος της στρώσης ενίσχυσης,  $x$ : Το ύψος της θλιβόμενης ζώνης,  $d_o$ ,  $z_o$ : Το στατικό ύψος και ο μοχλοβραχίονας των εσωτερικών δυνάμεων του αρχικού στοιχείου και  $d_n$ ,  $z_n$ : Τα αντίστοιχα για τη στρώση ενίσχυσης (Σχήμα 2).



Σχήμα 2. Διατομή δοκού ενισχυμένης στο εφελκόμενο πέλμα

Για τον έλεγχο της εξίσωσης 1, εξετάστηκε αμφιέριστη δοκός οπλισμένου σκυροδέματος, ορθογωνικής διατομής 250x400mm και ανοίγματος 5m που φορτίζεται κεντρικά με φορτίο P. Η δοκός αυτή ενισχύεται με προσθήκη στο εφελκόμενο πέλμα της, νέας στρώσης οπλισμένου σκυροδέματος πάχους  $t$  και οπλισμού  $A_{sn}$ . Το σκυρόδεμα του αρχικού δοκιμίου και της στρώσης ενίσχυσης είναι κατηγορίας C16/20, ενώ ο χάλυβας οπλισμού, αρχικής δοκού και ενίσχυσης, είναι ποιότητας S500 με κράτνση 5%. Ο οπλισμός της αρχικής δοκού είναι 4Φ12. Η σχηματική απεικόνιση της αρχικής και της ενισχυμένης δοκού και των διατομών τους δίνεται στο σχήμα 3 που ακολουθεί.



Σχήμα 3. (α) Αρχική δοκός, (β) ενισχυμένη δοκός

Η δοκός αυτή ενισχύθηκε με οχτώ διαφορετικούς τρόπους, μεταβάλλοντας το πάχος και τον οπλισμό της στρώσης ενίσχυσης. Τα δοκίμια αυτά χωρίστηκαν σε τέσσερις ομάδες από τις οποίες οι ομάδες Α και Β εξέτασαν την επιρροή του πάχους της στρώσης ενίσχυσης στα αποτελέσματα, ενώ ο οπλισμός ενίσχυσης παρέμενε σταθερός και ίσος με 2Φ14 στην ομάδα Α και 4Φ14 στην ομάδα Β. Οι ομάδες Γ και Δ εξέτασαν την επιρροή του οπλισμού ενίσχυσης ενώ το πάχος της στρώσης ενίσχυσης παρέμενε σταθερό και ίσο με 100mm για την ομάδα Γ και 400mm για την ομάδα Δ..

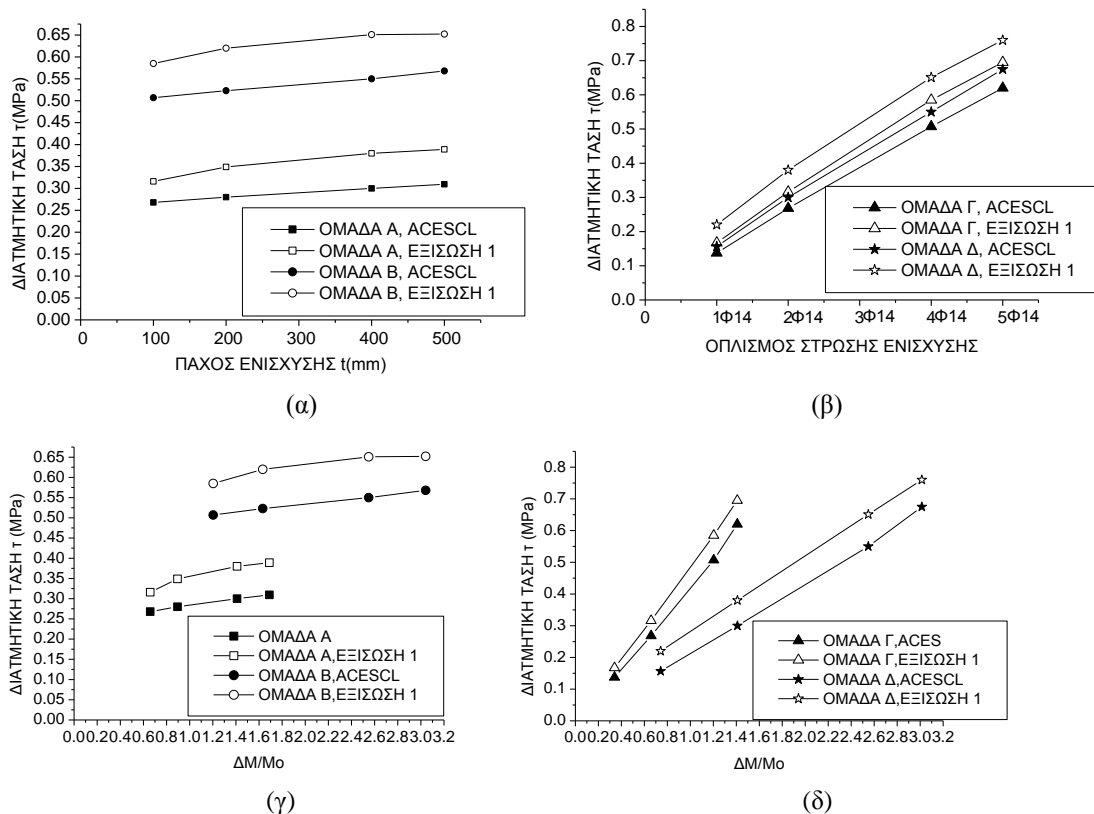
Συγκεντρωτικά τα δοκίμια που εξετάστηκαν δίνονται στον ακόλουθο πίνακα.

