

## Για μια μέθοδο διερεύνησης του όρου $V_{CR}$ της διατμητικής αντοχής δομικών στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος

Παπά Χαρίκλεια

Πολιτικός Μηχανικός, [pappachara8@gmail.com](mailto:pappachara8@gmail.com)

Θ. Π. Τάσιος

Ομότιμος Καθηγητής Ε.Μ.Π., [tassiost@central.ntua.gr](mailto:tassiost@central.ntua.gr)

### Εισαγωγή

Υπό μη σεισμικές συνθήκες, η συμβολή του σκυροδέματος  $V_{CR}$  στη συνολική αντίσταση  $V_R$  έναντι τέμνουσας είναι σημαντική. Στην παρούσα εργασία αναλύονται ξεχωριστά οι μηχανισμοί που συμμετέχουν στην ανάληψη τέμνουσας από το σκυρόδεμα, και γίνεται εφαρμογή της θεωρίας σε ορισμένα δοκίμια τα οποία έχουν αστοχήσει διατμητικά υπό μονοτονική φόρτιση. Έτσι προκύπτουν αριθμητικά δεδομένα για την τέμνουσα που αναλαμβάνει το σκυρόδεμα,  $V_{CR}$  με το ακόλουθο σκεπτικό. Στην συνολική αντίσταση σε τέμνουσα  $V_R$  συμμετέχουν βεβαίως και ο οπλισμός διάτμησης και το αξονικό φορτίο. Υπολογίζεται η τιμή της τέμνουσας,  $V_W$  και  $V_N$  αντίστοιχα, η οποία αναλαμβάνεται από αυτούς τους μηχανισμούς για τα πειραματικά δεδομένα των εν λόγω δοκιμίων. Έπειτα, για κάθε δοκίμιο, από την πειραματική τιμή της συνολικής αντίστασης σε τέμνουσα,  $V_R$ , αφαιρείται η τιμή της τέμνουσας που αναλαμβάνεται λόγω του οπλισμού διάτμησης,  $V_W$ , και του αξονικού φορτίου,  $V_N$ , αντίστοιχα που υπολογίστηκαν προηγουμένως. Προκύπτει έτσι η πειραματική τιμή της τέμνουσας,  $V_{CRTEST}$  που αναλήφθηκε από το σκυρόδεμα. Τελικά συγκρίνεται η τιμή της τέμνουσας,  $V_{CR}$ , που προέκυψε από την εφαρμογή της προτεινόμενης θεωρίας με την πειραματική τιμή της τέμνουσας  $V_{CRTEST}$ .

### Μηχανισμοί ανάληψης τέμνουσας

Ως γνωστόν, οι μηχανισμοί που συμμετέχουν στην ανάληψη τέμνουσας είναι οι εξής:

1) Η συμβολή του 'σκυροδέματος'. Δηλαδή:

1α) η δύναμη εμπλοκής αδρανών

Εφαρμόζεται η θεωρία του J. C. Walraven (1980), σύμφωνα με την οποία είναι δυνατός ο υπολογισμός της δύναμης που αναλαμβάνεται από τα αδρανή κατά μήκος της ρωγμής.

1β) ο μηχανισμός τόξου

Μεταφέρεται τέμνουσα δύναμη από το ένα τμήμα της δοκού στο άλλο μέσω λοξού θλιπτήρα.

1γ1) διαμήκης οπλισμός  $\rho_{tot}$  - μηχανισμός 'οιονεί βλήτρου' του θλιβόμενου οπλισμού

Η τέμνουσα δύναμη  $F$  αναλαμβάνεται από το σκυρόδεμα κάτω από αυτόν τον οπλισμό. Πρόκειται για έναν μηχανισμό που στηρίζει το πάνω άκρο του συνδετήρα.

1γ2) διαμήκης οπλισμός  $\rho_{tot}$  - μηχανισμός βλήτρου του εφελκόμενου οπλισμού

Όσο η ρωγμή διευρύνεται, ο εφελκόμενος οπλισμός προβάλλει αντίσταση στο να καμφθεί εγκάρσια στον άξονά του, μέχρις ότου εμφανιστεί ρωγμή παράλληλη στον άξονά του (ρωγμή αποκόλλησης).

1γ3) διαμήκης οπλισμός  $\rho_{tot}$  - συμβολή του εφελκόμενου οπλισμού στη μείωση του ανοίγματος της ρωγμής.

Ο εφελκόμενος οπλισμός προκαλεί μείωση του ανοίγματος της ρωγμής κατά  $\Delta w$ , οπότε αυξάνεται η αντίσταση της εμπλοκής των αδρανών διότι τα χείλη της ρωγμής παραμένουν περισσότερο σε επαφή. Έτσι αυξάνεται η τέμνουσα  $V_{CR}$  που αναλαμβάνεται από το σκυρόδεμα.

2) Η συμβολή του οπλισμού διάτμησης

Ο οπλισμός διάτμησης βέβαια είναι ο βασικότερος μηχανισμός που συμμετέχει στην ανάληψη τέμνουσας.

3) Η συμβολή του αξονικού φορτίου

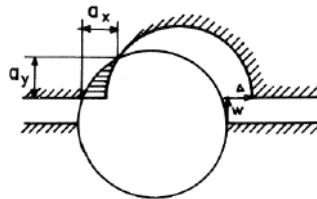
Μέσω των θλιπτικών τάσεων που αναπτύσσονται λόγω της αξονικής δύναμης στα άκρα αμφίπακτου υποστρώματος, μεταφέρεται τέμνουσα δύναμη μέσω του λοξού θλιπτήρα που δημιουργείται.

**Ανάλυση μηχανισμών ανάληψης τέμνουσας**

1) Συμβολή σκυροδέματος

1α) Δύναμη εμπλοκής αδρανών

Με βάση τη θεωρία του J. C. Walraven, (1980) το σκυρόδεμα μπορεί να θεωρηθεί ένα υλικό δύο φάσεων: ενός πυρήνα (σκληρός πολτός τσιμεντού) και ενός συνόλου αδρανών τα οποία είναι ενσωματωμένα στον πολτό. Κατά τη διάρκεια της διατμητικής μετατόπισης των μετώπων της ρωγμής, αναπτύσσονται επιφάνειες επαφής των αδρανών (Σχήμα 1) με ταυτόχρονη αλληλεμπλοκή τους στα δύο χείλη της ρωγμής, εξαιτίας της πλαστικής παραμόρφωσης του τσιμεντοπολτού.

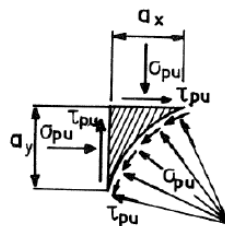


**Σχήμα 1:** Επιφάνεια επαφής μεταξύ πολτού και αδρανών

Η πιθανότητα ένα αδρανές να τμηθεί από την ρωγμή είναι η ίδια για όλα τα αδρανή. Ωστόσο όσο μεγαλύτερη είναι η διάμετρος του αδρανούς τόσο μεγαλύτερη θα είναι η συμβολή του στην ανάληψη τέμνουσας, διότι είναι μεγαλύτερη η επιφάνεια επαφής με τα αδρανή που βρίσκονται στο απέναντι χείλος της ρωγμής. Στην παρούσα εργασία λήφθηκε μέγιστη διάμετρος αδρανούς ίση με 16 mm.

Οι αντιστάσεις στο άνοιγμα ρωγμής (για κλίση έστω 35<sup>0</sup>), σε ένα μοναδιαίο πλάτους τμήμα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2, είναι:

$$\Sigma F_y = \sigma_{pu} * (\Sigma a_x - \mu * \Sigma a_y), \quad \Sigma F_x = \sigma_{pu} * (\Sigma a_y + \mu * \Sigma a_x), \quad [1]$$



**Σχήμα 2:** Τάσεις που επικρατούν στο τμήμα επαφής

Όπου:  $\Sigma F_y$ ,  $\Sigma F_x$  οι συνισταμένες των δυνάμεων στην επιφάνεια επαφής της ρωγμής στις δύο διευθύνσεις,  $\sigma_{pu}$  οι τάσεις κάθετα στην επιφάνεια επαφής των αδρανών,  $\Sigma a_x$ ,  $\Sigma a_y$  η επιφάνεια επαφής των χειλών της ρωγμής παράλληλα και κάθετα στην επιφάνεια της ρωγμής αντίστοιχα, και  $\mu$  ο συντελεστής τριβής.

