

Πρόβλεψη Συμπεριφοράς Υποστυλωμάτων από Οπλισμένο Σκυρόδεμα με Χρήση Πεπερασμένων Στοιχείων

Α.Π.Λαμπρόπουλος
Πολιτικός Μηχανικός, MSc

Σ.Η.Δρίτσος
Αναπλ. Καθηγητής Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών Πανεπιστημίου Πατρών

Λέξεις κλειδιά: πεπερασμένα στοιχεία, υποστύλωμα, εξόλκευση, συνάφεια, ολίσθηση χάλυβα - σκυροδέματος

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Στην παρούσα εργασία εξετάζεται η προσομοίωση υποστυλωμάτων από οπλισμένο σκυρόδεμα με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Για την παρούσα διερεύνηση γίνεται χρήση των προγραμμάτων πεπερασμένων στοιχείων ANSYS και ATENA, το τελευταίο από τα οποία είναι εξειδικευμένο για στοιχεία από οπλισμένο σκυρόδεμα με νόμο τάσεων - παραμορφώσεων που συμπεριλαμβάνει τον φθίνοντα κλάδο, δίνοντας την δυνατότητα της προσομοίωσης της συμπεριφοράς των στοιχείων και στον φθίνοντα κλάδο της καμπύλης δύναμης - μετατόπισης. Στα δοκίμια εξετάζεται η επίδραση της σχετικής ολίσθησης στην επαφή των ράβδων οπλισμού με το περιβάλλον σκυρόδεμα. Προς τούτο χρησιμοποιούνται ειδικά στοιχεία (ελατήρια) για την σύνδεση μεταξύ των στοιχείων του χάλυβα και του σκυροδέματος. Προκύπτει σαφώς ότι η ολίσθηση έχει σημαντική επιρροή κυρίως ως εξόλκευση του οπλισμού από τα στοιχεία θεμελίωσης. Αξιολογώντας το παραπάνω δεδομένο εξετάζεται ως εναλλακτική πρακτική, η προσομοίωση της επαφής ράβδων οπλισμού και σκυροδέματος με παραδοχή πλήρους συνάφειας (χωρίς ολίσθηση) και η “διόρθωση” των αποτελεσμάτων με βάση δυο σχετικά όμοιες αναλυτικές διαδικασίες, που έχουν προταθεί στην βιβλιογραφία για την συνεκτίμηση της εξόλκευσης στο πέδιλο. Για να ελεγχθεί η αξιοπιστία των προσομοιωμάτων, τα αποτελέσματα των αναλύσεων συγκρίνονται με αντίστοιχα πειραματικά δεδομένα από δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Κατασκευών του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πατρών.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων είναι μία από τις πιο σημαντικές και πιο διαδεδομένες αριθμητικές μεθόδους που εφαρμόζεται σε όλους σχεδόν τους τεχνικούς τομείς και ιδιαίτερα στην ανάλυση κατασκευών που ενδιαφέρουν τον Πολιτικό Μηχανικό καθώς δίνει την δυνατότητα της σχετικά εύκολης φυσικής ερμηνείας των διαφόρων μεγεθών που υπεισέρχονται στους υπολογισμούς καθώς και των αποτελεσμάτων που προκύπτουν. Ωστόσο απαραίτητος είναι ο έλεγχος της αξιοπιστίας του προσομοιώματος που χρησιμοποιείται καθώς υπάρχουν αρκετές αβεβαιότητες στα μοντέλα που χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση του σκυροδέματος καθώς και για την συνάφεια μεταξύ του σκυροδέματος και του χάλυβα οπλισμού.

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η δημιουργία ενός αξιόπιστου προσομοιώματος για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς στοιχείων και συγκεκριμένα υποστυλωμάτων από οπλισμένο σκυρόδεμα. Θα εξεταστούν διαφορετικοί τρόποι προσομοίωσης και θα ελεγχτούν με αντίστοιχα πειραματικά αποτελέσματα που είναι διαθέσιμα από δοκιμές που έχουν γίνει στο Εργαστήριο Κατασκευών του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πατρών. Επιπλέον θα εξεταστεί το φαινόμενο της εξόλκευσης των ράβδων οπλισμού από το πέδιλο και θα αξιολογηθεί η επίδραση που έχει στην συνολική συμπεριφορά των στοιχείων. Για την παρούσα διερεύνηση θα χρησιμοποιηθούν τα προγράμματα πεπερασμένων στοιχείων ANSYS (ANSYS 2002) και ATENA (Cervenka et al. 2005).

Στην βιβλιογραφία υπάρχουν αρκετές εργασίες για την προσομοίωση στοιχείων από οπλισμένο σκυρόδεμα με χρήση του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων ANSYS. Στις περισσότερες εργασίες η συμπεριφορά του σκυροδέματος καθορίζεται από ένα πολυγραμμικό διάγραμμα τάσεων - παραμορφώσεων σε θλίψη. Ωστόσο έχουν χρησιμοποιηθεί και γραμμικά ελαστικός και τέλεια ελαστοπλαστικός νόμος για το προσδιορισμό της συμπεριφοράς του σκυροδέματος (Barbosa & Ribeiro 1998). Η προσομοίωση του χάλυβα σε μερικές από τις εργασίες γίνεται με διακριτά γραμμικά στοιχεία (Barbosa & Ribeiro 1998, Fanning 2001, Kachlakev 2002, Santhakumar & Chandrasekaran 2004, Wolanski 2004, Nie et al. 2004) ενώ σε άλλες θεωρείται ενσωματωμένος στο στοιχείο του σκυροδέματος (Barbosa & Ribeiro 1998, Erduran & Yakut 2004). Ωστόσο οι Barbosa & Ribeiro (1998), αναφέρουν ότι δεν υπάρχουν σημαντικές διαφορές μεταξύ των δύο διαφορετικών τρόπων προσομοίωσης των ράβδων οπλισμού. Επιπλέον στις περισσότερες εργασίες που υπάρχουν στην βιβλιογραφία, η σύνδεση των στοιχείων του χάλυβα και του σκυροδέματος θεωρείται πλήρης (χωρίς ολίσθηση). Ωστόσο στην εργασία των Nie et al. (2004), έχει προσομοιωθεί η ολίσθηση μεταξύ των στοιχείων του χάλυβα και του σκυροδέματος με χρήση ειδικών στοιχείων, ελατηρίων, για τη σύνδεση τους.

Παρά το γεγονός ότι για την προσομοίωση στοιχείων από οπλισμένο σκυρόδεμα με χρήση του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων ANSYS υπάρχουν αρκετές εργασίες, δεν ισχύει το ίδιο για την προσομοίωση στοιχείων με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ATENA.

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε ένα πολυγραμμικό διάγραμμα τάσεων παραμορφώσεων για τον προσδιορισμό της θλιπτικής συμπεριφοράς του σκυροδέματος (CEB-FIP Model Code 1990). Ο χάλυβας έχει προσομοιωθεί με ειδικά γραμμικά στοιχεία τα οποία σε ορισμένες αναλύσεις θεωρούνται ότι έχουν ολίσθηση σε σχέση με το περιβάλλον σκυρόδεμα ενώ σε ορισμένες άλλες ότι έχουν συνθήκες πλήρους σύνδεσης με αυτό. Τα αναλυτικά αποτελέσματα που παρουσιάζονται στην παρούσα εργασία προκύπτουν από μονότονα αυξανόμενες μετατοπίσεις επιβαλλόμενες σε δοκίμια υποστυλωμάτων τα οποία προηγουμένως έχουν δοκιμαστεί στο εργαστήριο όπου η επιβαλλόμενη μετατόπιση είναι ανακυκλιζόμενη. Τα αποτελέσματα των αναλύσεων συγκρίνονται με την περιβάλλουσα των αντίστοιχων αποτελεσμάτων των πειραματικών δοκιμών.

2. ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΑΙ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

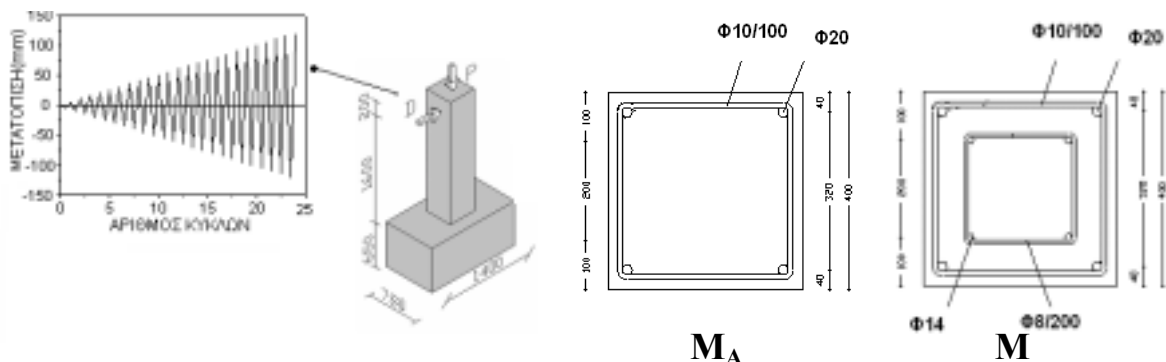
Στην παρούσα διερεύνηση θα εξεταστούν δυο υποστυλώματα [M_A , M] με διαστάσεις διατομής 400X400mm και ύψος 1800mm, για τα οποία διατίθενται και πειραματικά αποτελέσματα (Βανδώρος 2005, Σπαθής 2006, Vandoros & Dritsos 2006a, Vandoros & Dritsos 2006b).

Στο δοκίμιο M_A , ο διαμήκης οπλισμός ήταν 4Φ20 και ο οριζόντιος οπλισμός Φ10/100 ενώ στο δοκίμιο M υπήρχαν επιπλέον εσωτερικά 4Φ14 με οριζόντιο οπλισμό Φ8/200. Τα χαρακτηριστικά του χάλυβα που χρησιμοποιήθηκε παρουσιάζονται στον πίνακα 1.

Πίνακας 1. Χαρακτηριστικά Χάλυβα Υποστυλωμάτων

| Οπλισμός | Τάση διαρροής (MPa) | Τάση θραύσης (MPa) |
|------------|---------------------|--------------------|
| Φ14 / S220 | 313.00 | 441.70 |
| Φ8 / S220 | 425.35 | 596.30 |
| Φ20 / S500 | 487.12 | 657.00 |
| Φ10 / S500 | 599.20 | 677.20 |

Η αντοχή του σκυροδέματος του δοκιμίου M_A βρέθηκε ίση με 30.6 MPa ενώ η αντοχή του σκυροδέματος του δοκιμίου M βρέθηκε ίση με 24.7 MPa. Και τα δύο δοκίμια που εξετάστηκαν εδράζονταν σε ισχυρό πέδιλο με διαστάσεις 1400X650X780 mm οπλισμένο με Φ16/150 και στις τρεις διευθύνσεις με επικάλυψη 25 mm. Σε ύψος 1600 mm από την κορυφή του πεδίου ασκείται μέσω εμβόλου η ανακυκλιζόμενη δράση (σχήμα 1). Περισσότερες πληροφορίες για τα δοκίμια καθώς και για την διάταξη της φόρτισης μπορούν να αναζητηθούν σε άλλες εργασίες (Βανδώρος 2005, Σπαθής 2006, Vandoros & Dritsos 2006a, Vandoros & Dritsos 2006b).

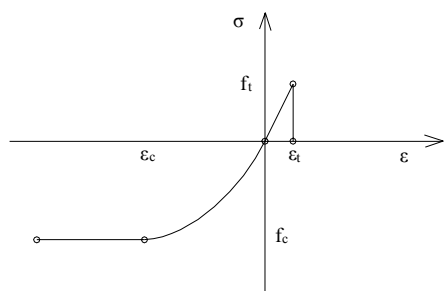


Σχήμα 1. Παρουσίαση της πειραματικής διάταξης, της φόρτισης και των διατομών των στοιχείων

3. ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΚΑΙ ΠΑΡΑΔΟΧΕΣ

3.1 Δοκίμο M_A

Για την προσομοίωση του σκυροδέματος με χρήση του προγράμματος περασμένων στοιχείων ANSYS χρησιμοποιείται ένα οκτάκομβο στοιχείο κάθε κόμβος του οποίου έχει τρεις βαθμούς ελευθερίας (ANSYS 2002). Το στοιχείο αυτό έχει την δυνατότητα της δημιουργίας ρωγμών σε τρεις διαφορετικές διευθύνσεις σε κάθε σημείο ολοκλήρωσης (κόμβος). Αυτό γίνεται με την εισαγωγή δύο παραμέτρων για την οριακή εφελκυστική και για την θλιπτική αντοχή. Ωστόσο στις αναλύσεις που πραγματοποιούνται καθορίζεται μόνο μια τιμή για την μέγιστη εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος. Λόγω της πολύ μικρής αντοχής του σκυροδέματος σε εφελκυσμό και του λόγου Poisson, η αστοχία σε εφελκυσμό θα προηγηθεί της αστοχίας σε θλίψη. Επομένως δεν χρειάζεται να καθοριστεί κάποια τιμή για την θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος. Επιπλέον ο καθορισμός μιας μέγιστης τιμής για την θλιπτική αντοχή του στοιχείου θα προκαλούσε τοπικά προβλήματα στα σημεία επιβολής της φόρτισης. Επομένως το στοιχείο που χρησιμοποιείται για την προσομοίωση της συμπεριφοράς του σκυροδέματος στο πρόγραμμα περασμένων στοιχείων ANSYS αστοχεί σε εφελκυσμό. Το διάγραμμα εφελκυστικών τάσεων - παραμορφώσεων για το στοιχείο αυτό είναι γραμμικά αυξανόμενο μέχρι την τιμή της εφελκυστικής αντοχής. Μετά το σημείο αυτό υπάρχει κατακόρυφη πτώση του διαγράμματος και μηδενισμός των τάσεων (δεν υπάρχει φθίνοντας κλάδος στο διάγραμμα) όπως φαίνεται στο σχήμα 2.



Σχήμα 2. Συμπεριφορά στοιχείου σκυροδέματος σε θλίψη και σε εφελκυσμό

Κατά την διάρκεια της φόρτισης οι ρωγμές στο σκυρόδεμα αυξάνονται συνέχεια μέχρι ένα σημείο στο οποίο ο αριθμός των ρωγμών είναι τόσο σημαντικός που το πρόγραμμα αδυνατεί να συγκλίνει και το μοντέλο γίνεται "ασταθές". Στο σημείο αυτό θεωρείται ότι το προσομοίωμα έχει αναλάβει την μέγιστη τιμή του φορτίου. Ωστόσο αυτός ο τρόπος προσδιορισμού της μέγιστης τιμής του φορτίου έχει αρκετές αβεβαιότητες καθώς η αδυναμία σύγκλισης μπορεί να οφείλεται και σε άλλες αιτίες.