Πίνακας 1. Δοκίμια μελέτης για ενίσχυση στο εφελκόμενο πέλμα

Δοκίμιο	Πάχος ενίσχυσης t(mm)	Οπλισμός ενίσχυσης $A_{sn}$ (Αντιστοιχία σε Φ14)
ΟΜΑΔΑ Α		
A1=Γ2	100	2Φ14=307mm <sup>2</sup>
A2	200	2Φ14
A3=Δ2	400	2Φ14
A4	500	2Φ14
ΟΜΑΔΑ Β		
B1=Γ3	100	4Φ14
B2	200	4Φ14
B3=Δ3	400	4Φ14
B4	500	4Φ14
ΟΜΑΔΑ Γ		
Γ1	100	1Φ14
Γ4	100	5Φ14
ΟΜΑΔΑ Δ		
Δ1	400	1Φ14
Δ4	400	5Φ14

Η εξίσωση 1 υπολογίζει τη διατμητική τάση στη διεπιφάνεια, θεωρώντας τη διατομή μονολιθική και στη συνέχεια τα αποτελέσματα αυτά συγκρίνονται με τις τιμές που δίνει το πρόγραμμα ACESCL για ένα συντελεστή δυσκαμψίας της διεπιφάνειας  $K$  αρκετά μεγάλο, έτσι ώστε τα αποτελέσματα να μπορούν να προσεγγίζουν με αρκετά καλή ακρίβεια το μονολιθικό. Στα συγκεκριμένα παραδείγματα οι υπολογισμοί με το πρόγραμμα ACESCL έγιναν με τη θεώρηση ότι  $\tau = 1000 \cdot \varepsilon_L$  (MPa) και ότι η αστοχία συμβαίνει όταν η παραμόρφωση της ακραίας θλιβόμενης ίνας του σκυροδέματος της μεσαίας διατομής γίνει ίση με 0,35%.

Στα επόμενα διαγράμματα φαίνεται η μεταβολή της διατμητικής τάσης με βάση το αναλυτικό μοντέλο (πρόγραμμα ACESCL) και την προσεγγιστική εξίσωση 1, ως συνάρτηση του πάχους ενίσχυσης, του οπλισμού της στρώσης ενίσχυσης και του βαθμού ενίσχυσης της δοκού.



Σχήμα 4. Μεταβολή της διατμητικής τάσης συναρτήσει α) του πάχους ενίσχυσης (δοκίμια Α,Β), β) του οπλισμού ενίσχυσης (Γ,Δ), γ) του βαθμού ενίσχυσης για τα δοκίμια Α και Β και δ) του βαθμού ενίσχυσης για τα δοκίμια Γ και Δ, με βάση το πρόγραμμα ACESCL και την προσεγγιστική εξίσωση 1

Ο όρος βαθμός ενίσχυσης αναφέρεται στο λόγο της μεταβολής της αντοχής του αρχικού δοκιμίου μετά την ενίσχυση, ως προς την αντοχή του πριν την ενίσχυση. Η μεταβολή της ροπής του ενισχυμένου δοκιμίου ως προς τη ροπή του δοκιμίου πριν την ενίσχυση ισούται με  $\Delta M = M_{\text{Μονολιθικό}} - M_o$ , όπου  $M_o$  είναι η ροπή της αρχικής δοκού πριν την ενίσχυση και  $M_{\text{Μονολιθικό}}$  η ροπή του μονολιθικού δοκιμίου.

