

# Αντοχή, δυσκαμψία και ικανότητα παραμόρφωσης βάθρων γεφυρών

Δ.Ε. Μπισκίνης

Υποψήφιος Διδάκτορας, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών

Μ.Ν. Φαρδής

Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών

*Λέξεις κλειδιά:* ανακυκλιζόμενη φόρτιση, βάθρα γεφυρών, δυσκαμψία, ικανότητα παραμόρφωσης, σεισμικός σχεδιασμός γεφυρών.

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ:** Τα βάθρα γεφυρών συνήθως έχουν κυκλική ή κοίλη ορθογωνική διατομή. Για το λόγο αυτό, οι σχέσεις υπολογισμού που έχουν αναπτυχθεί για την αντοχή, τη δυσκαμψία και την ικανότητα παραμόρφωσης υποστυλωμάτων και δοκών ορθογωνικής διατομής, δεν μπορούν να εφαρμοστούν αυτούσιες σε βάθρα. Στην παρούσα εργασία πειράματα βάθρων κυκλικής και κοίλης ορθογωνικής διατομής απ' την διεθνή βιβλιογραφία χρησιμοποιούνται για την ανάπτυξη προσομοιωμάτων υπολογισμού: α) της ροπής διαρροής του βάρου, β) της παραμόρφωσης του βάρου στη διαρροή, γ) της δυσκαμψίας του, δ) της διατμητικής αντοχής με βάση τον εγκάρσιο οπλισμό ή το σκυρόδεμα σε λοξή θλίψη, και ε) της παραμόρφωσης αστοχίας του βάρου σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση. Η βάση δεδομένων περιλαμβάνει 305 πειράματα σε βάθρα κυκλικής διατομής και 169 πειράματα σε βάθρα διατομής κοίλης ορθογωνικής ή παρόμοιας (Τ, Η κλπ).

## 1 ΒΑΘΡΑ ΚΥΚΛΙΚΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ

Η βάση δεδομένων βάθρων κυκλικής διατομής περιλαμβάνει συνολικά 305 πειράματα, απ' τα οποία τα 251 εμφάνισαν καμπτική διαρροή. Το μήκος διάτμησης,  $L_s$  (λόγος ροπής προς τέμνουσα), των δοκιμίων ποικίλει από 0.3 έως 9.1m (1.54m κατά μέσο όρο), η διάμετρος από 0.15 έως 1.83m (0.47m κατά μέσο όρο) και ο λόγος διάτμησης,  $L_s/D$ , από 1.0 έως 10 (με μέσο όρο 3.25). Το ποσοστό διαμήκους οπλισμού,  $\rho_l$ , ποικίλει μεταξύ 0.5 και 5.7% (2.5% κατά μέσο όρο) και το ποσοστό εγκάρσιου οπλισμού,  $\rho_t$ , μεταξύ 0.1 και 8.8% (με μέσο όρο 0.85%). Η αντοχή σκυροδέματος,  $f_c$ , καλύπτει ένα εύρος τιμών από 19 έως 90 MPa (με μέσο όρο 35 MPa), ενώ το ανηγμένο αξονικό φορτίο,  $\nu=N/Af_c$ , ποικίλει μεταξύ -0.1 (εφελκυσμός) και 0.7 (μέσος όρος 0.15).

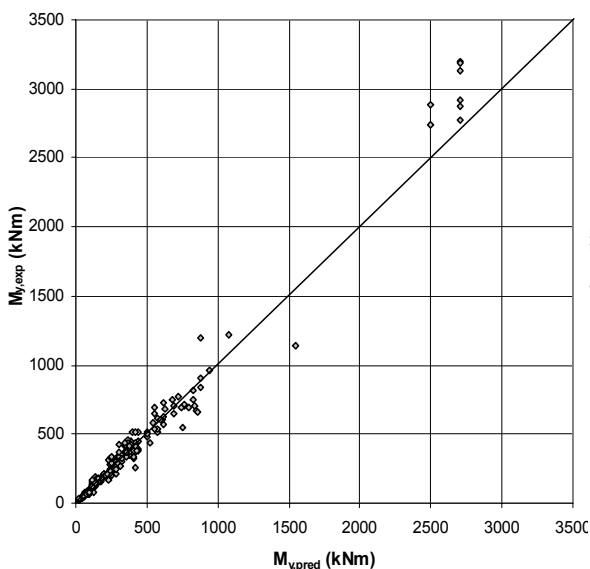
### 1.1 Ροπή και παραμόρφωση διαρροής – Ενεργός Δυσκαμψία