Η προσομοίωση του χάλυβα οπλισμού γίνεται με χρήση γραμμικών στοιχείων με τρεις βαθμούς ελευθερίας σε κάθε κόμβο. Ωστόσο αρχικά γίνεται προσομοίωση του δοκιμίου αγνοώντας την ύπαρξη του πεδίου και θεωρώντας συνθήκες πλήρους πάκτωσης στην βάση του υποστρώματος $[M_{A,0,AN}]$. Στο δοκίμιο αυτό γίνεται παραδοχή πλήρους συνάφειας μεταξύ χάλυβα και σκυροδέματος. Στην συνέχεια και σε όλα τα άλλα δοκίμια που εξετάζονται έχει προσομοιωθεί το πέδιλο ενώ στο δοκίμιο $M_{A,1,AN}$ γίνεται παραδοχή πλήρους συνάφειας μεταξύ χάλυβα και σκυροδέματος. Στην συνέχεια προσομοιώνεται η ολίσθηση μεταξύ χάλυβα και σκυροδέματος με χρήση ειδικών στοιχείων (ελατηρίων) για τη σύνδεση των στοιχείων του χάλυβα με το σκυρόδεμα $[M_{A,2,AN}]$. Για τον προσδιορισμό της σταθεράς των ελατηρίων $K_{ελ}$ χρησιμοποιείται η ακόλουθη αναλυτική διαδικασία (Lamproulos & Dritsos 2006).

$$\tau_u = 1.25\sqrt{f_c} \text{ (CEB-FIP Model Code 1990)}, \tau_r = \tau_u * s \quad (1)$$

$$\tau_u * s * \pi * d_b * \frac{l_1 + l_2}{2} = K_{ελ} * s \quad (2)$$

$$(2) \rightarrow K_{ελ} = \tau_u * \pi * d_b * \frac{l_1 + l_2}{2} \quad (3)$$

όπου:

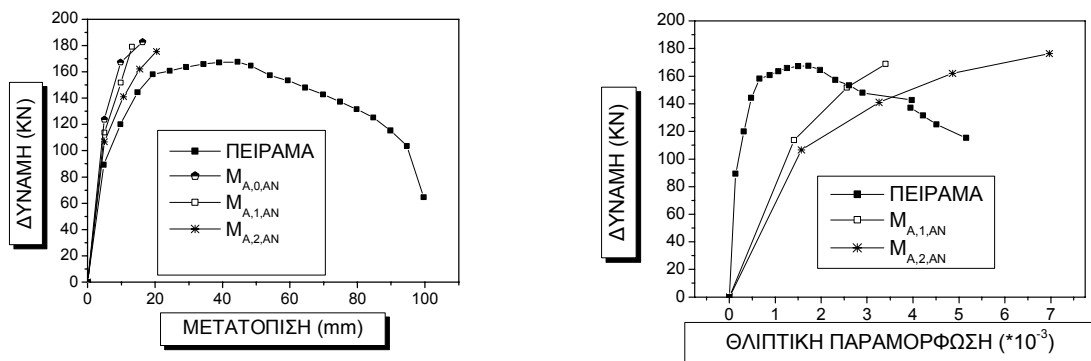
τ_r είναι η τάση συνάφειας (N/mm^2),

τ_u είναι η μέγιστη τάση συνάφειας (N/mm^2) ανά mm της ολίσθησης,

d_b είναι η διάμετρος των ράβδων οπλισμού σε mm και

l_1, l_2 είναι τα μήκη των στοιχείων σε mm, άνω και κάτω από το σημείο που τοποθετείται το ελατήριο.

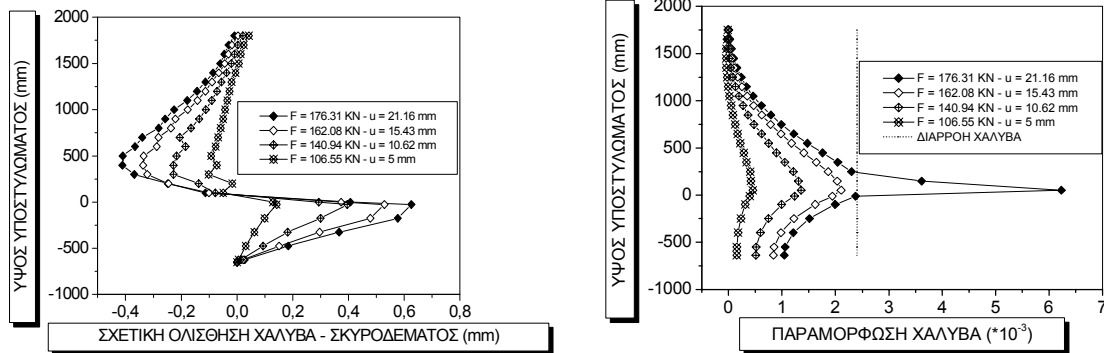
Το διάγραμμα της μεταβολής της δύναμης με την μετατόπιση των αναλύσεων των δοκιμών $M_{A,0,AN}$, $M_{A,1,AN}$ και $M_{A,2,AN}$ συγκρίνεται με τα αντίστοιχα πειραματικά αποτελέσματα και παρουσιάζεται στο σχήμα 3. Επιπλέον παρουσιάζεται η μεταβολή των θλιπτικών παραμορφώσεων στην βάση του υποστρώματος με την οριζόντια δύναμη που εισάγεται στο υποστύλωμα (σχήμα 3).



Σχήμα 3. Διαγράμματα δύναμης - μετατόπισης και δύναμης - θλιπτικής παραμόρφωσης - Σύγκριση με πειραματικά αποτελέσματα

Από το σχήμα 3 φαίνεται ότι τα αποτελέσματα του δοκιμίου $M_{A,0,AN}$ στο οποίο αγνοείται η ύπαρξη του πεδίου φαίνεται να έχουν μικρές διαφορές σε σχέση με τα αντίστοιχα του δοκιμίου στο οποίο έχει προσομοιωθεί το πέδιλο $M_{A,1,AN}$. Ωστόσο τα αποτελέσματα του δοκιμίου $M_{A,2,AN}$ προσεγγίζουν αρκετά καλά την πειραματική καμπύλη της μεταβολής της δύναμης με την μετατόπιση. Τα αντίστοιχα αποτελέσματα για το δοκίμιο $M_{A,1,AN}$ στο οποίο έχει γίνει η παραδοχή της πλήρους συνάφειας μεταξύ του χάλυβα και του σκυροδέματος, παρουσιάζουν αυξημένες τιμές της δύναμης σε σχέση με τα αντίστοιχα πειραματικά αποτελέσματα.

Στην συνέχεια, στο σχήμα 4, παρουσιάζεται η ολίσθηση μεταξύ του χάλυβα και του σκυροδέματος και η παραμόρφωση του χάλυβα σε όλο το ύψος του υποστυλώματος για το δοκίμιο $M_{A,2,AN}$.



Σχήμα 4. Σχετική ολίσθηση μεταξύ χάλυβα και σκυροδέματος και κατανομή των παραμορφώσεων του χάλυβα σε όλο το ύψος του υποστυλώματος

Όπως ήταν αναμενόμενο από το σχήμα 4 φαίνεται ότι οι τιμές της ολίσθησης μεταξύ του χάλυβα και του σκυροδέματος καθώς και των παραμορφώσεων του χάλυβα λαμβάνουν την μέγιστη τιμή τους στην βάση του υποστυλώματος.

Στην συνέχεια εξετάζεται ένας εναλλακτικός τρόπος υπολογισμού της πρόσθετης μετατόπισης που προκαλεί η εξόλκευση των ράβδων οπλισμού από το πέδιλο στην συμπεριφορά του στοιχείου, χρησιμοποιώντας δύο αναλυτικές διαδικασίες (Lamprououlos & Dritsos 2006) και τα αποτελέσματα της ανάλυσης στην οποία έγινε η παραδοχή πλήρους συνάφειας μεταξύ χάλυβα και σκυροδέματος ($M_{A,1,AN}$). Οι τιμές των πρόσθετων μετατοπίσεων που υπολογίζονται προστίθενται στις τιμές των μετατοπίσεων που προκύπτουν από την ανάλυση στην οποία έχει γίνει παραδοχή πλήρους συνάφειας μεταξύ χάλυβα οπλισμού και σκυροδέματος.