Από τα διαγράμματα του σχήματος 4 παρατηρείται πως τα δοκίμια Β που έχουν οπλισμό ενίσχυσης διπλάσιο από τα δοκίμια Α, για ίδιο όμως πάχος στρώσης ενίσχυσης, δίνουν σχεδόν διπλάσιες τιμές διατμητικής τάσης και βαθμού ενίσχυσης από τα δοκίμια Α. Επίσης, και για τις δύο ομάδες δοκιμίων, οι τιμές της διατμητικής τάσης που προκύπτουν από την εξίσωση 1 είναι μεγαλύτερες από αυτές που προκύπτουν από το πρόγραμμα ACESCL.

Συγκρίνοντας τις ομάδες δοκιμίων Γ και Δ παρατηρείται ότι ενώ το φάσμα τιμών των διατμητικών τάσεων και για τις δύο ομάδες είναι περίπου το ίδιο, τα δοκίμια Δ δίνουν μεγαλύτερες τιμές του

βαθμού ενίσχυσης. Τέλος, και για τις δύο ομάδες δοκιμίων, οι τιμές της διατμητικής τάσης που προκύπτουν από την προσεγγιστική σχέση (εξίσωση 1) είναι μεγαλύτερες από αυτές που προκύπτουν από το πρόγραμμα ACESCL.

Τα συμπεράσματα αυτά βρίσκονται σε συμφωνία με ανάλογα σχετικά αποτελέσματα που έχουν παρουσιαστεί σε μια παλαιότερη εργασία (Δρίτσος κ.α. 1996).

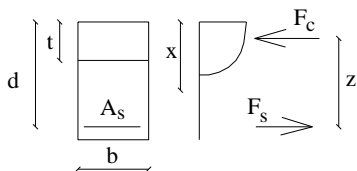
### 3.2 Ενίσχυση στο θλιβόμενο πέλμα

Για την περίπτωση των ενισχυμένων δοκών με νέα στρώση σκυροδέματος στο θλιβόμενο πέλμα, η προσεγγιστικές εξισώσεις που προτείνονται από τη βιβλιογραφία (Ε.Μ.Π. 1987, Πενέλης 1990, Δρίτσος 2005,) για τον υπολογισμό της διατμητικής τάσης σε μια τυχαία διατομή  $i$ , είναι οι εξισώσεις 2α και 2β.

$$\tau_i^{\text{διεπ}} = \frac{V_{sd,i}}{b \cdot z} * \frac{t}{x} * \left( 2 - \frac{t}{x} \right), \quad x \geq t \quad (2\alpha)$$

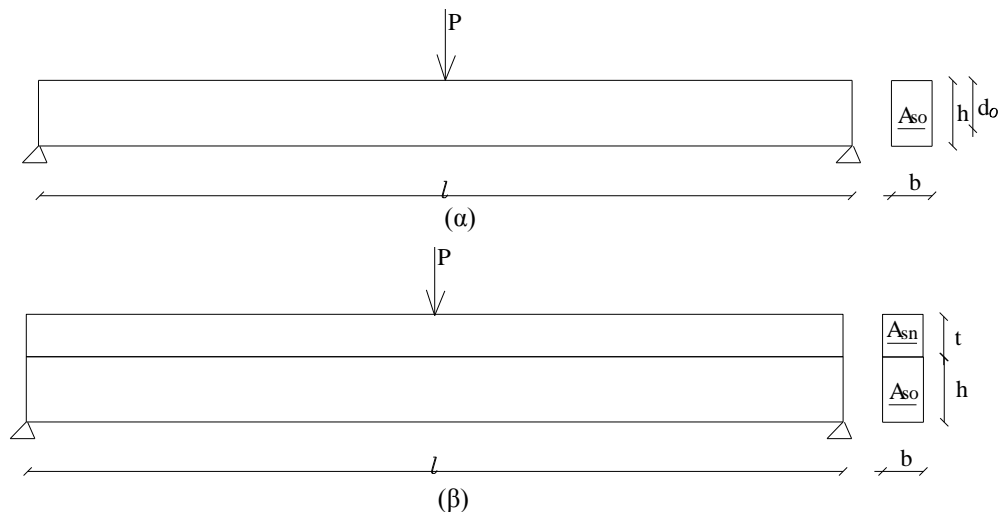
$$\tau_i^{\text{διεπ}} = \frac{V_{sd,i}}{b \cdot z}, \quad x < t \quad (2\beta)$$

όπου  $V_{sd,i}$ ,  $b$ ,  $t$ ,  $x$  και  $z$  ότι έχει αναφερθεί προηγουμένως (παράγραφος 3.1) και σύμφωνα με το σχήμα 5.