Στα πειράματα που οδήγησαν σε καμπτική διαρροή, η πειραματική διαρροή ελήφθη στη γωνία ενός διγραμμικού διαγράμματος ροπών-μετακινήσεων που περιβάλλει τους πειραματικούς βρόχους δύναμης – μετατόπισης. Λόγω της κατανομής του διαμήκους οπλισμού στη περίμετρο της κυκλικής διατομής, η μετάβαση απ' τη διαρροή της 1<sup>ης</sup> ακραίας ράβδου στη μέγιστη αντοχή γίνεται πολύ πιο βαθμιαία απ' ότι σε ορθογωνικές διατομές, καθώς οι εφελκυσμένες ράβδοι διαρρέουν σταδιακά. Η θεωρητική τιμή της ροπής διαρροής,  $M_y$ , καθώς και η τιμή της καμπυλότητας στην διαρροή,  $\phi_y$ , υπολογίζονται από ανάλυση διατομής με τις εξής παραδοχές:

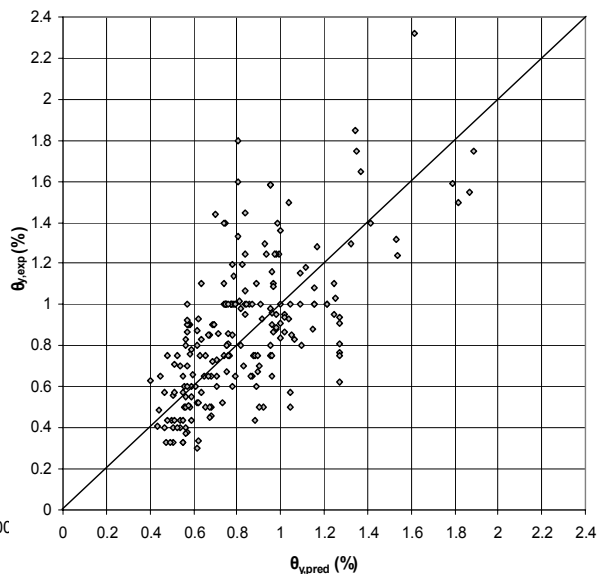
1. Επιπεδότητα διατομών.
2. Ελαστική-απόλυτα πλαστική συμπεριφορά  $\sigma$ - $\epsilon$  του χάλυβα οπλισμού.
3. Παραβολική σχέση  $\sigma$ - $\epsilon$  για το σκυρόδεμα μέχρι την αντοχή του,  $f_c$ , σε παραμόρφωση  $\epsilon_{co}=0.002$ , ακολουθούμενη από οριζόντιο κλάδο.
4. Κριτήριο διαρροής βασιζόμενο στα παρακάτω, ανάλογα με το τι συμβαίνει σε μικρότερη ροπή:

- διαρροή του διαμήκους οπλισμού στο ακραίο 1/3 της εφελκόμενης ζώνης, ή
- παραμόρφωση ακραίας θλιβόμενης ίνας σκυροδέματος,  $\varepsilon_c = 0.003$ .

Το ύψος της θλιβόμενης ζώνης υπολογίζεται από ισορροπία δυνάμεων, με επαναληπτική διαδικασία (μέθοδος Newton-Raphson). Κατόπιν υπολογίζονται οι τιμές των  $\phi_y$  και  $M_y$ , η τελευταία από ισοδυναμία ροπών στη διατομή. Η τιμή της  $M_y$  που υπολογίζεται με αυτό το τρόπο δίνει πολύ καλή συμφωνία με τις πειραματικές μετρήσεις, όπως φαίνεται στην Εικόνα 1 και απ' τα στατιστικά στοιχεία του Πίνακα 1.



Εικόνα 1. Σύγκριση πειραματικής και θεωρητικής ροπής διαρροής, Κυκλικά βάρθρα.



Εικόνα 2. Σύγκριση πειραματικής και θεωρητικής γωνίας στροφής χορδής στη διαρροή. Κυκλικά βάρθρα., Εξ. (1).

Πίνακας 1. Μέσος όρος\*, διάμεσος\* και συντελεστής μεταβλητότητας του λόγου πειραματικής προς θεωρητική τιμή χαρακτηριστικών μεγεθών. Βάρθρα κυκλικής διατομής.

Ποσότητα	Αριθμός πειραμάτων	Μέσος όρος*	Διάμεσος*	Συντελεστής μεταβλητότητας
$M_{y,exp}/M_{y,pred}$	247	1.01	1.00	13.35%
$\theta_{y,exp}/\theta_{y,E\xi}(1)$	220	1.085	1.035	30.7%
$(M_y L_s / 3 \theta_y)_{exp} / (M_y L_s / 3 \theta_y)_{E\xi}(1),(2)$	213	1.025	0.97	32.2%
$(M_y L_s / 3 \theta_y)_{exp} / EI_{eff,E\xi}(3)$	213	1.045	0.995	27.7%
$V_{R,exp} / V_{R,E\xi}(4\alpha),(5)$	66	1.05	1.025	16.55%
$V_{R,exp} / V_{R,E\xi}(4\beta),(5)$	66	1.02	1.015	16.15%
$\theta_{u,exp} / \theta_{u,E\xi}(6)-(11)$	96	1.025	1.005	30.5%

\*Ο διάμεσος είναι περισσότερο αντιπροσωπευτικός της μέσης τάσης απ' ότι ο μέσος όρος, καθώς ο διάμεσος του αντίστροφου λόγου (θεωρητική προς πειραματική τιμή) είναι ο αντίστροφος του διαμέσου του λόγου πειραματική προς θεωρητική τιμή, ενώ ο μέσος όρος και τον δύο είναι συνήθως μεγαλύτερος του διαμέσου.