Η πρώτη διαδικασία βασίζεται στους τύπους που παρουσιάζονται στο CEB-fib (2003) για την εξόλκευση των ράβδων οπλισμού [$M_{A,3,AN}$]. Η εξίσωση 4 χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της γωνίας στροφής της διατομής στην βάση του υποστυλώματος μέχρι την διαρροή του χάλυβα ενώ η εξίσωση 5 χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της τιμής της γωνίας στροφής από την διαρροή μέχρι την αστοχία.

$$\theta_y^{slip} = \frac{\varepsilon_y L_{b,y}}{2} \frac{1}{z}, \quad L_{b,y} = \frac{d_b}{4} \frac{f_y}{f_{b,y}}, \quad f_{b,y} = 0.5 * \sqrt{f_c} \quad (4)$$

$$\theta_u^{slip} = \theta_y^{slip} + \frac{(\varepsilon_u - \varepsilon_y)}{z} \frac{f_u - f_y}{f_u} L_{b,u}, \quad L_{b,u} = \frac{d_b}{4} \frac{f_u}{f_{b,u}} \quad (5)$$

όπου:

- $\theta_y^{slip}, \theta_u^{slip}$ είναι η γωνία στροφής της διατομής στην διαρροή και στην αστοχία αντίστοιχα,
- z είναι η απόσταση σε mm από τον εφελκόμενο χάλυβα στο μέσο της θλιβόμενης ζώνης,
- L_b είναι το μήκος ανάπτυξης σε mm,
- f_b είναι η μέση τιμή της τάσης συνάφειας σε MPa,
- d_b είναι η διάμετρος σε mm των ράβδων οπλισμού,
- f_c είναι η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος σε MPa,
- f_y, f_u είναι η τάση διαρροής και αστοχίας του χάλυβα σε MPa και
- $\varepsilon_y, \varepsilon_u$ είναι η παραμόρφωση στην διαρροή και στην αστοχία.

Η άλλη διαδικασία που χρησιμοποιήθηκε είναι ίδια με την προηγούμενη με την μόνη διαφορά ότι χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικές εξισώσεις (Mazzoni et al. 2004) [$M_{A,4,AN}$]. Από ισορροπία δυνάμεων των ράβδων οπλισμού, προκύπτουν οι ακόλουθες εξισώσεις.

$$f_y * (\pi * \frac{d_b^2}{4}) = L_b * (\pi * d_b) * f_b \text{ και } L_b = \frac{f_y * (\pi * \frac{d_b^2}{4})}{\pi * d_b * f_b} \quad (6)$$

όπου d_b είναι η διάμετρος των ράβδων οπλισμού σε mm.

Η εξίσωση 8 χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της εξόλκευσης των ράβδων οπλισμού από το πέδιλο μέχρι την διαρροή του χάλυβα οπλισμού.

$$\delta(x) = \int_0^{ld} \varepsilon(x) * dx, \quad \varepsilon_s(x) = \varepsilon_y (1 - \frac{x}{L_b}) \quad (7)$$

$$\delta_y = \frac{1}{8} \varepsilon_y * d_b * \frac{f_y}{f_b}, \quad f_b = 0.5 \sqrt{f_c} \quad (8)$$

Επιπλέον θεωρώντας ότι η διατομή περιστρέφεται γύρω από το μέσο του πλάτους της προκύπτει η εξίσωση 9.

$$\theta = \frac{\delta}{h_c / 2} \quad (9)$$

όπου h_c είναι το πλάτος της διατομής του υποστυλώματος.

Μετά την διαρροή του χάλυβα και μέχρι την τιμή της αστοχίας του χρησιμοποιείται η εξίσωση 10.

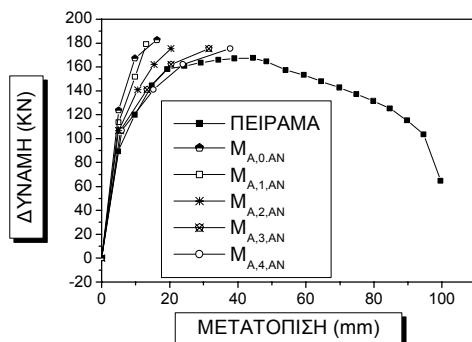
$$\theta_u = \theta_y + \frac{1}{4} \frac{d_b}{H_c} \left[(\varepsilon_y + \varepsilon_u) * \left(\frac{f_u}{f_y} - 1 \right) \right] \frac{f_y}{f_b} \quad (10)$$

Η πρόσθετη λοιπόν μετατόπιση η οποία οφείλεται στην εξόλκευση των ράβδων οπλισμού υπολογίζεται από την εξίσωση 11.

$$\Delta = \theta * h \quad (11)$$

όπου h είναι η απόσταση ανάμεσα στην βάση του υποστυλώματος και στο σημείο για το οποίο υπολογίζεται η μετατόπιση.

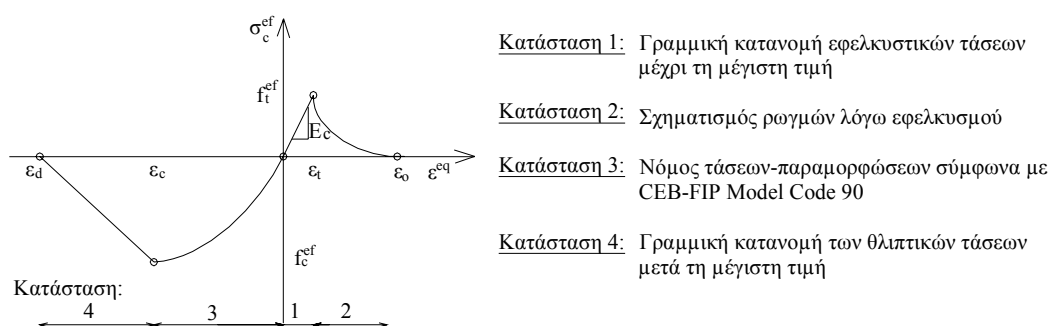
Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την διαδικασία που περιγράφηκε ($M_{A,3,AN}$ και $M_{A,4,AN}$) συγκρίνονται με τα αντίστοιχα των $M_{A,0,AN}$, $M_{A,1,AN}$, $M_{A,2,AN}$ καθώς και με τα πειραματικά και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο σχήμα 5.



Σχήμα 5. Διάγραμμα δύναμης – μετατόπισης για τα δοκίμια $M_{A,0,AN}$, $M_{A,1,AN}$, $M_{A,2,AN}$, $M_{A,3,AN}$, $M_{A,4,AN}$ – Σύγκριση με πειραματικά αποτελέσματα

Από το σχήμα 5 φαίνεται ότι με χρήση των αναλυτικών διαδικασιών για τον υπολογισμό της πρόσθετης μετατόπισης λόγω εξόλκευσης των ράβδων οπλισμού από το πέδιλο (δοκίμια $M_{A,3,AN}$ και $M_{A,4,AN}$), τα αποτελέσματα προσεγγίζουν καλύτερα τα αντίστοιχα πειραματικά, σε σχέση με αυτά που προκύπτουν από τα άλλα προσομοιώματα.

Ωστόσο οι προβλέψεις της συμπεριφοράς των στοιχείων με χρήση του προγράμματος ANSYS μπορούν να πραγματοποιηθούν μόνο μέχρι τη μέγιστη τιμή του φορτίου αφού το στοιχείο που χρησιμοποιείται για την προσομοίωση της συμπεριφοράς του σκυροδέματος δεν συμπεριλαμβάνει τον φθίνοντα κλάδο του διαγράμματος τάσεων παραμορφώσεων για την συμπεριφορά του σκυροδέματος σε εφελκυσμό, αλλά θεωρεί ότι μετά τη μέγιστη τιμή της τάσης σε εφελκυσμό ακολουθεί μηδενισμός τους. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ATENA. Το συγκεκριμένο λογισμικό έχει την δυνατότητα να προσομοιώνει τη συμπεριφορά των στοιχείων από σκυροδέμα ακόμα και μετά το μέγιστο της καμπύλης δύναμης μετατόπισης. Η συμπεριφορά του στοιχείου που χρησιμοποιείται για την προσομοίωση της συμπεριφοράς του σκυροδέματος φαίνεται στο σχήμα 6 (Cervenka et al. 2005).