Σχήμα 5. Διατομή δοκού ενισχυμένης στο θλιβόμενο πέλμα

Για τη διερεύνηση των σχέσεων 2α και 2β, η δοκός που εξετάζεται είναι η ίδια με την προηγούμενη περίπτωση ενίσχυσης στο εφελκυστικό πέλμα, αλλά τώρα ενισχύεται με προσθήκη νέας στρώσης σκυροδέματος, στο θλιβόμενο πέλμα (Σχήμα 6).



Σχήμα 6. (α) Αρχική δοκός, (β) ενισχυμένη δοκός

Η δοκός αυτή ενισχύθηκε με δεκαέξι διαφορετικούς τρόπους, μεταβάλλοντας το πάχος και τον οπλισμό της στρώσης ενίσχυσης. Τα δοκίμια αυτά χωρίστηκαν σε πέντε ομάδες από τις οποίες οι

ομάδες E, Στ και K εξέτασαν την επιρροή του πάχους της στρώσης ενίσχυσης στα αποτελέσματα, ενώ ο οπλισμός ενίσχυσης παρέμενε σταθερός και ίσος με 2Φ14 στην ομάδα E, 4Φ14 στην ομάδα Στ, ενώ η στρώση ενίσχυσης της ομάδας K ήταν άοπλη. Οι ομάδες Z και H εξέτασαν την επιρροή του οπλισμού ενίσχυσης ενώ το πάχος της στρώσης ενίσχυσης παρέμενε σταθερό και ίσο με 100mm για την ομάδα Z και 400mm για την ομάδα H.

Συγκεντρωτικά τα δοκίμια που εξετάστηκαν δίνονται στον ακόλουθο πίνακα.

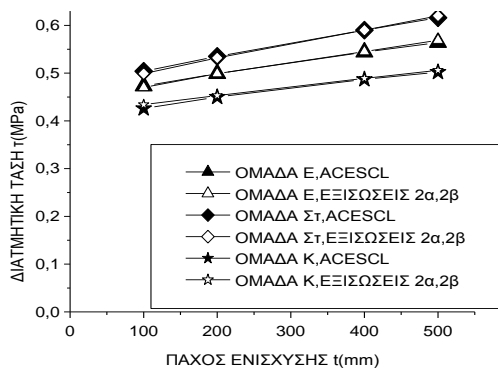
Πίνακας 2. Δοκίμια μελέτης για ενίσχυση στο θλιβόμενο πέγμα

Δοκίμιο	Πάχος ενίσχυσης t (mm)	Οπλισμός ενίσχυσης $A_{sn}$ (Αντιστοιχία σε Φ14)
ΟΜΑΔΑ E		
E1=Z2	100	2Φ14
E2	200	2Φ14
E3=H2	400	2Φ14
E4	500	2Φ14
ΟΜΑΔΑ Στ		
Στ1=Z3	100	4Φ14
Στ2	200	4Φ14
Στ3=H3	400	4Φ14
Στ4	500	4Φ14
ΟΜΑΔΑ Z		
Z1	100	1Φ14
Z4	100	5Φ14
ΟΜΑΔΑ H		
H1	400	1Φ14
H4	400	5Φ14
ΟΜΑΔΑ K		
K1	100	0
K2	200	0
K3	400	0
K4	500	0

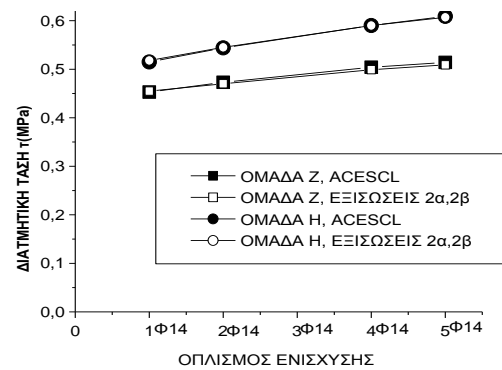
Οι εξισώσεις 2α και 2β υπολογίζουν τη διατμητική τάση στη διεπιφάνεια, θεωρώντας τη διατομή μονολιθική και στη συνέχεια τα αποτελέσματα αυτά συγκρίνονται με τις τιμές που δίνει το πρόγραμμα ACESCL με τη θεώρηση ότι  $\tau = 1000 \cdot \varepsilon_L$  (MPa) και ότι η αστοχία συμβαίνει όταν η παραμόρφωση της ακραίας θλιβόμενης ίνας του σκυροδέματος της μεσαίας διατομής γίνει ίση με 0,35%.