Το μήκος διάτμησης,  $L_s$ , ισούται με το λόγο ροπής προς τέμνουσα στην ακραία διατομή του μέλους. Η μετατόπιση του βάρθρου στην άκρη του μήκους διάτμησης, ως προς την εφαπτόμενη του άξονα του βάρθρου στην ακραία διατομή, διαιρεμένη με το  $L_s$ , δίνει τη γωνία στροφής χορδής στη διαρροή  $\theta_y$ . Η εξίσωση που ακολουθεί έχει προσαρμοστεί στις πειραματικές τιμές της  $\theta_y$ , όπως αυτές ελήφθησαν απ' την διγραμμική προσέγγιση του πειραματικού βρόχου  $M-\theta$  και είναι αντίστοιχη των εξισώσεων για δοκούς, υποστυλώματα και τοιχώματα ορθογωνικής διατομής (Μπισκίνης & Φαρδής 2006):

$$\theta_y = \varphi_y \frac{L_s + a_V z}{3} + 0.0022 \cdot \max\left(0, \left(1 - \frac{L_s}{6D}\right)\right) + a_{sl} \frac{\varphi_y d_b f_y}{8\sqrt{f_c}} \quad (f_y, f_c \text{ σε MPa}) \quad (1)$$

όπου:

$z \approx 0.9D$  ο εσωτερικός μοχλοβραχίονας των δυνάμεων,

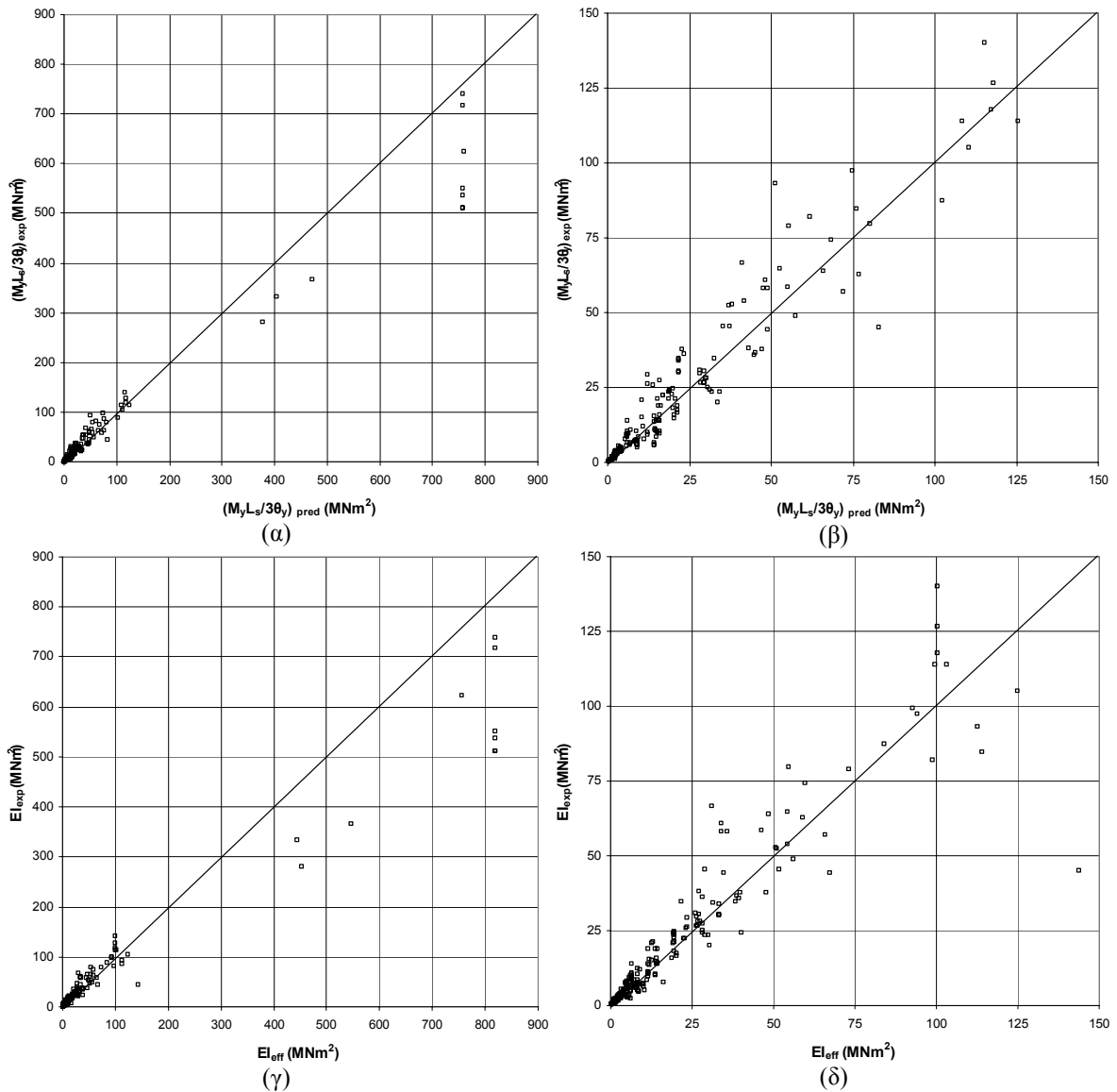
$D$  η διάμετρος του βάρου,

$d_b$  η διάμετρος των ράβδων του διαμήκου οπλισμού,

$f_y$  η τάση διαρροής του διαμήκου οπλισμού,

$f_c$  η αντοχή του σκυροδέματος.

$a_{sl}$  συντελεστής ίσος με 1 γενικώς, ή με 0 αν δεν είναι δυνατή η ολίσηση των διαμήκων ράβδων απ' την αγκύρωση τους πέραν της ακραίας διατομής του βάρου.



Εικόνα 3. Σύγκριση πειραματικής προς θεωρητική ενεργό δυσκαμψία στη διαρροή: (α) Εξ. (2); (β) λεπτομέρεια του (α); (γ) Εξ. (3); (δ) λεπτομέρεια του (γ).

Οι τιμές του  $\theta_y$  που προκύπτουν απ' την Εξ. (1) συγκρίνονται στην Εικόνα 2 με τις πειραματικές τιμές, για τα 214 πειράματα στα οποία προσαρμόστηκε η εξίσωση. Στον Πίνακα 1

δίνονται τα στατιστικά στοιχεία του λόγου των δύο αυτών ποσοτήτων, καθώς και αυτά του λόγου πειραματικής προς θεωρητική ενεργό δυσκαμψία στην διαρροή, απ' τη σχέση:

$$EI_{eff} = \frac{M_y L_s}{3\theta_y} \quad (2)$$