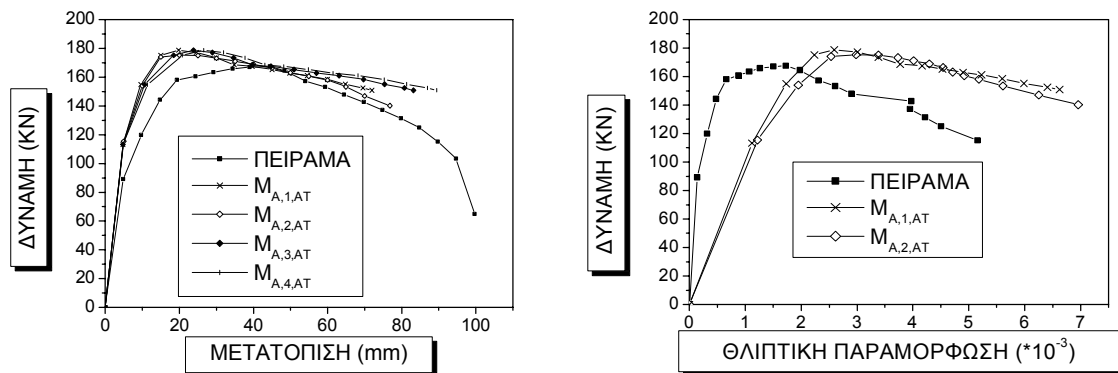


Σχήμα 6. Μονοαξονική συμπεριφορά τάσεων – παραμορφώσεων του στοιχείου του σκυροδέματος

Τα προσομοιώματα επιλύθηκαν με διαφορετικούς καταστατικούς νόμους τάσεων παραμορφώσεων καθώς και με τον προεπιλεγμένο που διαθέτει το πρόγραμμα. Εξ αυτών τα καλύτερα αποτελέσματα προέκυψαν χρησιμοποιώντας γραμμική κατανομή στον φθίνοντα κλάδο του νόμου τάσεων παραμορφώσεων σε θλίψη χρησιμοποιώντας τον νόμο που έχει προταθεί στο CEB-FIP Model Code 1990 (διαφορετικός νόμος από τον προεπιλεγμένο του προγράμματος). Αυτός ο νόμος χρησιμοποιείται σε όλες τις αναλύσεις που παρουσιάζονται στην παρούσα εργασία.

Ο οπλισμός προσομοιώνεται με γραμμικά στοιχεία τα οποία είναι ενσωματωμένα στο στοιχείο του σκυροδέματος. Επιπλέον το πρόγραμμα έχει την δυνατότητα να συμπεριλαμβάνει την ολίσθηση μεταξύ του χάλυβα και του σκυροδέματος καθώς έχει δύο νόμους για την μεταβολή της τάσεως συνάφειας με την ολίσθηση του οπλισμού. Ο νόμος που χρησιμοποιείται για της αναλύσεις είναι αυτός που έχει προταθεί στο CEB-FIP Model Code 1990 (στον οποίο βασίζονται και οι σταθερές των ελατηρίων που προσδιορίστηκαν για την προσομοίωση της ολίσθησης χάλυβα – σκυροδέματος στις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν με χρήση του προγράμματος ANSYS). Το προσομοίωμα που κατασκευάστηκε έχει την δυνατότητα να συμπεριλαμβάνει την ολίσθηση μεταξύ του χάλυβα και του σκυροδέματος καθώς και την επίδραση της εξόλκευσης του οπλισμού από το πέδιλο [$M_{A,2,AT}$]. Ωστόσο δημιουργήθηκε και ένα προσομοίωμα στο οποίο υπάρχει πλήρη συνάφεια μεταξύ του χάλυβα και του σκυροδέματος [$M_{A,1,AT}$]. Επιπλέον εφαρμόστηκε η αναλυτική διαδικασία που περιγράφηκε προηγουμένως (εξισώσεις 4-11) για τον υπολογισμό της εξόλκευσης χρησιμοποιώντας τους τύπους που παρουσιάζονται στο CEB-fib (2003) [$M_{A,3,AT}$] αλλά και αυτούς που υπάρχουν στην εργασία των Mazzoni et al. (2004) [$M_{A,4,AT}$].

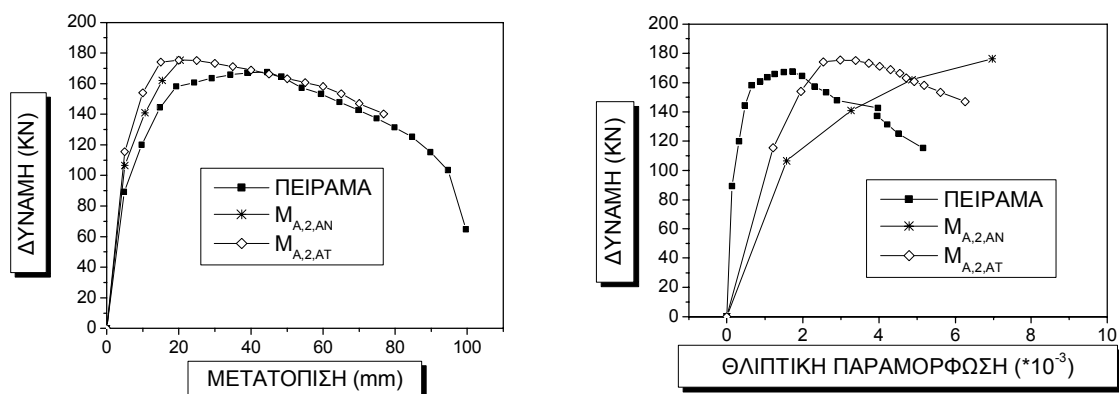
Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την αναλύσεις των προσομοιωμάτων $M_{A,1,AT}$, $M_{A,2,AT}$, $M_{A,3,AT}$ και $M_{A,4,AT}$ συγκρίνονται με τα αντίστοιχα πειραματικά και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο σχήμα 7. Επιπλέον παρουσιάζονται συγκριτικά διαγράμματα της μεταβολής της θλιπτικής παραμόρφωσης στην βάση του υποστυλώματος κατά την διάρκεια της φόρτισης.



Σχήμα 7. Διάγραμμα μεταβολής της δύναμης με την μετατόπιση και την θλιπτική παραμόρφωση του σκυροδέματος στην βάση του υποστρώματος – Σύγκριση με πειραματικά αποτελέσματα

Από το σχήμα 7 φαίνεται ότι τα αποτελέσματα των αναλύσεων που προκύπτουν με χρήση των διαφόρων παραδοχών δεν έχουν μεγάλες διαφορές. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης του προσομοιώματος $M_{A,2,AT}$ είναι αρκετά κοντά στα πειραματικά αποτελέσματα ακόμα και στον φθίνοντα κλάδο του διαγράμματος δύναμης μετατόπισης. Επιπλέον τα αποτελέσματα που προκύπτουν με χρήση της αναλυτικής μεθοδολογίας για τον υπολογισμό της επίδρασης της εξόλκευσης των ράβδων οπλισμού από το πέδιλο δεν διαφέρουν σημαντικά από τα πειραματικά αποτελέσματα. Ωστόσο προκύπτουν αυξημένες τιμές της δύναμης στον φθίνοντα κλάδο του διαγράμματος δύναμης μετατόπισης. Οι τιμές των παραμορφώσεων που προκύπτουν από τις αναλύσεις των προσομοιωμάτων $M_{A,1,AT}$ και $M_{A,2,AT}$ δεν διαφέρουν σημαντικά ενώ υπάρχει απόκλιση σε σχέση με τα πειραματικά αποτελέσματα.