Στα επόμενα διαγράμματα φαίνεται η μεταβολή της διατμητικής τάσης με βάση το αναλυτικό μοντέλο (πρόγραμμα ACESCL) και τις προσεγγιστικές εξισώσεις 2α και 2β, ως συνάρτηση του πάχους ενίσχυσης, του οπλισμού της στρώσης ενίσχυσης και του βαθμού ενίσχυσης της δοκού.

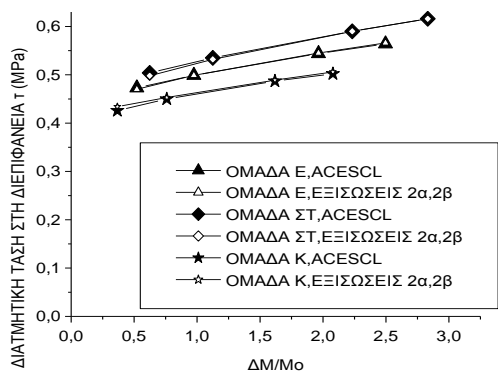




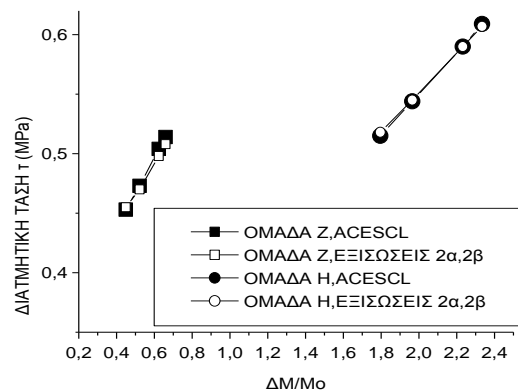
(α)



(β)



(γ)



(δ)

Σχήμα 7. Μεταβολή της διατμητικής τάσης συναρτήσει α) του πάχους ενίσχυσης (δοκίμια Ε, Στ, Κ), β) του οπλισμού ενίσχυσης (Ζ, Η), γ) του βαθμού ενίσχυσης για τα δοκίμια Ε, Στ και Κ και δ) του βαθμού ενίσχυσης για τα δοκίμια Ζ και Η, με βάση το πρόγραμμα ACESCL και τις προσεγγιστικές εξισώσεις 2α και 2β

Όπως ήδη έχει αναφερθεί, ο όρος βαθμός ενίσχυσης αναφέρεται στο λόγο της μεταβολής της αντοχής του αρχικού δοκιμίου μετά την ενίσχυση, ως προς την αντοχή του πριν την ενίσχυση. Η μεταβολή της ροπής του ενισχυμένου δοκιμίου ως προς τη ροπή του δοκιμίου πριν την ενίσχυση ισούται με  $\Delta M = M_{\text{Μονολιθικό}} - M_0$ , όπου  $M_0$  είναι η ροπή της αρχικής δοκού πριν την ενίσχυση και  $M_{\text{Μονολιθικό}}$  η ροπή του μονολιθικού δοκιμίου.

Από τις συγκριτικές καμπύλες του σχήματος 7 για τις ομάδες δοκιμίων Ε, Στ και Κ που μελετούν την επιρροή του πάχους ενίσχυσης, παρατηρείται πως το φάσμα τιμών της διατμητικής τάσης και του βαθμού ενίσχυσης και για τις τρεις ομάδες δοκιμίων είναι περίπου το ίδιο. Και για τις τρεις αυτές ομάδες οι τιμές της διατμητικής τάσης που προκύπτουν από τις θεωρητικές σχέσεις σχεδόν ταυτίζονται με αυτές που προκύπτουν από το πρόγραμμα ACESCL.

Για τις ομάδες δοκιμίων Ζ και Η που μελετούν την επιρροή του οπλισμού ενίσχυσης, παρατηρείται πως τα δοκίμια της ομάδας Η που έχουν πάχος στρώσης ενίσχυσης τετραπλάσιο από την ομάδα Ζ δίνουν μεγαλύτερες τιμές διατμητικών τάσεων στη διεπιφάνεια. Επίσης, οι τιμές του βαθμού ενίσχυσης των δοκιμίων της ομάδας Η είναι σχεδόν τριπλάσιες από τις αντίστοιχες τιμές των δοκιμίων της ομάδας Ζ. Επίσης, και για τις δύο ομάδες δοκιμίων, οι τιμές της διατμητικής τάσης που προκύπτουν από τις θεωρητικές σχέσεις είναι πολύ κοντά με αυτές που προκύπτουν από το αναλυτικό πρόγραμμα.