Οι  $\Sigma F_y$ ,  $\Sigma F_x$  ασκούνται παράλληλα και κάθετα στην επιφάνεια της ρωγμής αντίστοιχως. Με βάση τη θεωρία του J. C. Walraven, θεωρείται ότι διεύθυνση x θεωρείται η παράλληλη με την επιφάνεια του χείλους της ρωγμής και διεύθυνση y η κάθετη σε αυτήν. Οπότε η αντίσταση των αδρανών σε ένα μοναδιαίο πλάτους τμήμα είναι ίση με  $\Sigma F = \Sigma F_y$ . Η επιφάνεια της ρωγμής είναι  $A=x*b$ , όπου x είναι το μήκος της ρωγμής και b το πλάτος του δομικού στοιχείου. Οπότε η συνολική δύναμη που αναλαμβάνουν τα αδρανή στην επιφάνεια της ρωγμής και θεωρώντας τριγωνική κατανομή της δύναμης, είναι:

$$\Sigma F_{\text{τελικό}} = (\Sigma F_y * \mu) / \gamma_c \quad [2]$$

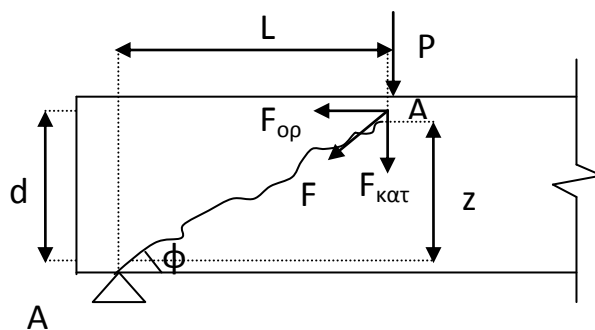
Σημειώνεται ότι θεωρήθηκε συντελεστής ασφάλειας ίσο με 1,5, διότι όλα τα παραπάνω αφορούν το σκυρόδεμα.

### 1β) Μηχανισμός τόξου

Στη θλιβόμενη ζώνη πάνω από το άκρο της λοξής ρωγμής, αναπτύσσονται ορθές τάσεις  $\sigma_x$  και διατμητικές τάσεις  $\tau$ . Λόγω της συνύπαρξης αυτών προκύπτει μια λοξή θλιπτική τάση  $\sigma_{II}$  και δημιουργείται ένας λοξός θλιπτήρας, ο οποίος καταλήγει στη στήριξη του φορέα. Με αυτόν τον τρόπο (μηχανισμός τόξου) μεταφέρεται τέμνουσα από το ένα τμήμα της δοκού στο άλλο. Συγκεκριμένα αρχικά υπολογίζεται η ροπή στην κορυφή της ρωγμής. Δεδομένου ότι θεωρήθηκε ότι η ρωγμή φτάνει μέχρι ύψος  $z = 0,9*d$ , όπου z ο εσωτερικός μοχλοβραχίονας και d το στατικό ύψος της δοκού, υπολογίζεται η οριζόντια συνιστώσα της δύναμης που μεταφέρεται με τον μηχανισμό τόξου, ως  $F_{op} = - [3]$  (Σχήμα 3). Έπειτα αφού υπολογιστεί η γωνία που σχηματίζει η ρωγμή με το οριζόντιο επίπεδο,

$\epsilon\phi = -$ , υπολογίζεται η κατακόρυφη συνιστώσα

$F_{κατ} = F_{op} * \epsilon\phi$  [4] Αυτά προφανώς για την περίπτωση που υπάρχει κατακόρυφο φορτίο.



Σχήμα 3: Λειτουργία μηχανισμού τόξου

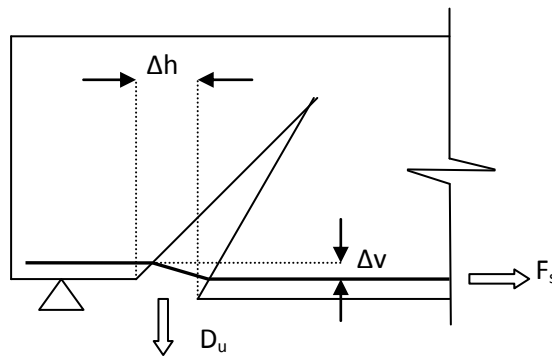
#### 1γ1) διαμήκης οπλισμός $\rho_{tot}$ - μηχανισμός 'οιονεί βλήτρου' του θλιβόμενου οπλισμού

Η λοξή θλιπτική δύναμη που κατευθύνεται στο σημείο τομής του εφελκόμενου οπλισμού με τον συνδετήρα, μέσω του δικτυώματος Moersch, προκαλεί την εξόλκευση του συνδετήρα και κατά συνέπεια την διάθεση του θλιβόμενου οπλισμού να καμφθεί εγκάρσια στον άξονά του. Όμως, χάρις

στον εξολκευόμενο συνδετήρα, μεταφέρεται δύναμη εγκάρσια προς τον διαμήκη θλιβόμενο οπλισμό, εφόσον ο συνδετήρας είναι καλά αγκυρωμένος σε αυτόν τον οπλισμό. Έτσι μέρος  $F$  της τέμνουσας δύναμης θα αναληφθεί από τον θλιβόμενο οπλισμό και μεταφέρεται στο σκυρόδεμα κάτω από τον θλιβόμενο οπλισμό, ενώ ο θλιβόμενος οπλισμός δεν εντείνεται ουσιαστικά. Πρόκειται για έναν μηχανισμό οιονεί – βλήτρου του θλιβόμενου οπλισμού. Πρόκειται για έναν πρόσθετο μηχανισμό που στηρίζει το πάνω άκρο του συνδετήρα.

1γ2) διαμήκης οπλισμός  $\rho_{tot}$  - μηχανισμός βλήτρου του εφελκόμενου οπλισμού

Κατά τη διεύρυνση της ρωγμής η μετακίνηση συνίσταται από μια κατακόρυφη και μια οριζόντια συνιστώσα  $\Delta v$  και  $\Delta h$  αντίστοιχα (Σχήμα 4). Ο διαμήκης εφελκόμενος οπλισμός δέχεται δύναμη εγκάρσια στον άξονά του, ‘κάνει γόνατο’ και εισάγει προς τα αριστερά μια τέμνουσα δύναμη βλήτρου  $D_u$ . Με την αύξηση της φόρτισης, αυξάνεται το άνοιγμα της ρωγμής, όπως και οι δύο συνιστώσες της μετακίνησης. Όσο αυξάνει η  $\Delta v$ , τόσο αυξάνει και η αντίσταση του εφελκόμενου οπλισμού (δύναμη βλήτρου)  $D_u$  μέχρι που εμφανίζεται ρωγμή παράλληλη προς το διαμήκη οπλισμό (ρωγμή αποκόλλησης του εφελκόμενου οπλισμού). Προφανώς, η αντίσταση βλήτρου είναι μεγαλύτερη όσο η απόσταση των συνδετήρων είναι μικρότερη, διότι καθώς το βλήτρο (εφελκόμενος οπλισμός) βρίσκει στήριγμα στον επόμενο συνδετήρα, αναστέλλεται η κατακόρυφη μετακίνηση του βλήτρου.



Σχήμα 4: Μηχανισμός βλήτρου του εφελκόμενου οπλισμού

Όταν η επικάλυψη δεν είναι επαρκής, ο μηχανισμός αστοχεί με την εμφάνιση ρωγμής στο σκυρόδεμα κατά μήκος του βλήτρου (ρωγμή αποσχίσεως). Η αστοχία λόγω απόσχισης του σκυροδέματος είναι εξαιρετικά ψαθυρή, καθώς συμβαίνει για πολύ μικρή τιμή της ολίσθησης και συνοδεύεται από απότομη πτώση της αναλαμβανόμενης τέμνουσας.