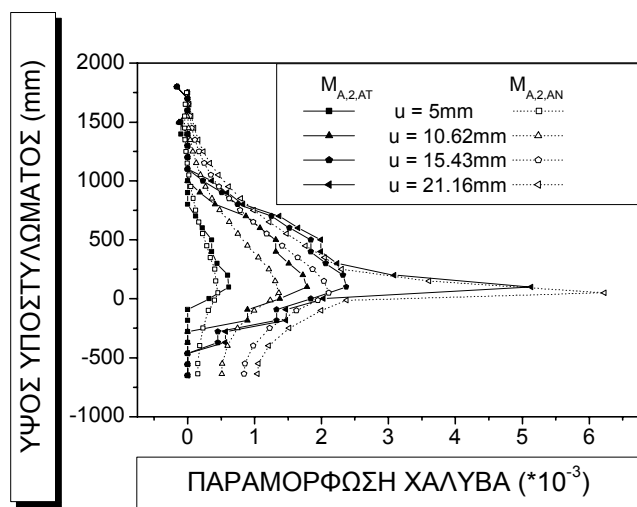
Στην συνέχεια θα γίνει μια σύγκριση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από τις αναλύσεις των προσομοιωμάτων $M_{A,2,AN}$ και $M_{A,2,AT}$ για τα οποία έχουν χρησιμοποιηθεί τα δυο προγράμματα πεπερασμένων στοιχείων (ANSYS και ATENA αντίστοιχα) και συμπεριλαμβάνουν την ολίσθηση μεταξύ του χάλυβα οπλισμού και του σκυροδέματος. Στο σχήμα 8 παρουσιάζεται το διάγραμμα μεταβολής της δύναμης με την μετατόπιση και με την παραμόρφωση και συγκρίνεται με τα πειραματικά αποτελέσματα.



Σχήμα 8. Διάγραμμα μεταβολής της δύναμης με την μετατόπιση και την παραμόρφωση για τα προσομοιώματα $M_{A,2,AN}$ και $M_{A,2,AT}$ – Σύγκριση με πειραματικά αποτελέσματα

Από το διάγραμμα δύναμης μετατόπισης (σχήμα 8) φαίνεται ότι δεν υπάρχει μεγάλη διαφορά μεταξύ των αποτελεσμάτων των αναλύσεων με τα δυο διαφορετικά προγράμματα (ANSYS και ATENA) μέχρι την μέγιστη τιμή της δύναμης. Ωστόσο μετά από το σημείο αυτό το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ANSYS αδυνατεί να ακολουθήσει τον φθίνοντα κλάδο της καμπύλης σε αντίθεση με το πρόγραμμα ATENA το οποίο φαίνεται να προβλέπει αρκετά καλά την συμπεριφορά του δοκιμίου ακόμα και στον φθίνοντα κλάδο της καμπύλης. Από το διάγραμμα μεταβολής της δύναμης με την θλιπτική παραμόρφωση στην βάση του υποστυλώματος είναι εμφανές ότι υπάρχουν διαφορές μεταξύ των αναλυτικών προβλέψεων και των πειραματικών αποτελεσμάτων οι οποίες είναι μικρότερες στην περίπτωση που χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ATENA.

Στην συνέχεια ακολουθεί ένα συγκριτικό διάγραμμα στο οποίο παρουσιάζεται η μεταβολή των παραμορφώσεων του χάλυβα κατά την διάρκεια της φόρτισης σε όλο το ύψος του υποστυλώματος και μέχρι την βάση του πεδύλου για τα προσομοιώματα $M_{A,2,AN}$ και $M_{A,2,AT}$ (σχήμα 9).



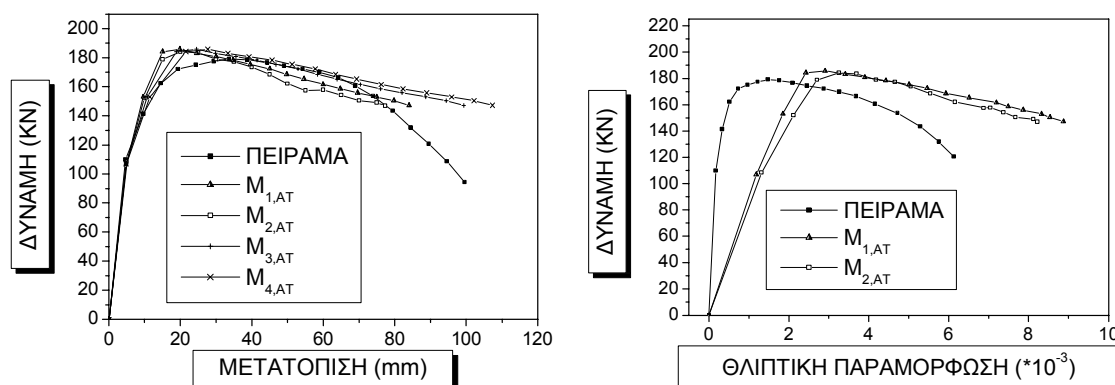
Σχήμα 9. Διάγραμμα μεταβολής των παραμορφώσεων του χάλυβα σε όλο το ύψος του στοιχείου κατά την διάρκεια της φόρτισης για τα προσομοιώματα $M_{A,2,AT}$ και $M_{A,2,AN}$

Από το σχήμα 9 φαίνεται ότι υπάρχει συμφωνία μεταξύ των τιμών των παραμορφώσεων που προκύπτουν με την χρήση των δύο διαφορετικών προγραμμάτων πεπερασμένων στοιχείων σε όλη τη διάρκεια της φόρτισης (μέχρι την μέγιστη τιμή της δύναμης, $u=21.16\text{mm}$) και σε όλο το ύψος του στοιχείου. Επιπλέον είναι εμφανής η αύξηση των παραμορφώσεων του χάλυβα κοντά στην βάση του υποστυλώματος και ειδικά για τιμή της επιβαλλόμενης μετατόπισης ίση με 21.16mm .

3.2 Δοκίμιο M

Αντίστοιχη διερεύνηση για το δοκίμιο M με χρήση του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων ANSYS έχει πραγματοποιηθεί σε παλαιότερη εργασία (Lampropoulos & Dritsos 2006). Ωστόσο δημιουργήθηκε ένα προσομοίωμα με χρήση του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων ATENA [$M_{2,AT}$] στο οποίο έχει προσομοιωθεί η ολίσθηση μεταξύ χάλυβα και σκυροδέματος με χρήση του νόμου για την τάση συνάφειας που έχει προταθεί στο CEB-FIP Model Code 1990. Επιπλέον δημιουργήθηκε και ένα άλλο προσομοίωμα στο οποίο υπάρχει πλήρη συνάφεια μεταξύ χάλυβα και σκυροδέματος [$M_{1,AT}$]. Η επίδραση της εξόλκευσης στην συμπεριφορά του στοιχείου στην περίπτωση αυτή θα συνυπολογιστεί κάνοντας χρήση των εξισώσεων που έχουν προταθεί στο CEB-fib (2003) [$M_{3,AT}$] καθώς και των εξισώσεων που υπάρχουν στην εργασία των Mazzoni et al. (2004) [$M_{4,AT}$]. Το διάγραμμα της μεταβολής της δύναμης με την μετατόπιση καθώς και η μεταβολή των

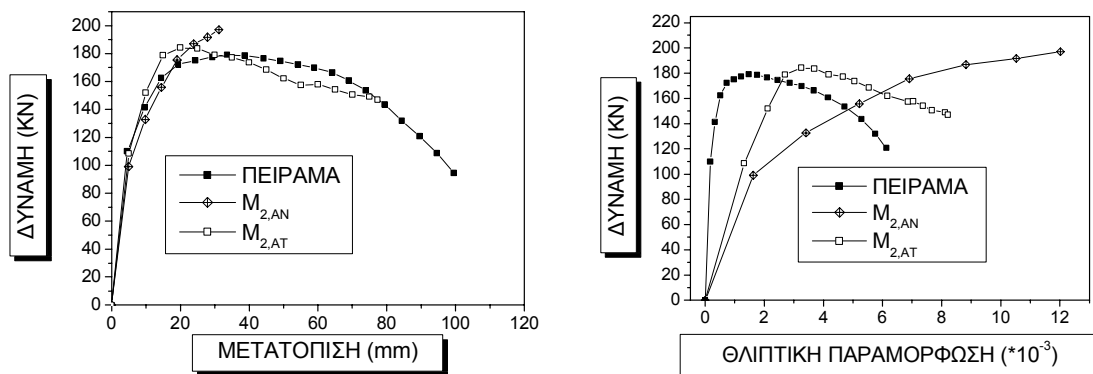
θλιπτικών παραμορφώσεων στην βάση του υποστυλώματος κατά την διάρκεια της φόρτισης συγκρίνονται με τα πειραματικά αποτελέσματα και παρουσιάζονται στο σχήμα 10.