Τα συμπεράσματα αυτά βρίσκονται σε συμφωνία με ανάλογα σχετικά αποτελέσματα που έχουν παρουσιαστεί σε μια παλαιότερη εργασία (Δρίτσος κ.α. 1996).

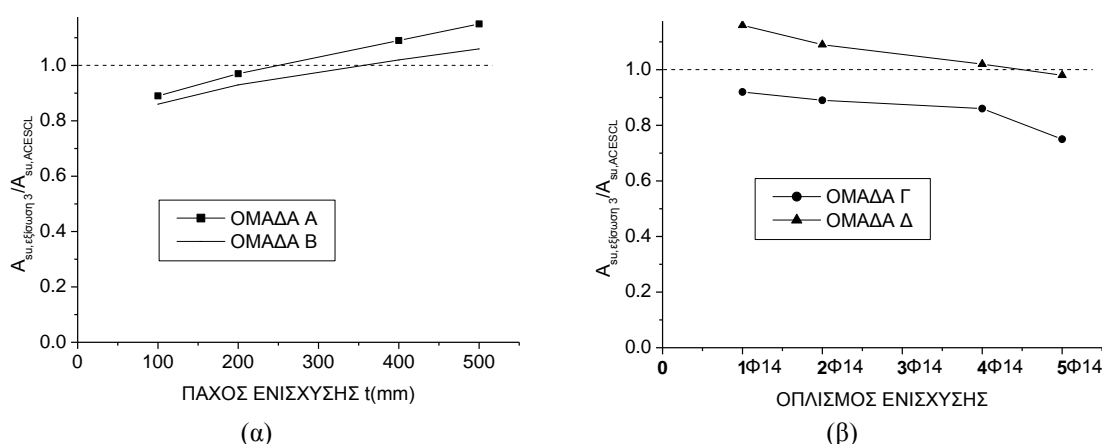
#### 4 ΕΛΕΓΧΟΣ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΤΙΚΗΣ ΣΧΕΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΟΥ ΟΠΛΙΣΜΟΥ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ

Εκτός από τον έλεγχο των σχέσεων που δίνουν τη διατμητική τάση στη διεπιφάνεια σε μία διατομή, μια ακόμα σχέση που ελέγχθηκε είναι η προσεγγιστική σχέση που προτείνεται στο Σχέδιο 2 του ΚΑΝ.ΕΠΕ. (2005) για τον υπολογισμό του οπλισμού της στρώσης ενίσχυσης.

$$A_{sn} = \frac{\Delta M}{z_n * f_y} \quad (3)$$

όπου  $A_{sn}$  : ο πρόσθετος οπλισμός της νέας στρώσης σκυροδέματος,  $\Delta M$  : η μεταβολή της ροπής του ενισχυμένου δοκιμίου ως προς το αρχικό,  $z_n$  : ο μοχλοβραχίονας των εσωτερικών δυνάμεων μετρούμενος από τη στάθμη του εξωτερικού οπλισμού και  $f_y$  : η τάση διαρροή του χάλυβα.

Η διαδικασία που ακολουθείται είναι η εξής: Υπολογίζεται η ροπή του αρχικού δοκιμίου, στη συνέχεια υπολογίζονται τα μεγέθη της ενισχυμένης δοκού και η μεταβολή της ροπής του ενισχυμένου δοκιμίου ως προς το αρχικό ( $\Delta M$ ). Με βάση αυτή την τιμή για τη μεταβολή της ροπής, υπολογίζεται από την εξίσωση 3 ο οπλισμός ενίσχυσης που θα έπρεπε να είχε χρησιμοποιηθεί. Στη συνέχεια υπολογίζεται ο λόγος του οπλισμού ενίσχυσης που θα έπρεπε να είχε χρησιμοποιηθεί προς τον οπλισμό που χρησιμοποιήθηκε στις αναλύσεις ( $A_{sn,εξίσωση3}/A_{sn,ACESCL}$ ). Οι υπολογισμοί αυτοί έγιναν για τις ομάδες δοκιμών με ενίσχυση στο εφελκόμενο πέγμα που έχουν περιγραφεί στην παράγραφο 3.1 και τα αποτελέσματα δίνονται σε συγκριτικά διαγράμματα (Σχήμα 8).