Για να εφαρμοσθεί η Εξ. (2) πρέπει να είναι γνωστός ο οπλισμός του βάρου. Για τη διευκόλυνση της ανάλυσης γεφυρών πριν τη διαστασιολόγηση των βάρων, αναπτύχθηκε και μία καθαρά εμπειρική σχέση για την ενεργό δυσκαμψία, ως συνάρτηση του λόγου διάτμησης,  $L_s/h$ , του ανηγμένου αξονικού φορτίου,  $\nu=N/A_c f_c$ , της δυσκαμψίας της αρηγγάτωτης διατομής,  $(EI)_c$ , και της δυνατότητας ή μη ολίσθησης των ράβδων απ' την περιοχή αγκύρωσης πέραν της ακραίας διατομής ( $\alpha_{sl}=1$  και  $\alpha_{sl}=0$  αντίστοιχα):

$$EI_{eff} = 0.09 \left[ 1 + 0.7 \left( \frac{L_s}{D} \right) \right] (1 + 3.5\nu)(1 - 0.37\alpha_{sl})(EI)_c \quad (3)$$

Όπως φαίνεται απ' την Εικόνα 3 και τον Πίνακα 1 η Εξ. (3) δίνει παρόμοια αξιοπιστία με την Εξ. (2), όμως μόνο στο πεδίο τιμών των μεταβλητών που καλύπτεται από τη βάση δεδομένων (βλ. αρχή Κεφ. 1).

## 1.2 Διατμητική αντοχή υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση

Η διαστασιολόγηση των βάρων θα πρέπει να εξασφαλίζει ένα περιθώριο ασφάλειας έναντι διατμητικής αστοχίας υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση μετά την καμπτική διαρροή, λαμβάνοντας υπ' όψη ότι η διατμητική αντοχή,  $V_R$ , στην περιοχή της πλαστικής άρθρωσης μειώνεται με την ανακύκλιση. Αν και αυτός ο τρόπος αστοχίας είναι περισσότερο πλάστιμος απ' την διατμητική αστοχία που προηγείται της καμπτικής διαρροής, θα πρέπει να αποφεύγεται, καθώς περιορίζει την ικανότητα παραμόρφωσης του βάρου σε σχέση με αυτήν που θα ανέπτυξε για καθαρά καμπτική αστοχία. Τα κυκλικά βάρη, έχουν μόνον έναν περιμετρικό συνδετήρα και είναι περισσότερο τρωτά έναντι διατμητικής αστοχίας σε σύγκριση με βάρη με πολλαπλούς συνδετήρες. Οι Biskinis & Συνεργάτες (2004) έχουν προτείνει δύο εναλλακτικά (και πρακτικά ισοδύναμα) προσομοιώματα για τον υπολογισμό της διατμητικής αντοχής της περιοχής της πλαστικής άρθρωσης:

$$V_R = \frac{h-x}{2L_s} \min(N; 0.55A_c f_c) + 0.16 \cdot (1 - 0.095 \min(5; \mu_{\theta}^{pl})) \max(0.5, 100\rho_{tot}) \left( 1 - 0.16 \min\left(5; \frac{L_s}{h}\right) \right) \sqrt{f_c A_c + V_w} \quad (4a)$$

$$V_R = \frac{h-x}{2L_s} \min(N; 0.55A_c f_c) + (1 - 0.05 \min(5; \mu_{\theta}^{pl})) \left[ 0.16 \max(0.5; 100\rho_{tot}) \left( 1 - 0.16 \min\left(5; \frac{L_s}{h}\right) \right) \sqrt{f_c A_c + V_w} \right] \quad (4b)$$

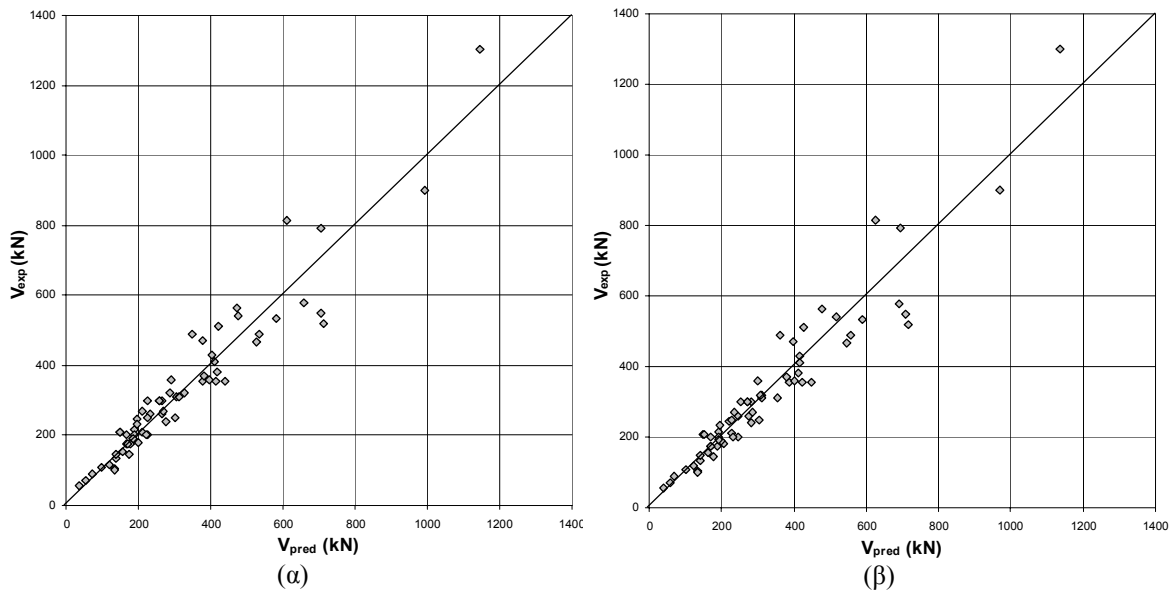
όπου:

- $h$  το ύψος της διατομής, δηλαδή η διάμετρος  $D$ ,
- $x$  το ύψος της θλιβόμενης ζώνης,
- $N$  η αξονική δύναμη θλίψης (θετική, ίση με 0 για εφελκυσμό),
- $L_s/h$  =  $M/Vh$  το μήκος διάτμησης,
- $A_c$  το εμβαδόν του πυρήνα της διατομής μέσα απ' τον άξονα των συνδετήρων,
- $f_c$  η αντοχή σκυροδέματος σε MPa,
- $\rho_{tot}$  το συνολικό ποσοστό διαμήκους οπλισμού,
- $\mu_{\theta}^{pl}$  =  $\mu_{\theta} - 1$ , ο λόγος της πλαστικής γωνίας στροφής χορδής κατά τη διατμητική αστοχία μετά την καμπτική διαρροή, προς την γωνία στροφή χορδής στην διαρροή,  $\theta_y$ , Εξ. (1), και
- $V_w$  η συμβολή του εγκάρσιου οπλισμού στη διατμητική αντοχή. Για κυκλικά βάρη είναι:

$$V_w = \frac{\pi}{2} \frac{A_{sw}}{s_h} f_{yw} (D - 2c) \quad (5)$$

όπου  $A_{sw}$  είναι η διατομή του συνδετήρα,  $f_{yw}$  η αντοχή του,  $s_h$  η αξονική απόσταση διαδοχικών συνδετήρων και  $c$  η επικάλυψη σκυροδέματος.