Σχήμα 10. Διάγραμμα μεταβολής της δύναμης με την μετατόπιση και την παραμόρφωση για τα προσομοιώματα $M_{1,AT}$, $M_{2,AT}$, $M_{3,AT}$ και $M_{4,AT}$ – Σύγκριση με πειραματικά αποτελέσματα

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την ανάλυση του προσομοιώματος $M_{2,AT}$ είναι σε συμφωνία με τα πειραματικά αποτελέσματα. Ωστόσο τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τις αναλύσεις ($M_{3,AT}$ και $M_{4,AT}$) στις οποίες η επίδραση της εξόλκευσης στην συμπεριφορά του στοιχείου λαμβάνεται υπόψη με χρήση μιας αναλυτικής διαδικασίας, δεν διαφέρουν σημαντικά από τα πειραματικά αποτελέσματα. Επιπλέον είναι εμφανές ότι δεν υπάρχουν σημαντικές διαφορές μεταξύ των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από τα παραπάνω αναλυτικά προσομοιώματα.

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την ανάλυση του προσομοιώματος $M_{2,AT}$ συγκρίνονται με τα αντίστοιχα που έχουν προκύψει από ανάλυση με χρήση του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων ANSYS [$M_{2,AN}$] (Lamproulos & Dritsos 2006), καθώς και με τα αντίστοιχα πειραματικά αποτελέσματα (σχήμα 11).



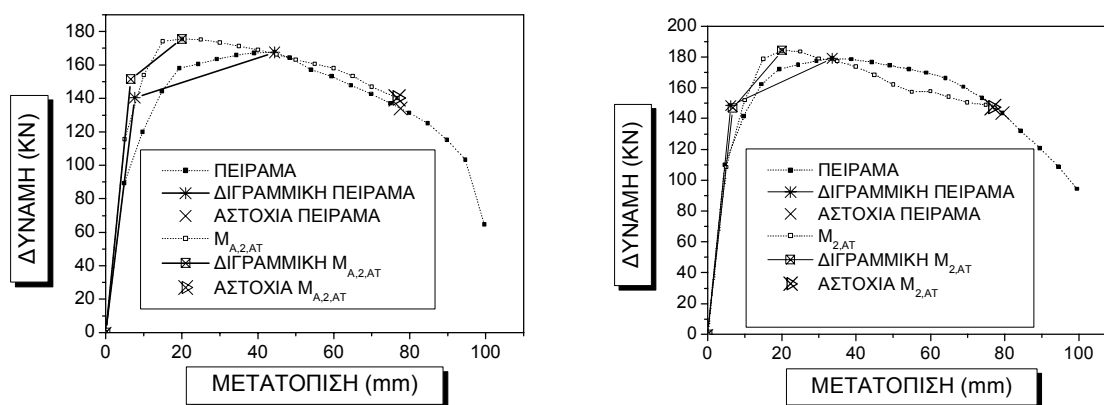
Σχήμα 11. Διάγραμμα δύναμης μετατόπισης και δύναμης – θλιπτικής παραμόρφωσης για τα δοκίμια $M_{2,AN}$ και $M_{2,AT}$ – Σύγκριση με τα πειραματικά αποτελέσματα

Από το σχήμα 11 φαίνεται ότι το διάγραμμα δύναμης – μετατόπισης που προκύπτει από τις αναλύσεις των δύο προσομοιωμάτων ($M_{2,AT}$ και $M_{2,AN}$) καθώς και από τις πειραματικές δοκιμές δεν έχουν σημαντικές διαφορές μέχρι την μέγιστη τιμή της δύναμης. Το διάγραμμα δύναμης – μετατόπισης που προέκυψε από την ανάλυση του προσομοιώματος $M_{2,AT}$ συμφωνεί με την αντίστοιχη πειραματική καμπύλη ακόμα και μετά το σημείο της μέγιστης τιμής της δύναμης. Ωστόσο οι παραμορφώσεις που προκύπτουν από τις αναλύσεις έχουν αρκετά σημαντικές

αποκλίσεις σε σχέση με τις πειραματικές τιμές και κυρίως αυτές που προκύπτουν από την ανάλυση του $M_{2,AN}$.

3.3 Σύγκριση στην φάση της διαρροής και της αστοχίας για τα δοκίμια M_A και M .

Στην συνέχεια θα υπολογιστεί το σημείο διαρροής κάθε καμπύλης, εξιδανικεύοντας την καμπύλη δύναμης – μετατόπισης μέχρι την μέγιστη τιμή της δύναμης, με μια διγραμμική καμπύλη (ATC 40 1996, ΚΑΝ.ΕΠΕ. 2005). Επιπλέον υπολογίζεται και το σημείο αστοχίας κάθε καμπύλης ως το σημείο που η δύναμη έχει μειωθεί στο 80% της μέγιστης τιμής της. Τα σημεία που προέκυψαν από τα πειραματικά αποτελέσματα (M_A , M) αλλά και από τα αποτελέσματα των αναλύσεων ($M_{A,2AT}$, $M_{2,AT}$) παρουσιάζονται στο σχήμα 12 και στον πίνακα 2. Επιπλέον στον πίνακα 3 παρουσιάζονται οι τιμές που υπολογίζονται για τον δείκτη πλαστιμότητας μετακινήσεων μ_δ .



Σχήμα 12. Εξιδανικευμένες καμπύλες δύναμης – μετατόπισης και χαρακτηριστικά σημεία διαρροής και αστοχίας

Πίνακας 2. Τιμές της δύναμης και της μετατόπισης για τα χαρακτηριστικά σημεία διαρροής και αστοχίας για τα δοκίμια M_A και M

| ΔΟΚΙΜΙΟ | ΔΙΑΡΡΟΗ | | | | ΑΣΤΟΧΙΑ | | | |
|---------|-------------|--------|-----------------|-------|-------------|--------|-----------------|-------|
| | Δύναμη (KN) | | Μετατόπιση (mm) | | Δύναμη (KN) | | Μετατόπιση (mm) | |
| | Πείραμα | ATENA | Πείραμα | ATENA | Πείραμα | ATENA | Πείραμα | ATENA |
| M_A | 140.49 | 151.53 | 7.63 | 6.55 | 134.00 | 140.32 | 77.57 | 76.67 |
| M | 148.35 | 146.87 | 6.23 | 6.76 | 143.47 | 147.44 | 79.46 | 76.86 |

Πίνακας 3. Τιμές του δείκτη πλαστιμότητας μετακινήσεων για τα δοκίμια M_A και M

| ΔΟΚΙΜΙΟ | Δείκτης Πλαστιμότητας (μ_δ) | |
|---------|--|-------|
| | Πείραμα | ATENA |
| M_A | 10.17 | 11.70 |
| M | 12.75 | 11.37 |