Σχήμα 8. Μεταβολή του λόγου απαιτούμενου οπλισμού ενίσχυσης με βάση το πρόγραμμα ACESCL και την προσεγγιστική εξίσωση 3 συναρτήσει α) του πάχους ενίσχυσης, και β) του οπλισμού ενίσχυσης

Από αυτά τα αποτελέσματα παρατηρείται ότι για την περίπτωση που η στρώση ενίσχυσης έχει μικρό πάχος και μεγάλο οπλισμό όπως συμβαίνει στην περίπτωση του δοκιμίου Γ4, τα αποτελέσματα της προσεγγιστικής εξίσωσης 3 είναι σε βάρος της ασφάλειας ( $A_{sn,εξίσωση3}/A_{sn,ECESCL}=0,75$ ). Αντιθέτως, στην περίπτωση που η στρώση ενίσχυσης έχει μεγάλο πάχος και μικρό οπλισμό, όπως στα δοκίμια Α4 και Δ1, τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την εξίσωση 3 είναι συντηρητικά ( $A_{sn,εξίσωση3}/A_{sn,ACESCL}=1,15$ ).

#### 5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από τις αναλύσεις που έγιναν στην παρούσα εργασία και από τη σύγκριση των αναλυτικών αποτελεσμάτων για την διατμητική τάση στη διεπιφάνεια και τον οπλισμό της στρώσης ενίσχυσης, με τα αντίστοιχα αποτελέσματα που δίνουν οι προσεγγιστικές εξισώσεις που έχουν περιγραφεί παραπάνω, προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

- Για τον υπολογισμό της διατμητικής τάσης :

Τα αποτελέσματα των προσεγγιστικών εξισώσεων έχουν αρκετά καλή συμφωνία με τα αντίστοιχα του αναλυτικού προγράμματος ACESCL για την περίπτωση της ενίσχυσης στο θλιβόμενο πέγμα, ενώ για την ενίσχυση στο εφελκόμενο πέγμα η προσεγγιστική σχέση δίνει πιο συντηρητικά αποτελέσματα.

Επίσης παρατηρήθηκαν τα εξής:

Κατά την ενίσχυση στο εφελκόμενο πέγμα, για σταθερή τιμή του πάχους ενίσχυσης, αύξηση του οπλισμού ενίσχυσης οδηγεί σε αύξηση της διατμητικής τάσης, συγκεκριμένα, για διπλασιασμό του οπλισμού ενίσχυσης προκύπτει σχεδόν διπλασιασμός της διατμητικής τάσης. Για ίδιο οπλισμό ενίσχυσης, παρουσιάζεται μια μικρή αύξηση της τιμής της διατμητικής τάσης καθώς αυξάνεται το πάχος της στρώσης ενίσχυσης.

Για την περίπτωση που η ενίσχυση έγινε στο θλιβόμενο πέγμα, για σταθερή τιμή του πάχους ενίσχυσης, αύξηση του οπλισμού ενίσχυσης οδηγεί σε αύξηση της διατμητικής τάσης. Η αύξηση αυτή, σε αυτή την περίπτωση ενίσχυσης, είναι μικρότερη από αυτή που παρατηρήθηκε κατά την ενίσχυση στο εφελκόμενο πέγμα.

Για ίδιο οπλισμό ενίσχυσης, παρατηρείται επίσης αύξηση της διατμητικής τάσης καθώς αυξάνεται το πάχος της στρώσης ενίσχυσης. Επίσης, αύξηση του πάχους της στρώσης ενίσχυσης οδηγεί σε αύξηση του βαθμού ενίσχυσης των δοκιμίων.

- Για τον υπολογισμό του απαιτούμενου οπλισμού της στρώσης ενίσχυσης:

Στην περίπτωση που η στρώση ενίσχυσης έχει μικρό πάχος και μεγάλο οπλισμό τα αποτελέσματα της προσεγγιστικής σχέσης για τον υπολογισμό του απαιτούμενου οπλισμού ενίσχυσης, είναι σε βάρος της ασφάλειας. Αντιθέτως, στην περίπτωση που η στρώση ενίσχυσης έχει μεγάλο πάχος και μικρό οπλισμό, τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την προσεγγιστική σχέση είναι συντηρητικά.

## 6 ΑΝΑΦΟΡΕΣ

Βασιλείου, Γ. 1975. Διερεύνηση Μηχανικής Συμπεριφοράς Επισκευασμένων Καμπτόμενων Στοιχείων εκ Σιδηροπαγούς Σκυροδέματος. Διδακτορική Διατριβή. Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών. Ε.Μ.Π.. Αθήνα.