Στην Εικόνα 4 συγκρίνονται οι προβλέψεις των Εξ. (4α), (4β) και (5) με τις πειραματικές τιμές στα 66 πειράματα ανακυκλιζόμενης φόρτισης βάρων κυκλικής διατομής που αστόχησαν διατμητικά μετά την καμπτική διαρροή. Στον Πίνακα 1 δίνονται τα στατιστικά στοιχεία του λόγου της πειραματικής διατμητικής αντοχής προς τις προβλέψεις των Εξ. (4α), (4β), (5).



Εικόνα 4. Σύγκριση πειραματικών τιμών διατμητικής αντοχής κυκλικών βάρων υπό ανακυκλιζόμενη ένταση, με τις προβλέψεις των α) Εξ. (4α), (5), β) Εξ. (4β), (5).

### 1.3 Γωνία στροφής χορδής στην αστοχία υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση

Όταν καθοριστική της ανελαστικής συμπεριφοράς και της τελικής αστοχίας είναι η κάμψη, το πλαστικό τμήμα της γωνίας στροφής χορδής στο άκρο του μέλους, συνηθίζεται να εκφράζεται ως το γινόμενο του πλαστικού τμήματος καμπυλότητας,  $\varphi_u - \varphi_y$ , επί το μήκος πλαστικής άρθρωσης,  $L_{pl}$ :

$$\theta_u = \theta_y + (\varphi_u - \varphi_y) L_{pl} \left( 1 - \frac{0.5L_{pl}}{L_s} \right) \quad (6)$$

με  $\theta_y$  απ' την Εξ. (1). Οι εμπειρικές σχέσεις για τον υπολογισμό του μήκους πλαστικής άρθρωσης,  $L_{pl}$ , δεν μπορεί να είναι ανεξάρτητες των προσομοιωμάτων που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των  $\varphi_y$  και  $\varphi_u$ . Εδώ ο υπολογισμός της  $\varphi_y$  γίνεται με βάση τις παραδοχές και τη διαδικασία της παρ. 1.1. Παρόμοιο προσομοίωμα χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό της  $\varphi_u$ , με τη διαφορά ότι η οριακή καμπυλότητα προσδιορίζεται απ' την εξάντληση της οριακής παραμόρφωσης του χάλυβα ή της οριακής παραμόρφωσης του περισφιγμένου σκυροδέματος του πυρήνα της διατομής. Συγκεκριμένα, για το περισφιγμένο σκυρόδεμα λαμβάνεται παραβολικό-γραμμικό διάγραμμα  $\sigma$ - $\epsilon$ , όπου η αντοχή, η παραμόρφωση στη μέγιστη τάση και η μέγιστη παραμόρφωση,  $f_{cs}$ ,  $\epsilon_{co,c}$  και  $\epsilon_{cu,c}$ , λαμβάνονται σύμφωνα με τα παρακάτω:

Για την αντοχή,  $f_{cc}$ , κατά το μοντέλο των Newman & Newman (1971), τροποποιημένο ως εξής (CEN 2005):

$$\frac{f_{cc}}{f_c} = 1 + 3.7(0.5\alpha\omega_w)^{0.86} \quad (7)$$

όπου  $\omega_w$  είναι το μηχανικό ποσοστό του εγκάρσιου οπλισμού, όπως αυτό υπολογίζεται απ' το γεωμετρικό ποσοστό,  $\rho_w$ , και την τάση διαρροής του εγκάρσιου οπλισμού,  $f_{yw}$ , ως  $\omega_w = \rho_w f_{yw} / f_c$ , και  $\alpha$  ο συντελεστής αποδοτικότητας της περισφιγξης κατά Sheikh & Uzumeri (1982):

$$\alpha = \left(1 - \frac{s_h}{2D_c}\right)^2 \quad (8)$$

όπου  $s_h$  η απόσταση μεταξύ διαδοχικών συνδετήρων και  $D_c$  η διάμετρος του περισφιγμένου πυρήνα μέχρι τον άξονα των συνδετήρων. Η παραμόρφωση,  $\varepsilon_{co,c}$ , που αντιστοιχεί σε τάση  $f_{cc}$  λαμβάνεται (CEN 2005):

$$\varepsilon_{co,c} = \varepsilon_{co} \left[1 + 5 \left(\frac{f_{cc}}{f_c} - 1\right)\right] \quad (9)$$