Από το σχήμα 12 και τις τιμές που παρουσιάζονται στον πίνακα 2 φαίνεται ότι αν και υπάρχουν διαφορές στις τιμές του μέγιστου φορτίου και της αντίστοιχης μετατόπισης μεταξύ των πειραματικών αποτελεσμάτων και των αντίστοιχων που προκύπτουν με χρήση του προγράμματος ATENA, οι διαφορές αυτές σχεδόν εξαλείφονται στα σημεία που αντιστοιχούν στην διαρροή και στην αστοχία του δοκιμίου. Επιπλέον όπως φαίνεται στον πίνακα 3, οι τιμές του δείκτη πλαστιμότητας μετακινήσεων που προκύπτουν για τα πειραματικά αποτελέσματα και για την ανάλυση είναι σε αρκετά καλή συμφωνία.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από την παραπάνω διερεύνηση προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

- Η επιρροή της εξόλκευσης του οπλισμού από τα στοιχεία θεμελίωσης έχει αρκετά σημαντική επίδραση στην συμπεριφορά των υποστυλωμάτων και με χρήση εξειδικευμένου λογισμικού (ATENA) μπορεί εύκολα να συμπεριληφθεί στην ανάλυση.
- Ωστόσο γενικότερα, η επίδραση της εξόλκευσης μπορεί να προσομοιωθεί με χρήση ειδικών στοιχείων (ελατηρίων) για την σύνδεση μεταξύ των στοιχείων του χάλυβα οπλισμού και του σκυροδέματος.
- Εναλλακτικά μπορεί να υπολογιστεί η επίδραση του φαινομένου της εξόλκευσης χρησιμοποιώντας αναλυτικές διαδικασίες. Από τα αποτελέσματα που έχουν προκύψει από την ανάλυση στην οποία έχει γίνει η παραδοχή της πλήρους συνάφειας μεταξύ του χάλυβα οπλισμού και του σκυροδέματος και χρησιμοποιώντας τις αναλυτικές διαδικασίες που περιγράφηκαν, είναι δυνατόν να υπολογιστούν οι τιμές της μετατόπισης της κορυφής του υποστυλώματος που οφείλονται στην εξόλκευση των ράβδων οπλισμού από το πέδιλο θεμελίωσης. Οι τιμές αυτές προστίθενται στις τιμές των μετατοπίσεων που προέκυψαν από την ανάλυση και προκύπτει η τελική τιμή της μετατόπισης. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν με χρήση αυτής της μεθόδου, προσεγγίζουν τα πειραματικά αποτελέσματα καλύτερα και από την ανάλυση στην οποία χρησιμοποιήθηκαν ελατήρια για την ολίσθηση μεταξύ του χάλυβα και του σκυροδέματος.
- Οι μέγιστες τιμές της ολίσθησης μεταξύ του χάλυβα και του σκυροδέματος καθώς και της παραμόρφωσης του χάλυβα εμφανίζονται στην βάση του υποστυλώματος.
- Η προσομοίωση της συμπεριφοράς των στοιχείων από οπλισμένο σκυρόδεμα μπορεί να πραγματοποιηθεί και για τον φθίνοντα κλάδο της καμπύλης δύναμης μετατόπισης με χρήση ειδικού λογισμικού (ATENA), χρησιμοποιώντας για τον φθίνοντα κλάδο του διαγράμματος τάσεων - παραμορφώσεων του σκυροδέματος σε θλίψη το νόμο που έχει προταθεί στο CEB-FIP Model Code 1990 (διαφορετικό από τον προεπιλεγμένο που διαθέτει το πρόγραμμα). Τα αποτελέσματα που προκύπτουν είναι σε συμφωνία με τα πειραματικά αποτελέσματα.
- Τα αποτελέσματα της μεταβολής των θλιπτικών παραμορφώσεων κατά την διάρκεια της φόρτισης που προέκυψαν από τις αναλύσεις έχουν αρκετά σημαντικές διαφορές σε σχέση με τα πειραματικά αποτελέσματα ιδιαίτερα με χρήση του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων ANSYS.
- Υπάρχει αρκετά καλή συμφωνία στα σημεία διαρροής και αστοχίας του στοιχείου μεταξύ των αποτελεσμάτων που προέκυψαν με χρήση του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων ATENA και των πειραματικών αποτελεσμάτων. Αυτή η συμφωνία έχει ιδιαίτερη πρακτική σημασία δεδομένου ότι έτσι μπορεί να εκτιμηθεί η πλαστιμότητα μετακινήσεων σε στοιχεία από οπλισμένο σκυρόδεμα.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Βανδώρος, Κ. 2005. Πειραματική Διερεύνηση Συμπεριφοράς Υποστυλωμάτων Ενισχυμένων με Μανδύες Οπλισμένου Σκυροδέματος υπό Ανακυκλιζόμενες Δράσεις. Διδακτορική Διατριβή. Πανεπιστήμιο Πατρών. Πάτρα.

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

Σπαθής, Α.-Λ. 2006. Πειραματική Μελέτη Σεισμικής Ενίσχυσης Κατασκευών Οπλισμένου Σκυροδέματος. Διδακτορική Διατριβή. Πανεπιστήμιο Πατρών. Πάτρα.

ANSYS 2002. User's Manual. The Element Library. ANSYS Element Reference. ANSYS Release 6.1. SAP IP. Inc..

- ATC-40 1996. Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings. Applied Technology Council. Vol. 1. California. USA.
- Barbosa, A. & Ribeiro, G. 1998. Analysis of Reinforced Concrete Structures Using ANSYS Nonlinear Concrete Model. Computational Mechanics: New Trends and Applications. Barcelona. Spain.
- Cervenka, V. Jendele, L. & Cervenka, J. 2005. ATENA Program Documentation 2005. Part 1, Theory. Prague.
- CEB-fib 2003. Seismic Assessment and Retrofit of Reinforced Concrete Buildings. Comite Eurointernational du Beton. Fib. Switzerland.
- Comite Eurointernational du Beton 1993. CEB-FIP Model Code 1990. T.Telford. London.
- Erduran, E. & Yakut, A. 2004. Drift Based Damage Functions for Reinforced Concrete Columns. Computers and Structures, Vol. 82: 121-130.
- Fanning, P. 2001. Nonlinear Models of Reinforced and Post tensioned Concrete Beams. Electronic Journal of Structural Engineering, Vol. 2: 111–119.
- Kachlakev, D. 2002. Finite Element Analysis of Historic Bridge Strengthened with FRP Laminates. Third International Conference in Infrastructure. San Francisco. California.
- Lampropoulos, A. & Dritsos, S. 2006. Numerical Prediction of Behaviour of Strengthened R.C. Columns under Cyclic Loading. Proc of 11th International Conference on Structural Faults and Repair. Edinburgh. UK. 2006.
- Mazzoni, S., Fenves, G. & Smith, J. 2004. Effects of Local Deformations on Lateral Response of Bridge Frames. Final Report to California Department of Transportation. University of California. Berkeley.
- 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.
- Santhakumar, R. & Chandrasekaran, E. 2004. Analyses of Retrofitted Reinforced Concrete Shear Beams using Carbon Fiber Composites. Electronic Journal of Structural Engineering, Vol. 4: 66-74.
- Vandoros, K. & Dritsos, S. 2006a. Interface Treatment in Shotcrete Jacketing of Reinforced Concrete Columns to Improve Seismic Performance. Structural Engineering and Mechanics, Vol 23(1): 43-61.
- Vandoros, K. & Dritsos, S. 2006b. Concrete Jacket Construction Detail Effectiveness when Strengthening RC Columns. Construction and Building Materials. (submitted).
- Wolanski, A. 2004. Flexural Behaviour of Reinforced and Prestressed Concrete Beams using Finite Element Analysis. Thesis submitted to the Faculty of the Graduate School. Milwaukee. Wisconsin.