Η τέμνουσα που αναλαμβάνει ο εφελκόμενος οπλισμός πριν απ’ την απόσχιση (Vitzilaiou, Tassios, 1995) είναι:  $D_u = \min \{ \xi' \cdot d_b \cdot b_{ct} \cdot f_{ct}, \psi' \cdot d_b \cdot f_{ct} \cdot c / (0,66 \cdot c + d_b) \}$ , όπου  $\xi' \leq 2$  και  $\psi' \approx 5$  [5]

Όπου

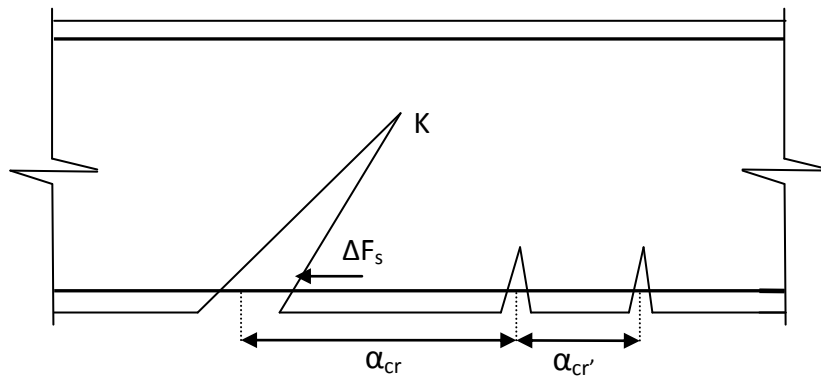
$b_{ct}$  το εφελκόμενο πλάτος, το οποίο λαμβάνεται ίσο με  $2 \cdot c$ , όπου  $c$  η επικάλυψη του εφελκόμενου οπλισμού

$f_{ct}$  η εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος

$d_b$  η διάμετρος του εφελκόμενου οπλισμού

1γ3) διαμήκης οπλισμός  $\rho_{tot}$  - συμβολή του εφελκόμενου οπλισμού στη μείωση του ανοίγματος της ρωγμής

Θεωρείται ότι έχει αναπτυχθεί διατμητική ρωγμή σε δοκό, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.



**Σχήμα 5:** Δύναμη εφελκόμενου οπλισμού μόλις ανοίξει η διατμητική ρωγμή

Μόλις ανοίξει η λοξή ρωγμή, θα αναπτυχθεί πρόσθετη δύναμη  $\Delta F_s$  του εφελκόμενου οπλισμού όπως υπαγορεύεται απ' τις αναπτυχθησόμενες μέσες τάσεις συνάφειας  $\tau_m$  κατά μήκος της μέσης απόστασης  $\alpha_{cr}$  των καμπτικών ρωγμών.

$$\alpha_{cr} = \frac{f_{ct}}{\rho_1 \tau_m} \quad , \quad \Delta \sigma_s = \tau_m \cdot \left( \frac{\alpha_{cr}}{d_b} \right) \cdot 2 = 2 \cdot \tau_m \cdot \left( \frac{\alpha_{cr}}{d_b} \right) \quad [7] \quad \text{άρα} \quad \Delta F_s = \rho_1 \cdot b \cdot h \cdot \Delta \sigma_s = 2 \cdot \rho_1 \cdot \tau_m \cdot b \cdot h \quad [8]$$

όπου

$f$  προσεγγιστικός συντελεστής αναγωγής της εφελκόμενης διατομής στη συνολική διατομή ( $f=0,60$  έως  $0,80$ )

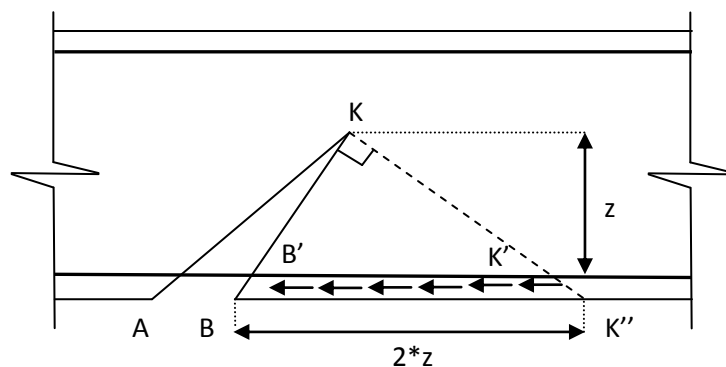
$f_{ct}$  η εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος

$d_b$  η διάμετρος του εφελκόμενου οπλισμού

$\tau_m$  η μέση τιμή των τάσεων συνάφειας κατά τη στιγμή της ολίσθησης της ράβδου: —

$\rho_1$  το ποσοστό του εφελκόμενου οπλισμού

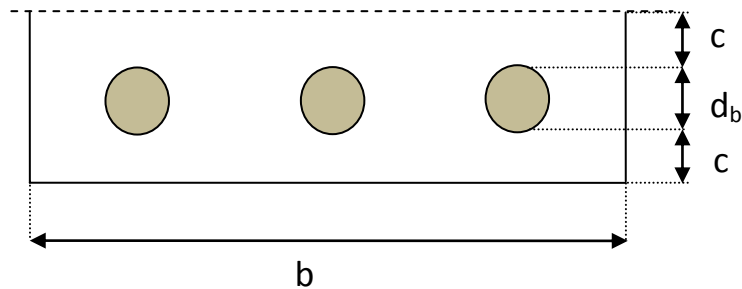
Τώρα θα εκτιμήσουμε πόσο το δεξιό χείλος της ρωγμής στρέφεται προς τα αριστερά υπό την επίδραση αυτής της πρόσθετης δύναμης του χάλυβα  $\Delta F_s$ .



**Σχήμα 6:** Τρίγωνο που σχηματίζεται και ωθεί προς το κλείσιμο της ρωγμής

Στο Σχήμα 6 θεωρήσαμε κατά Saint Venant το σημείο  $K'$  ως την δυνατόν πιο απομακρυσμένη θέση εξάντλησης της επιρροής της δύναμης  $\Delta F_s$ . Έτσι λαμβάνεται η μικρότερη (συντηρητική) δυνατή μετατόπιση του σημείου  $B'$  προς τα αριστερά.

Προς τούτο θα αρκεσθούμε εδώ προσωρινώς σε μια αδρομερή εκτίμηση. Αντί για την πλήρη εφελκόμενη διατομή, θεωρούμε έναν οιονεί ελεύθερο ελκυστήρα  $BB'K'K''$  με την ακόλουθη διατομή:



**Σχήμα 7:** Ελκυστήρας που προσομοιώνει την τοπική δράση του εφελκόμενου οπλισμού

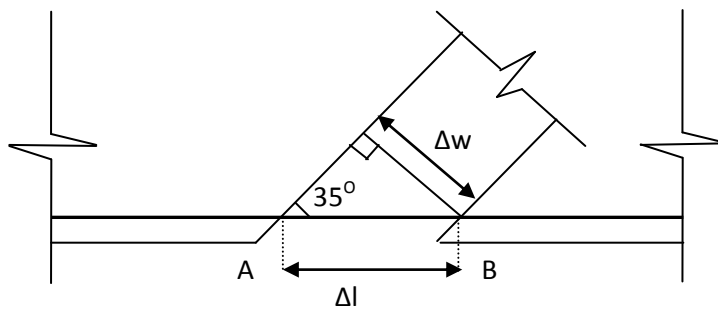
Το εμβαδόν της διατομής του ελκυστήρα σκυροδέματος είναι:

$$\Delta A_c = b \cdot (2 \cdot c + d_b) \leq 3 \cdot d_b \quad [9]$$

Η επιμήκυνση του ελκυστήρα εκτιμάται ως εξής:

$$\varepsilon = \lambda \cdot \Delta l_c = \varepsilon \cdot l = \lambda \cdot l = \lambda \cdot 2 \cdot z = 6 \cdot \rho_1 \cdot z \quad [10]$$

Όπου  $E_{ct} = E_c$  το μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος υπό εφελκυσμό.



**Σχήμα 8:** Λεπτομέρεια επιμήκυνσης εφελκόμενου οπλισμού

Με αυτή την αδρομερή προσέγγιση βρίσκουμε μείωση ανοίγματος  $w$  λοξής ρωγμής ίση με:

$$\Delta w = \Delta l \cdot \sin 35^\circ, \text{ οπότε: } \Delta w = \lambda \cdot 3.42 \cdot \rho_1 \cdot z \quad [11]$$

Ο μειωτικός συντελεστής  $\lambda \approx 0,6 (\pm 0,2)$  είναι αναγκαίος για να διορθώσει τις παραδοχές που κάναμε (i) για την τιμή της  $\Delta F_s$ , (ii) για την οιονεί ελεύθερη παραμόρφωση του ελκυστήρα του Σχήματος 7.

Έτσι, αυξανόμενου του ποσοστού  $\rho_1$  του εφελκόμενου οπλισμού, (και για τον δεδομένο οπλισμό συνδετήρων), μειώνεται το άνοιγμα της λοξής ρωγμής και επομένως αυξάνονται οι αντιστάσεις εμπλοκής αδρανών, οπότε αυξάνεται η  $V_{CR}$ .