Η σχέση για την βράχυνση αστοχίας των ακραίων περισφιγμένων ινών του σκυροδέματος αναπτύχθηκε με τη βοήθεια βάσης 193 πειραματικών μετρήσεων καμπυλότητας στην καμπτική αστοχία υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση μελών με ορθογωνική ή κυκλική διατομή (έχει υιοθετηθεί και από CEN, 2005):

$$\varepsilon_{cu,c} = 0.004 + 0.25 \cdot \frac{\alpha \rho_w f_{yw}}{f_{cc}} \quad (10)$$

Για τη μήκυνση του εφελκόμενου οπλισμού στην εξ' αυτού καμπτική αστοχία σε μέλη υπό ανακυκλιζόμενη ένταση υιοθετείται η σχετική διάταξη του (CEN, 2005):  $\varepsilon_{su} = 6\%$  για χάλυβα κατηγορίας C (θερμής εξέλασης, εξαιρετικά πλαστικός),  $5\%$  για χάλυβα κατηγορίας B (όπως Tempcore) και  $2.5\%$  για χάλυβα κατηγορίας A (ψυχρής κατεργασίας, ψαθυρός).

Με  $\varphi_y$ ,  $\varphi_u$ ,  $\theta_y$ , κατά τα παραπάνω, για τον υπολογισμό της γωνίας στροφής χορδής στην αστοχία βάθρων κυκλικής διατομής υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση, Εξ. (6), το μήκος πλαστικής άρθρωσης πρέπει να λαμβάνεται ως:

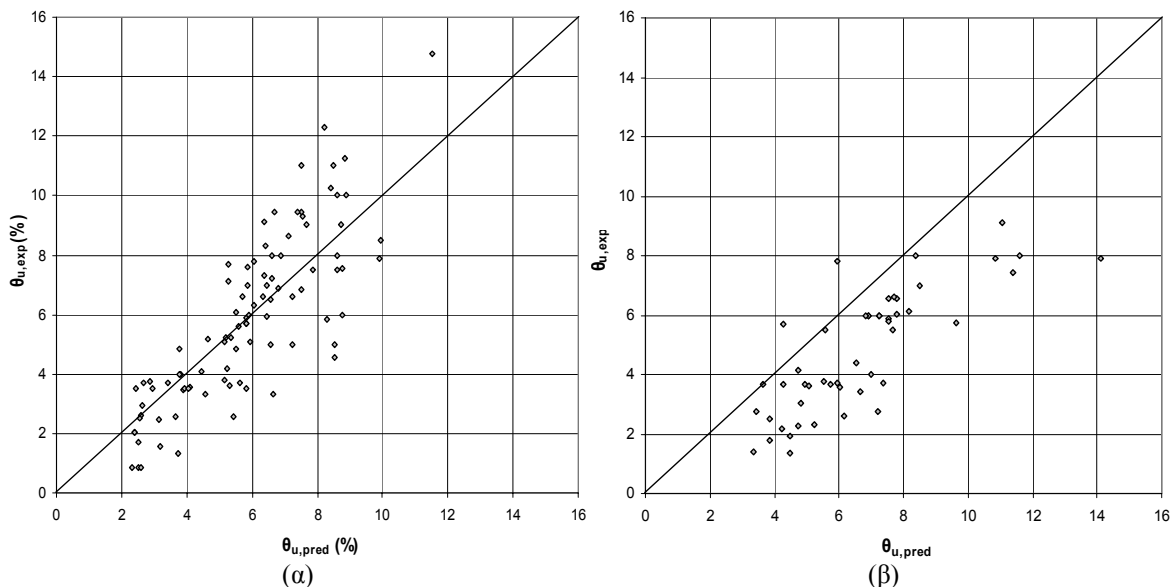
$$L_{pl} = 0.75D + a_{sl} \frac{0.05d_b f_y}{\sqrt{f_c}} \quad (11)$$

Οι πειραματικές τιμές του  $\theta_u$  για τα 93 πειράματα κυκλικών βάθρων στα οποία προσαρμόστηκε η Εξ. (11) συγκρίνονται στην Εικόνα 5(α) με τις τιμές που προκύπτουν απ' τις Εξισώσεις (6)-(11). Τα στατιστικά στοιχεία του λόγου πειραματικής προς θεωρητική τιμή δίδονται στον Πίνακα 1. Σε όλα σχεδόν τα 49 πειράματα στα οποία δεν εμφανίστηκε αστοχία στο τέλος του πειράματος η θεωρητική τιμή είναι μεγαλύτερη απ' τη μέγιστη γωνία στροφής χορδής που αναπτύχθηκε στο πείραμα (Εικόνα 5(β)).