Βιντζηλαίου, Ε. 1986. Θεμελιώδεις Μηχανισμοί Μεταφοράς Δυνάμεων σε Διεπφάνειες Οπλισμένου Σκυροδέματος υπό Μονοτονικές και Ανακυκλιζόμενες Δράσεις. Διδακτορική Διατριβή. Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών. Ε.Μ.Π.. Αθήνα.

Δρίτσος, Σ., Κώτσιρα, Ε., Πιλακούτας, Κ. 1996. Μονολιθικότητα Καμπτικώς Ενισχυμένων Στοιχείων από Ο.Σ.. 11<sup>ο</sup> Ελληνικό Συνέδριο Σκυροδέματος: 200-213. Λευκωσία.

Δρίτσος, Σ. 2005. Επισκευές και Ενισχύσεις Κατασκευών από Οπλισμένο Σκυρόδεμα. Γ' Έκδοση. Πάτρα.

Ε.Μ.Π. 1987. Συστάσεις για τις Επισκευές Κτιρίων Βλαμμένων από Σεισμό. Αθήνα.

Ζερβός, Ν. & Μπελδέκας, Β. 1995. Πειραματική Μελέτη Ενίσχυσης Δοκών με Νέες Στρώσεις Σκυροδέματος. Διπλωματική Εργασία. Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών. Πανεπιστήμιο Πατρών. Πάτρα.

ΚΑΝ.ΕΠΕ. 2005. Σχέδιο 2 Κανονισμού Επεμβάσεων. Οργανισμός Αντισεισμικού Σχεδιασμού Προστασίας. Αθήνα.

Πενέλης, Γ. & Κάππος, Ι. 1990. Αντισεισμικές Κατασκευές από Οπλισμένο Σκυρόδεμα. Θεσσαλονίκη: Ζήτη.

Τάσιος, Θ. 2003. Θεωρία Σχεδιασμού Επισκευών και Ενισχύσεων. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο. Αθήνα.

Altun, F. 2004. An Experimental Study of Jacketed Reinforced Concrete Beams Under Bending. Construction and Building Materials, Vol. 18: 611-618.

CEB Bulletin No 162. 1983. Assessment of Concrete Structures and Design Procedures for Upgrading. Paris.

- Dritsos, S. 1994. Ultimate Strength of Flexurally Strengthened RC members. 10<sup>th</sup> European Conference on Earthquake Engineering, Vol. 3: 1637-1642. Vienna.
- Dritsos, S. & Pilakoutas, K. 1995. Strengthening of RC elements by New Concrete Layers. Proc. of the 5<sup>th</sup> SECED Conference: European Seismic Design Practice: 611-617. Chester.
- Dritsos, S. 1996a. Flexural Behaviour of Retrofitted RC Beams. CD Proc. of the 11<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, paper No 516. Acapulco.
- Dritsos, S. 1996b. Strengthening of RC Beams by New Cement Based Layers. Proc. of the International Conference: Concrete Repair Rehabilitation and Protection: 515-526. Dundee.
- Dritsos, S. 1997. Analysis of Retrofitted RC Beams. Proc. of the 7<sup>th</sup> International Conference on Structural Faults and Repair, Vol. 2: 501-507. Edinburgh.
- Frangi, A. & Fontana, M. 2003. Elasto-Plastic Model for Timber-Concrete Composite Beams with Ductile Connection. Structural Engineering International: Science and Technology 2003:47-57.
- Kotsira, E., Dritsos, S., Pilakoutas, K. 1993. Effectiveness of Techniques for Flexural Repair and Strengthening of RC Members. Proc. of the 5<sup>th</sup> International Conference on Structural Faults and Repair, Vol. 3: 235-243. Edinburgh.
- Lampropoulos, A., Tsioulou, O., Dritsos, S. 2004. Analytical Prediction of the Behaviour of R.C. Strengthened Beams. International Symposium: Durability and Maintenance of Concrete Structures, Paper No 78: 675-682. Dubrovnik.
- Nie, J. & Cai, C. 2003. Steel-Concrete Composite Beams Considering Shear Slip Effects. Journal of Structural Engineering. ASCE, Vol. 129 (4): 495-506.
- Nie, J., Fan, J., Cai C. 2004. Stiffness and Deflection of Steel-Concrete Composite Beams under Negative Bending. Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 130 (11): 1842-1851.
- Saiidi, M, Vrontinos, S., Douglas, B. 1990. Model for the Response of Reinforced Concrete Beams Strengthened by Concrete Overlays. Structural Journal, ACI, Vol.87: 687-695.
- Trikha, D., Jain, S., Hali, S. 1991. Repair and Strengthening of Damaged Concrete Beams. Concrete International: Design and Construction: 53-59.