Σημειώνεται ότι το μέγιστο άνοιγμα ρωγμής είναι η διαφορά των μηκώνσεων χάλυβα και σκυροδέματος εντός της μεταξύ των διαδοχικών ρωγμών απόστασης  $a_{cr}$ .  $w_{max} = a_{cr} \cdot (\varepsilon_s - \varepsilon_c) \approx a_{cr} \cdot \varepsilon_s$  [12]

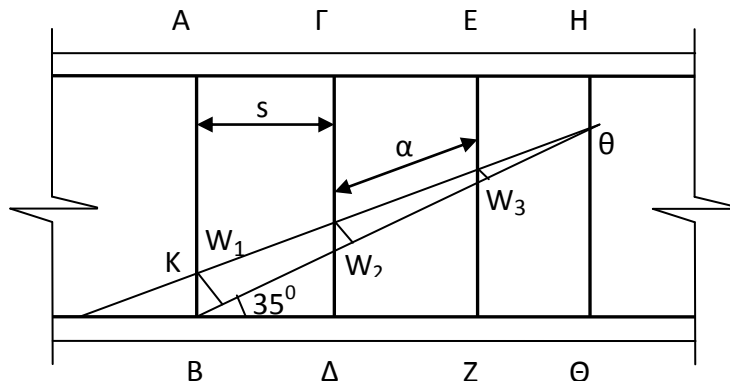
Το άνοιγμα της ρωγμής είναι ίσο με την μήκυνση του χάλυβα στην περιοχή μεταξύ των διαδοχικών ρωγμών διότι η μήκυνση του σκυροδέματος είναι πολύ μικρή.

Σημειώνεται ότι ο μηχανισμός αυτός αποτελεί μηχανισμό αποφόρτισης του συνδετήρα διότι η τάση του συνδετήρα μειώνεται λόγω της μείωσης του ανοίγματος κατά  $\Delta w$ .

## Η συμβολή του οπλισμού διάτμησης

Ο οπλισμός διάτμησης αποτελεί άλλον έναν μηχανισμό ανάληψης τέμνουσας. Στην παρούσα εργασία θεωρήθηκε ότι μόνον οι συνδετήρες που τέμνονται από τη ρωγμή εντείνονται και συμμετέχουν στην ανάληψη τέμνουσας, και ότι ο πρώτος συνδετήρας, AB (Σχήμα 9), που τέμνει η ρωγμή φτάνει στη διαρροή του,  $\sigma_{sK} = f_{yw}$ . Η τάση,  $\sigma_{swi}$ , που αναπτύσσει ο κάθε συνδετήρας που τέμνεται από τη ρωγμή υπολογίζεται με την επαναληπτική διαδικασία που αναλύεται παρακάτω (Προτεινόμενη μέθοδος ανάλυσης της περιοχής). Έπειτα, πολλαπλασιάζοντας αυτήν την τάση με την διατομή του συνδετήρα  $A_{sw} = \frac{V_{wi}}{\sigma_{swi}}$ , υπολογίζεται η τέμνουσα,  $V_{wi}$ , που αναλαμβάνει ο συγκεκριμένος συνδετήρας,

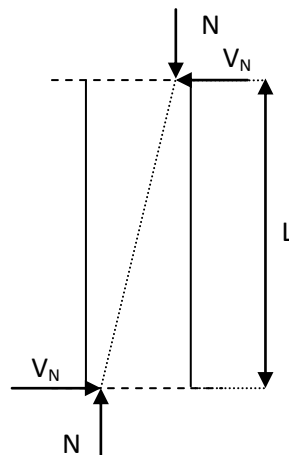
$V_{wi} = \sigma_{swi} * A_{swi}$  [14] Η συνολική τέμνουσα του οπλισμού διάτμησης,  $V_w$ , είναι το άθροισμα των επιμέρους τεμνουσών δυνάμεων,  $V_w = V_{w1} + V_{w2} + \dots + V_{wi}$  [15] Σημειώνεται ότι σε κάθε συνδετήρα που τέμνει η ρωγμή έχω διαφορετικό άνοιγμα ρωγμής,  $w_i$ , μικρότερο όσο πλησιάζουμε προς τον θλιβόμενο οπλισμό και ότι σε κάθε δοκίμιο είναι διαφορετικός ο αριθμός των συνδετήρων,  $n$ , που τέμνει η ρωγμή. Ο αριθμός των συνδετήρων,  $n$ , εξαρτάται από την απόσταση,  $s$ , των συνδετήρων και από το μήκος,  $a$ , της ρωγμής μεταξύ των συνδετήρων (Σχήμα 9). Το τελευταίο υπολογίζεται με απλή γεωμετρία.



Σχήμα 9: Δράση εγκάρσιου οπλισμού

## 2) Η συμβολή του αξονικού φορτίου

Ο Ευρωκώδικας 2 και ο CEB/FIP Model Code 90 προβλέπουν τον μηχανισμό με τον οποίον η αξονική θλιπτική δύναμη,  $N$ , συνεισφέρει στην διατμητική αντίσταση: Η διατμητική δύναμη ως γνωστόν συνοδεύεται και με ροπή κάμψης στο δομικό στοιχείο στο οποίο ασκείται. Σε μια συνήθη περίπτωση ενός αμφίπακτου υποστυλώματος υπό κάμψη, η αξονική δύναμη  $N$  θα ασκείται στα δύο άκρα του υποστυλώματος (Σχήμα 10).



Σχήμα 10: Λειτουργία αξονικής δύναμης



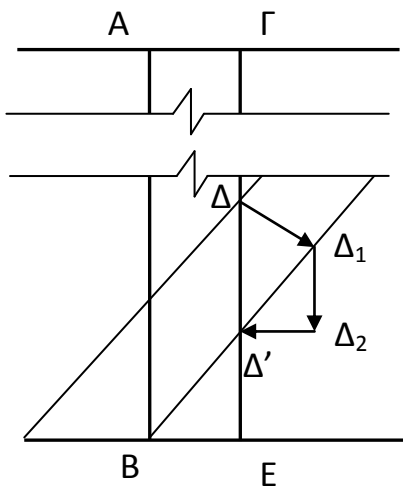
Η δύναμη που μεταφέρεται διαγωνίως σε κάθε άκρο αναλύεται σε δύο συνιστώσες, η μία παράλληλη στον άξονα του υποστρώματος και η άλλη κάθετα σε αυτόν. Η συνιστώσα που είναι παράλληλη στον άξονα του υποστρώματος είναι ίση με την αξονική δύναμη που ασκείται σε αυτό, ενώ η συνιστώσα που είναι κάθετη στον άξονα του υποστρώματος είναι η αντίσταση τέμνουσας  $V_N$ .

Η τέμνουσα δύναμη που αναλαμβάνεται με τον παραπάνω μηχανισμό είναι ίση (Δ. Μπισκίνης, Πάτρα 2007) με:  $V_N = \min(N; 0.55 \cdot A_c \cdot f_c)$  [16]

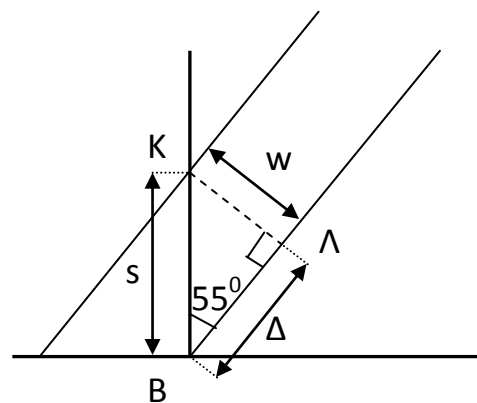
### Προτεινόμενη μέθοδος ανάλυσης της περιοχής

Θα εισαχθεί καταρχήν μια προσεγγιστική παραδοχή περί της ‘άρρηκτης’ σύνδεσης συνδετήρα και σκυροδέματος στα σημεία όπου ανοίγει η διαμητική ρωγμή. Ο συνδετήρας θα παραμείνει τελικά ευθύγραμμος και θα παρασύρει μαζί του και το αρχικό σημείο επαφής του με το σκυρόδεμα (βλέπε Σχήμα 11).

Η δύναμη που μεταφέρεται μέσω του δικτύωματος Moersch προκαλεί εξόλκευση στον συνδετήρα. Ο συνδετήρας όμως λειτουργεί ταυτόχρονα και ως βλήτρο, καθώς αντιστέκεται στην παραμόρφωση εγκάρσια στον άξονά του. Το σημείο Δ του συνδετήρα καταλήγει στο σημείο Δ’ κατακόρυφα. Η διαδρομή όμως που ακολουθεί είναι η ΔΔ1Δ2Δ’ (Σχήμα 11). Το σημείο Δ μεταφέρεται στη θέση Δ1 λόγω του ανοίγματος της ρωγμής. Έπειτα από τη θέση Δ1 κατευθύνεται στη θέση Δ2 για την συμπλήρωση της εξόλκευσης. Τελικά, από το σημείο Δ2 θα καταλήξει στο σημείο Δ’ λόγω δράσης βλήτρου του συνδετήρα. Ουσιαστικά, η συνισταμένη των Δ2Δ’ με την ΔΔ2 είναι η ΔΔ’, δηλαδή η εξόλκευση του συνδετήρα. Είναι: ΔΔ1=w=άνοιγμα ρωγμής, Δ1Δ2=κατακόρυφη μετακίνηση του συνδετήρα, Δ1Δ’=Δ=ολίσθηση επιφάνειας χείλους ρωγμής, ΔΔ’=s=εξόλκευση.



Σχήμα 11: Δράση βλήτρου συνδετήρα



Σχήμα 12: Λεπτομέρεια συνδετήρα στο σημείο τομής με τον εφελκόμενο οπλισμό

Για την υπολογιστική επίλυση ο συνδετήρας ΑΒ θα διαιρεθεί σε, λόγω χάρη, πέντε τμήματα ίσου μήκους Δx. Θεωρείται ότι στο σημείο Β (Σχήμα 11) ο συνδετήρας έχει φτάσει το όριο διαρροής του. Ακόμη θεωρείται ότι στο σημείο (έστω Α) αγκύρωσης του συνδετήρα με τον διαμήκη θλιβόμενο οπλισμό, η ολίσθηση είναι μηδενική, λόγω της αγκύρωσης. Ξεκινάμε με μια υπόθεση για την τάση  $\sigma_A$  που αναπτύσσεται στο σημείο Α, υπολογίζεται η τάση που αναπτύσσεται σε καθένα από τα πέντε επιμέρους τμήματα του συνδετήρα, κάνοντας επαναλήψεις μέχρι να ικανοποιηθεί η αρχική θεώρηση ότι ο συνδετήρας διαρρέει στο σημείο Β. Η τάση σε κάθε επόμενο τμήμα του συνδετήρα,  $\sigma_{si}$  είναι ίση με την τάση που αναπτύσσεται στο προηγούμενο τμήμα,  $\sigma_{s(i-1)}$ , αυξημένη κατά την δύναμη



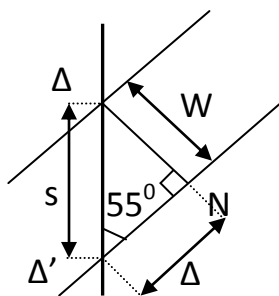
συνάφειας που αναπτύχθηκε στο προηγούμενο τμήμα,  $\tau \cdot \pi \cdot d_{bw} \cdot \Delta x$ , λόγω της ολίσθησης, ανοιγμένη στο συνολικό εμβαδόν  $A_s$ , του συνδετήρα:

$$\sigma_{si} = \sigma_{s(i-1)} + (\tau \cdot \pi \cdot d_{bw} \cdot \Delta x) / A_s \quad [17]$$

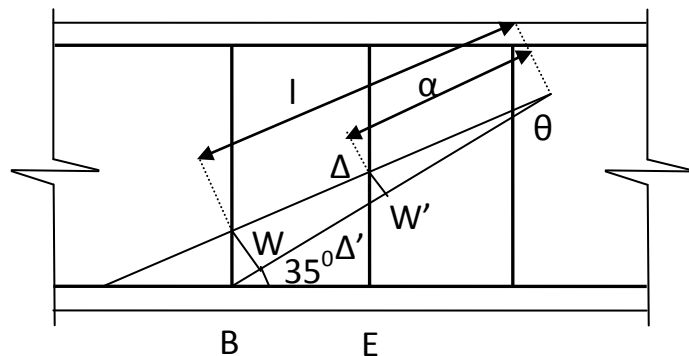
Η παραμόρφωση σε αυτό το τμήμα είναι:  $\varepsilon_{si} = \sigma_{sA} / E_s$  [18], (όπου  $E_s$  το μέτρο ελαστικότητας του χάλυβα), η δε ολίσθηση του τμήματος είναι  $s_i = \varepsilon_{si} \cdot \Delta x$  [19]. Η τιμή της τάσης συνάφειας λόγω της εξόλκευσης προκύπτει από το διάγραμμα ‘τοπικής ολίσθησης – τοπικής τάσης συνάφειας’. Στο τελευταίο τμήμα του συνδετήρα θεωρούμε το ορθογώνιο τρίγωνο του σχήματος 12. Στο τρίγωνο αυτό, το τμήμα ΚΛ είναι ίσο με το άνοιγμα της ρωγμής  $w$ , το τμήμα ΒΚ είναι ίσο με την εξόλκευση του συνδετήρα,  $s$ , και το τμήμα ΒΛ είναι ίσο με την ολίσθηση  $\Delta$  της επιφάνειας της ρωγμής. Η αρχική υπόθεση περί της τιμής  $\sigma_{sA}$  θεωρείται ικανοποιητική όταν τελικώς στο τελευταίο κάτω τμήμα του ο συνδετήρας βρεθεί να έχει φθάσει στην διαρροή του. Τη στιγμή εκείνη, χάρη στην εξόλκευση  $s$  που βρήκαμε, προσδιορίζεται και το άνοιγμα της λοξής ρωγμής  $w = s \cdot \sin 55^\circ$  (Σχήμα 13) στην περίπτωση μας.

Έπειτα εξετάζοντας τον δεύτερο συνδετήρα τον οποίο τέμνει η ρωγμή, χωρίζουμε και πάλι κάθε τμήμα άνω και κάτω από τη ρωγμή σε πέντε τμήματα. Ξεκινώντας από το σημείο Γ- σημείο τομής του θλιβόμενου οπλισμού με τον υπό εξέταση συνδετήρα (Σχήμα 11) - και υποθέτοντας μία τάση στο σημείο αυτό, ακολουθούμε την ανωτέρω διαδικασία για το πάνω και το κάτω τμήμα του συνδετήρα, και καταλήγουμε σε μία τάση στο σημείο Δ. Οπότε θα πρέπει να απαιτήσουμε 1) ότι το άνοιγμα της ρωγμής στον δεύτερο συνδετήρα είναι  $w'$  και υπολογίζεται με απλή γεωμετρία. Δηλαδή  $\varepsilon_{\theta} = -$ ,

$\varepsilon_{\theta} = -$ , άρα  $w' = -$ . Η γωνία  $\theta$  είναι βεβαίως πολύ μικρή. Το μήκος  $\alpha$  υπολογίζεται με απλή γεωμετρία γνωρίζοντας ότι η απόσταση των συνδετήρων είναι ίση με  $s$  και η γωνία της ρωγμής θεωρήθηκε ίση με  $35^\circ$  (Σχήμα 14). Έπειτα, αφού έχουμε υπολογίσει την τάση που αναπτύσσεται στο σημείο Δ, απαιτούμε 2)  $\sigma_{s\Delta} = \sigma_{s\Delta'}$ . Δηλαδή η τάση στο σημείο Δ του πρώτου τμήματος του υπό εξέταση συνδετήρα να είναι ίση με την τάση στο σημείο Δ' του δεύτερου τμήματος αυτού (το μήκος ΔΔ' είναι βέβαια πολύ μικρό). Γνωρίζοντας την τάση που αναπτύσσεται στο σημείο Δ', ξεκινώντας από υπόθεση για την τάση που αναπτύσσεται στο σημείο Ε και ακολουθώντας την ανωτέρω διαδικασία, καταλήγουμε στην τάση στο σημείο Δ'. Αν ισχύει η δεύτερη συνθήκη σταματάμε αλλιώς η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να ικανοποιείται η συνθήκη.



Σχήμα 13: Άνοιγμα ρωγμής συνδετήρα ΓΕ



Σχήμα 14: Λεπτομέρεια σημείου τομής ρωγμής και συνδετήρα ΓΕ

Υπενθυμίζεται ότι στον πιο πάνω υπολογισμό είχαμε ξεκινήσει με την παραδοχή ότι η ολίσθηση στα σημεία Γ και Ε (Σχήμα 11) είναι μηδενική διότι ο συνδετήρας είναι καλά αγκυρωμένος στο θλιβόμενο και στον εφελκυσμένο οπλισμό αντίστοιχα, δηλαδή 3)  $s_{\Gamma} = s_E = 0 \text{ mm}$ . Επίσης, σημειώνεται ότι το μήκος του συνδετήρα πάνω και κάτω από τη ρωγμή υπολογίζεται γεωμετρικώς γνωρίζοντας ότι η γωνία της ρωγμής είναι ίση με  $35^\circ$ , η απόσταση των συνδετήρων είναι ίση με  $s$ , και η ρωγμή φτάνει μέχρι ύψος  $0,9 \cdot d$ .

Το άνοιγμα της ρωγμής που βρέθηκε υπολογιστικώς θα τροφοδοτήσει τους υπολογισμούς της αντίστασης λόγω εμπλοκής αδρανών, το δε άθροισμα των δυνάμεων θα χρησιμοποιηθεί ως  $V_c$  κατά την βαθμονόμηση της προτεινόμενης μεθόδου βάσει διαθέσιμων πειραματικών δεδομένων.

### Προσπάθεια βαθμονόμησης

Επιλέχθηκαν δοκίμια από διαφορετικά άρθρα της διεθνούς βιβλιογραφίας και συγκεκριμένα:

Τα δοκίμια Δ1, Δ2, Δ3, Δ4, Δ6 επιλέχθηκαν από το άρθρο των Thomas Lima de Resende, Lidia da Conceicao Domingues Shehata και Ibrahim Abd El Malik Shehata – Shear strength of self – compacting concrete beams with small stirrups ratios, 2016. Τα δοκίμια S1 έως S7 επιλέχθηκαν από το άρθρο του Khaldoun N. Rahal – Shear behavior of reinforced concrete beams with variable thickness of concrete side cover, 2006. Τα δοκίμια AL2-N, AL2-H, AS2-N, AS2-H, AS3-N, AS3-H επιλέχθηκαν από το άρθρο των Kaiss F. Sarsam και Janan M. S. Al – Musawi – Shear design of high - and normal strength concrete beams with web reinforcement, 1992. Σημειώνεται ότι θεωρήθηκε τυχαία γωνία ρωγμής ίση με  $35^\circ$  και σε καθένα από τα δοκίμια εφαρμόστηκε η προτεινόμενη θεωρία. Τα χαρακτηριστικά των δοκιμών παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.

**Πίνακας 1.** Χαρακτηριστικά δοκιμών

ΠΙΝΑΚΑΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ													
Α/Α	ΤΕΣΤ	$L_s$	$b$	$h$	$d$	$\rho_{tot}$	$f'_c$	$d_{bw}$	$s$	$f_{vw}$	$\rho_w$	$\nu$	$V_{RTEST}$ (KN)
		(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(%)	(MPa)	(mm)	(mm)	(MPa)	(%)		
1	Δ1	1250	175	500	443	2.5	70	4.2	125	770	0.127	0	251.00
2	Δ2	1250	175	500	443	2.5	70	4.2	150	770	0.106	0	174.00
3	Δ3	1250	175	500	443	2.5	70	4.2	185	770	0.086	0	151.00
4	Δ4	1250	175	500	443	2.5	70	4.2	240	770	0.066	0	158.00
5	Δ6	1250	175	500	443	2.5	70	6.3	210	567	0.17	0	253.00
6	S1	1020	210	400	340	3.180	24.3	8	170	445	2.480	0	166.00
7	S2	1020	250	400	340	2.671	25.3	8	170	445	2.090	0	194.00
8	S3	1020	300	400	340	2.226	27.3	8	170	445	1.740	0	199.00
9	S4	1020	350	400	340	1.908	25.3	8	170	445	1.490	0	244.00
10	S5	1020	250	400	340	2.671	43.1	8	170	445	2.080	0	257.00
11	S6	1020	300	400	340	2.226	41.6	8	170	445	1.740	0	262.00
12	S7	1020	350	400	340	1.908	42.2	8	170	445	1.490	0	264.00
13	AL2-N	980	180	270	235	2.49	40.4	4	150	95.58	0.795	0	114.70
14	AL2-H	980	180	270	235	2.49	75.3	4	150	95.58	0.795	0	122.60
15	AS2-N	612.5	180	270	235	2.49	39	4	150	131.68	0.577	0	189.30
16	AS2-H	612.5	180	270	235	2.49	75.5	4	150	131.68	0.577	0	201.10
17	AS3-N	612.5	180	270	235	2.49	40.2	4	100	87.79	1.299	0	199.10
18	AS3-H	612.5	180	270	235	2.49	71.8	4	100	87.79	1.299	0	199.10

Όπου:

$L_s$  το μήκος διάτμησης

$b$  το πλάτος διατομής

$h$  το ύψος διατομής

$d$  το στατικό ύψος

$\rho_{tot}$  το ποσοστό του διαμήκους οπλισμού

$f_c$  η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος

$d_{bw}$  η διάμετρος του οπλισμού διάτμησης

$s$  η απόσταση των συνδετήρων

$f_{yw}$  το όριο διαρροής του οπλισμού διάτμησης

$\rho_w$  το ποσοστό του οπλισμού διάτμησης

$v$  η ανηγμένη αξονική δύναμη

$V_{RTEST}$  η τιμή της τέμνουσας όπου αστόχησε το εκάστοτε δοκίμιο – διατμητική αντοχή

$w$  το άνοιγμα της ρωγμής

Κάθε ένα από τα παραπάνω δοκίμια αστόχησαν σε διάτμηση υπό μονοτονική φόρτιση. Για κάθε ένα από τον μηχανισμό που συμμετέχει στην ανάληψη τέμνουσας προέκυψαν αριθμητικά αποτελέσματα, τα οποία παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.

**Πίνακας 2:** Αριθμητικά αποτελέσματα

A/A	ΤΕΣΤ	$D_u$ (KN)	$V_{COIONEI}$ ΘΛΙΒ.ΟΠΛ. (KN)	$V_{CEΦ.ΟΠΛ.}$ (KN)	$V_{CAΔP}$ (KN)	$V_{CZYH.}$ (KN)	$V_{RTEST}$ (KN)	$V_w$ (KN)	$V_{CTEST}$ (KN)	$\frac{V_{CZYH.}}{V_{CTEST}}$	$w$ (mm)
1	Δ1	0.49	0.09	20.86	163.26	184.71	251.00	28.12	222.88	0.83	0.375
2	Δ2	0.49	0.09	35.12	141.86	177.57	174.00	19.32	154.68	1.15	0.375
3	Δ3	0.49	0.09	35.12	141.86	177.57	151.00	16.06	134.94	1.32	0.375
4	Δ4	0.49	0.09	35.12	141.86	177.57	158.00	10.28	147.72	1.20	0.375
5	Δ6	0.49	0.31	16.45	164.43	181.69	253.00	23.71	229.29	0.79	0.361
6	S1	0.24	1.34	5.32	81.66	88.56	166.00	33.68	132.32	0.67	0.401
7	S2	0.25	1.34	6.43	98.74	106.76	194.00	34.59	159.41	0.67	0.411
8	S3	0.26	1.00	8.74	127.37	137.38	199.00	32.92	166.08	0.83	0.365
9	S4	0.25	1.34	9.14	138.06	148.79	244.00	34.60	209.40	0.71	0.411
10	S5	0.36	0.67	7.27	145.33	153.63	257.00	27.64	229.36	0.67	0.286
11	S6	0.35	0.67	14.07	167.82	182.91	262.00	33.23	228.77	0.80	0.312
12	S7	0.35	0.67	16.45	196.35	213.82	264.00	33.47	230.53	0.93	0.318
13	AL2-N	0.33	0.13	25.00	70.87	96.34	114.70	1.16	113.54	0.85	0.034
14	AL2-H	0.51	0.13	35.71	100.02	136.37	122.60	1.40	121.20	1.13	0.039
15	AS2-N	0.33	0.17	23.62	70.82	94.94	189.30	2.24	187.06	0.51	0.056
16	AS2-H	0.51	0.13	32.70	104.77	138.10	201.10	1.88	199.22	0.69	0.046
17	AS3-N	0.33	0.13	22.52	141.85	164.83	199.10	1.14	197.96	0.83	0.033
18	AS3-H	0.49	0.13	31.54	102.24	134.40	199.10	1.59	197.51	0.68	0.041

### Παρατηρήσεις

1. Ο οιονεί μηχανισμός βλήτρου του θλιβόμενου οπλισμού,  $V_{COIONEI}$  ΘΛΙΒΟΜΕΝΟΥ ΟΠΛΙΣΜΟΥ, εξαρτάται πλήρως από το ποσοστό του θλιβόμενου οπλισμού και το όριο διαρροής του οπλισμού διάτμησης. Παρατηρείται ότι στα δοκίμια με μεγαλύτερο ποσοστό θλιβόμενου οπλισμού και όριο διαρροής του οπλισμού διάτμησης, μεγαλύτερη τέμνουσα αναλαμβάνεται από αυτόν τον μηχανισμό. Αυτό συμβαίνει διότι όσο μεγαλύτερο είναι το ποσοστό του

- θλιβόμενου οπλισμού, τόσο πιο δύσκολη είναι η κάμψη εγκάρσια στον άξονά του. Όσο μεγαλύτερο είναι το όριο διαρροής του οπλισμού διάτμησης, τόσο περισσότερο 'επιβεβαιώνεται' η μηδενική ολίσθηση στο σημείο τομής του θλιβόμενου οπλισμού με τον συνδετήρα, οπότε δεν επιτρέπεται η κάμψη του θλιβόμενου οπλισμού, άρα αυξάνεται η τέμνουσα που αναλαμβάνει το σκυρόδεμα κάτω από τον θλιβόμενο οπλισμό.
2. Παρατηρείται ότι η συμμετοχή του εφελκόμενου οπλισμού,  $V_{\text{CEΦΕΛΚ.ΟΠΛΙΣΜΟΥ}}$ , στην ανάληψη τέμνουσας είναι σημαντική. Στη θέση της λοξής διατμητικής ρωγμής η εφελκυστική δύναμη του σκυροδέματος μηδενίζεται και αντισταθμίζεται από την εφελκυστική δύναμη του χάλυβα,  $\Delta F_s$ . Λόγω αυτής της δύναμης αναπτύσσονται διανεμημένες δυνάμεις συνάφειας που προκαλούν μείωση του ανοίγματος της ρωγμής. Οπότε το τελικό άνοιγμα της ρωγμής προκύπτει μικρότερο. Όσο μικρότερο είναι το άνοιγμα της ρωγμής τόσο μεγαλύτερη θα είναι η δύναμη που αναλαμβάνουν τα αδρανή, καθώς τα χείλη της ρωγμής έχουν μεγαλύτερη επιφάνεια επαφής. Όσο μεγαλύτερα είναι το ποσοστό του εφελκόμενου οπλισμού και η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος, τόσο μεγαλύτερη είναι η συμβολή του εφελκόμενου οπλισμού στην μείωση του ανοίγματος της ρωγμής, άρα και της δύναμης που αναλαμβάνουν τα αδρανή. Αυτό ευρίσκεται σε αντίθεση με το Model Code, όπου αναφέρεται ότι ο εφελκόμενος οπλισμός είναι ανενεργός σε αυτό το κομμάτι.
  3. Παρατηρείται ότι η εμπλοκή αδρανών,  $V_{\text{CAΔΡΑΝΩΝ}}$ , παίζει τον σημαντικότερο ρόλο στην ανάληψη τέμνουσας ( $\approx 85\%$  της συνολικής τέμνουσας). Όσο μεγαλύτερη είναι η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος, τόσο μεγαλύτερη είναι και η τέμνουσα που αναλαμβάνουν τα αδρανή και τόσο μικρότερο είναι το άνοιγμα της ρωγμής. Στο άνοιγμα της ρωγμής σημαντικό ρόλο παίζει το ποσοστό του διαμήκους και εγκάρσιου οπλισμού καθώς και το όριο διαρροής αυτών. Όσο μεγαλύτερες είναι αυτές οι τιμές, τόσο μικρότερο είναι το άνοιγμα της ρωγμής.
  4. Σημειώνεται ότι για τον υπολογισμό της τέμνουσας που αναλαμβάνεται από τον εγκάρσιο οπλισμό,  $V_w$ , λήφθηκε υπόψη ότι μόνο οι συνδετήρες που τέμνονται από τη ρωγμή συμμετέχουν στην ανάληψη τέμνουσας. Η τιμή της τέμνουσας που αναλαμβάνουν είναι ίση με την τάση που αναπτύσσεται σε κάθε συνδετήρα, όπως υπολογίστηκε από την επαναληπτική διαδικασία, πολλαπλασιασμένη με την διατομή του συνδετήρα. Όσο μεγαλύτερο είναι το όριο διαρροής των συνδετήρων και η διάμετρος αυτών, τόσο μεγαλύτερο είναι και το ποσοστό της τέμνουσας που αναλαμβάνεται από αυτούς.
  5. Στη βιβλιογραφία των δοκιμίων που εξετάζονται δεν δίνεται το φορτίο που ασκείται σε αυτά οπότε δεν είναι δυνατός ο υπολογισμός του μηχανισμού τόξου.

Προκύπτει η συνολική τέμνουσα που αναλαμβάνεται από το σκυρόδεμα, αθροίζοντας τις τιμές από κάθε επιμέρους μηχανισμό. ( $V_{\text{ΣΥΝΟΛΙΚΟ}}$ , Πίνακας 2). Είναι γνωστή από τα πειραματικά δεδομένα η τέμνουσα υπό την οποία αστοχεί το κάθε δοκίμιο,  $V_{\text{RTEST}}$ , Πίνακας 2, δηλαδή η αντοχή σε τέμνουσα του κάθε δοκιμίου. Αφού υπολογιστεί η τέμνουσα που αναλαμβάνεται από τον οπλισμό διάτμησης  $V_w$ , προκύπτει η τέμνουσα που αναλαμβάνεται από το σκυρόδεμα,  $V_{\text{CTEST}}$ . Σημειώνεται ότι σε περίπτωση που στα δοκίμια ασκούσαν αξονική δύναμη,  $N$ , θα υπολογίζονταν η τέμνουσα που αναλαμβάνεται λόγω της αξονικής δύναμης,  $V_N$ , ξεχωριστά όπως περιγράφηκε στα προηγούμενα και θα αφαιρούνταν από την συνολική τέμνουσα  $V_{\text{RTEST}}$ . Τελικά γίνεται σύγκριση της τέμνουσας  $V_{\text{CTEST}}$  όπως προέκυψε από τα πειραματικά δεδομένα με την τέμνουσα που αναλαμβάνει το σκυρόδεμα,  $V_{\text{ΣΥΝΟΛΙΚΟ}}$ , εφαρμόζοντας την προτεινόμενη θεωρία. Παρουσιάζεται επίσης η σύγκριση της τέμνουσας που προκύπτει από την προτεινόμενη θεωρία με την τέμνουσα που ορίζει ο Ευρωκώδικας 2 στον Πίνακα 3. Ο Ευρωκώδικας 2 ορίζει ποια θα είναι η τέμνουσα που αναλαμβάνει το σκυρόδεμα υπό μονοτονική φόρτιση. Συγκεκριμένα είναι:

$$VR_{d,c} = [CR_{d,c} * k * (100 * \rho_l * f_{ck})^{1/3} + k_1 * \sigma_{cp}] b_w * d \quad [20], \text{ με ελάχιστη τιμή την}$$

$$VR_{d,c} = (v_{\min} + k_1 \cdot \sigma_{cp}) b_w \cdot d \quad [21]$$

όπου:  $f_{ck}$  σε MPa,  $k = 1 + \frac{d}{100} \leq 2.0$  με  $d$  σε mm,  $\rho_1 = \frac{A_{sl}}{A_c} \leq 0.02$ ,  $A_{sl}$  είναι το εμβαδόν του εφελκυσμένου οπλισμού που εκτείνεται σε απόσταση  $\geq (l_{bd} + d)$  πέρα από τη θεωρούμενη διατομή,  $b_w$  είναι το ελάχιστο πλάτος της διατομής στην εφελκυσόμενη ζώνη [mm],  $\sigma_{cp} = N_{Ed}/A_c < 0,2 f_{cd}$  [MPa],  $N_{Ed}$  είναι η αξονική δύναμη στη διατομή [σε N] ( $N_{Ed} > 0$  για θλίψη).

Η επιρροή των επιβεβλημένων παραμορφώσεων στη  $N_{Ed}$  μπορεί να αγνοείται.

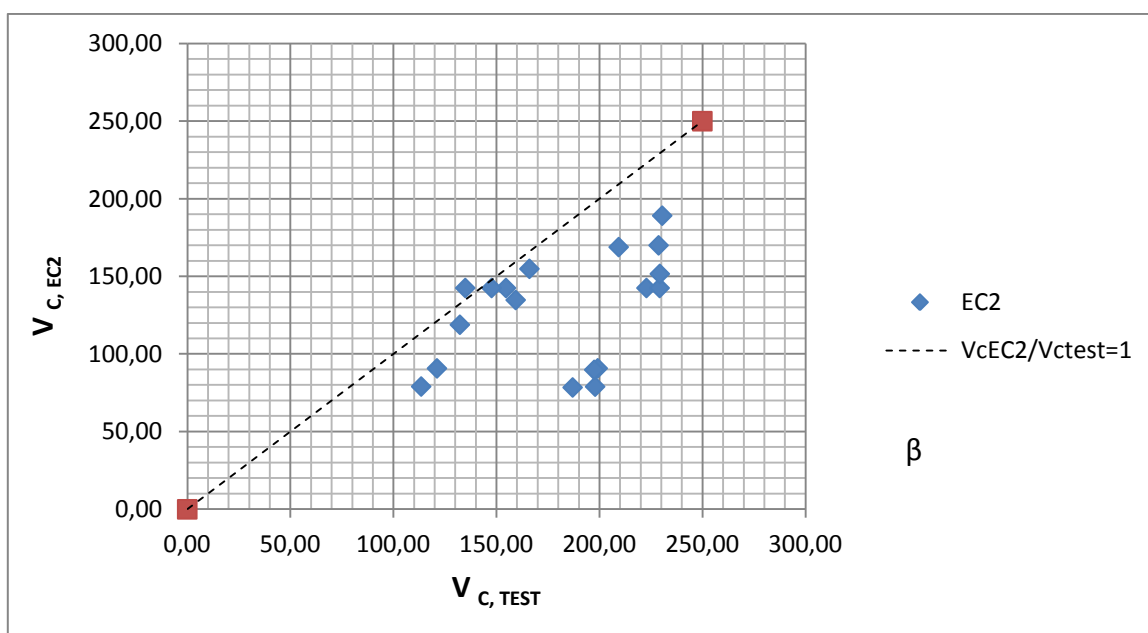
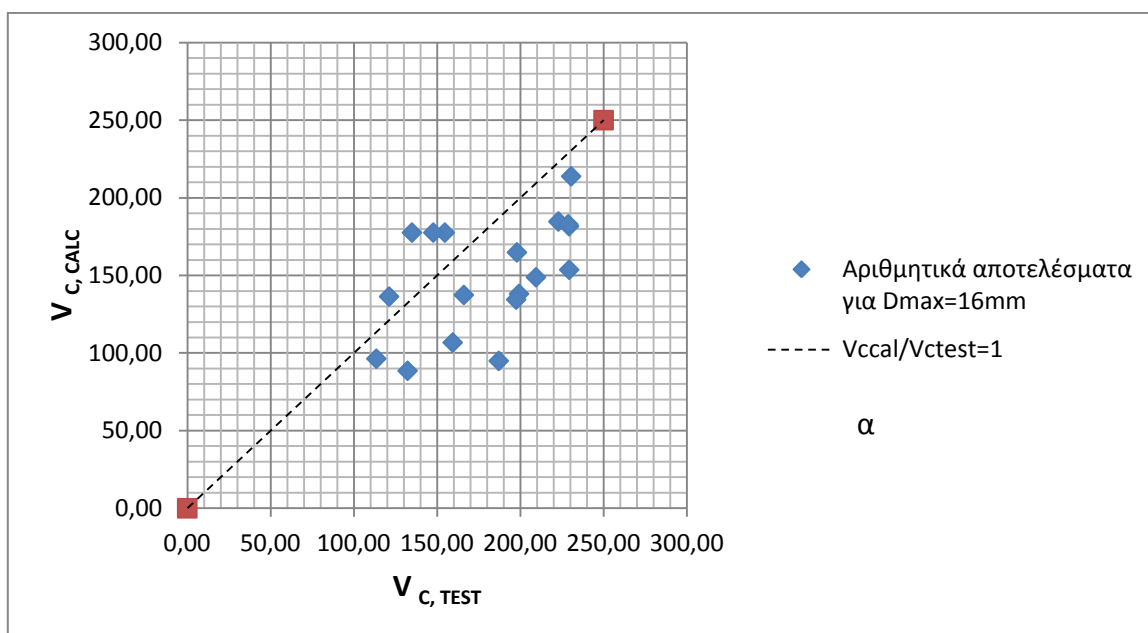
$A_c$  είναι το εμβαδόν της διατομής του σκυροδέματος [mm<sup>2</sup>]

$VR_{d,c}$  σε [N]

**Πίνακας 3:** Σύγκριση προτεινόμενης θεωρίας με Ευρωκώδικα 2

A/A	ΤΕΣΤ	$V_{CEC2}$ (KN)	$V_{CTEST}$ (KN)	$\frac{V_{CEC2}}{V_{CTEST}}$
1	Δ1	142.55	222.88	0.64
2	Δ2	142.55	154.68	0.92
3	Δ3	142.55	134.94	1.06
4	Δ4	142.55	147.72	0.96
5	Δ6	142.55	229.29	0.62
6	S1	118.88	132.32	0.90
7	S2	134.81	159.41	0.85
8	S3	154.91	166.08	0.93
9	S4	168.90	209.40	0.81
10	S5	151.66	229.36	0.66
11	S6	170.03	228.77	0.74
12	S7	189.13	230.53	0.82
13	AL2-N	79.10	113.54	0.70
14	AL2-H	90.78	121.20	0.75
15	AS2-N	78.49	187.06	0.42
16	AS2-H	90.83	199.22	0.46
17	AS3-N	79.01	197.96	0.40
18	AS3-H	89.83	197.51	0.45

Στο Σχήμα 15 γίνεται εποπτική σύγκριση των ευρημάτων σ' αυτό το προκαταρκτικό στάδιο της έρευνας. Φαίνεται ότι ο EC2 δίνει ικανοποιητικές μέσες τιμές.



**Σχήμα 15:** Γραφική σύγκριση υπολογιστικών έναντι πειραματικών αποτελεσμάτων: α) της προτεινόμενης θεωρίας (χωρίς συντελεστές ασφαλείας υλικών), β) κατά EC2 (με τιμές σχεδιασμού)

### Συμπεράσματα

Φαίνεται ότι η προτεινόμενη μέθοδος υπολογισμού της συμβολής του ‘σκυροδέματος’ στην αντίσταση διατομών έναντι αστοχίας από τέμνουσα, παρουσιάζει ορισμένα θετικά στοιχεία.

α) Επιτρέπει την υπολογιστική προσέλαση του μεγέθους  $V_c$ , αντί για την ως τώρα εμπειρική μόνον εκτίμησή του.

β) Αιτιολογεί και τον ρόλο των επιμέρους παραμέτρων που υπεισέρχονται στις εμπειρικές φόρμουλες EC2 και ACI.

γ) Η μέχρι στιγμής περιορισμένη βαθμονόμηση των αριθμητικών αποτελεσμάτων της προτεινόμενης μεθόδου, είναι κάπως ενθαρρυντική. Οι δε υπολογιζόμενες τιμές είναι μάλλον συντηρητικές. Αλλά είναι ακόμη πολύ λίγα τα πειραματικά αποτελέσματα που μελετήθηκαν.

δ) Η μέθοδος, τέλος, επιτρέπει την μελέτη των συνεπειών της ανακύκλησης επιβαλλομένων παραμορφώσεων πάνω στον κάθε φυσικό μηχανισμό που υπεισέρχεται.

ε) Όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των συνδετήρων που τέμνουν τη ρωγμή, τόσο μικρότερο είναι το άνοιγμα της ρωγμής, οπότε τόσο μεγαλύτερη είναι η τέμνουσα που αναλαμβάνουν τα αδρανή.

## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

- 1) Θ. Π. Τάσιος - Θεωρία Σχεδιασμού Επισκευών και Ενισχύσεων, 2014
- 2) J. C. Walraven, H. W. Reinhardt - Theory and experiments on the mechanical behavior of cracks in plain and reinforced concrete subjected to shear loading, 1980
- 3) Thomas Lima de Resende, Lidia da Conceicao Domingues Shehata και Ibrahim Abd El Malik Shehata – Shear strength of self – compacting concrete beams with small stirrups ratios, Journal of the fib, Structural Concrete, Vol. 17, March 2016, p. 3-10.
- 4) Boyan I. Mihaylov, Evan C. Bentz και Michael P. Collins - Behavior of large deep beams subjected to monotonic and reversed cyclic shear, 2010.
- 5) ACI Structural Journal Technical Paper – Shear strength of high performance concrete beams
- 6) Khaldoun N. Rahal – Shear behavior of reinforced concrete beams with variable thickness of concrete side cover, 2006
- 7) J. Walraven and J. Stroband - Shear Friction in High-Strength Concrete, 1980
- 8) Χ. Παππά - Συμβολή στη διερεύνηση της εξασθένησης των μηχανισμών αντίστασης σε τέμνουσα υπό ανακυκλιζόμενη ένταση μετά τη διαρροή (με έμφαση στην αντίσταση Vcd σκυροδέματος), 2014