## 2 ΒΑΘΡΑ ΚΟΙΛΗΣ ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ

Η βάση δεδομένων βάθρων περιλαμβάνει 169 πειράματα με κοίλη ορθογωνική διατομή ή παρόμοια μορφή (H, T κλπ), 141 απ' τα οποία εμφάνισαν καμπτική διαρροή. Τα υπόλοιπα 28 εμφάνισαν ψαθυρή διατμητική αστοχία. Το μήκος διάτμησης,  $L_s$ , των βάθρων ποικίλει από 0.45 έως 14m, με μέσο όρο 3m. Το ύψος της διατομής,  $h$ , καλύπτει εύρος τιμών από 0.2 έως 3.2m, με

μέσο όρο 1.35m, ενώ ο λόγος διάτμησης,  $L_s/h$ , από 0.6 έως 8.3 (μέσος όρος 2.6). Το πάχος κορμού,  $b_w$ , ποικίλει από 50 έως 500mm, με μέσο όρο τα 120mm και ο λόγος  $h/b_w$  ποικίλει από 2.5 έως 36, με μέσο όρο 12.5. Το ποσοστό διαμήκους οπλισμού,  $\rho_l$ , καλύπτει εύρος τιμών από 0.34 έως 6.2%, με μέσο όρο 1.35% και το ποσοστό του εγκάρσιου οπλισμού,  $\rho_w$ , από 0.1 έως 2.1% με μέσο όρο 0.6%. Η αντοχή σκυροδέματος,  $f_c$ , είναι μεταξύ 20 και 102 MPa, με μέσο όρο 43 MPa, ενώ το ανηγμένο αξονικό φορτίο,  $\nu=N/Af_c$ , μεταξύ 0 και 0.5, με μέσο όρο 0.075.



Εικόνα 5. Σύγκριση πειραματικής, με θεωρητική γωνία στροφής χορδής στην αστοχία, Εξ. (6)-(11), για κυκλικά βάρη (α) πειράματα με καμπτική αστοχία, (β) δοκίμια που δεν αστόχησαν στο πείραμα.

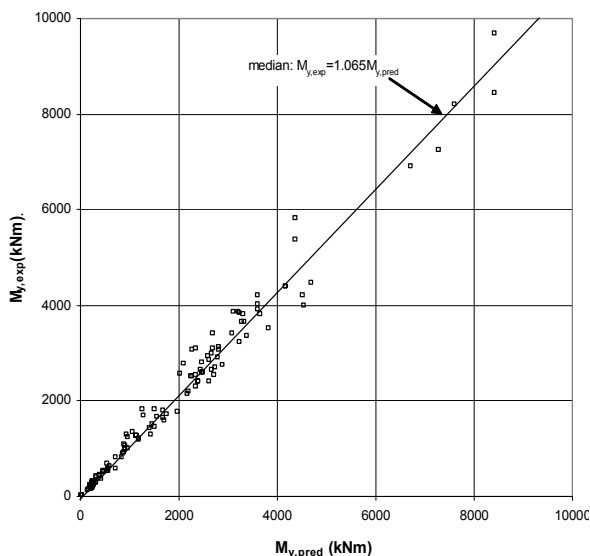
## 2.1 Ροπή και παραμόρφωση διαρροής – Ενεργός δυσκαμψία

Οι θεωρητικές τιμές των  $M_y$  και  $\varphi_y$  υπολογίζονται από ανάλυση διατομής με υπόθεση επιπεδότητας διατομών, αλλά για γραμμική ελαστική συμπεριφορά υλικών. Το κριτήριο διαρροής, ανάλογα με το τι συμβαίνει πρώτα, είναι:

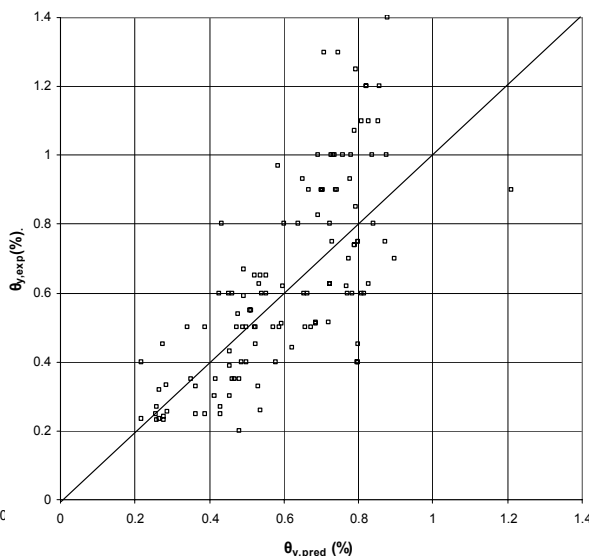
- διαρροή του εφελκόμενου οπλισμού, ή
- παραμόρφωση  $\varepsilon_c = 0.002$  στην ακραία θλιβόμενη ίνα.

Ο εφελκόμενος και ο θλιβόμενος οπλισμός θεωρούνται ότι έχουν ποσοστό  $\rho_l$  ο καθένας, ανηγμένο στο γινόμενο  $bd$ , του πλάτους της θλιβόμενης ζώνης,  $b$ , και του στατικού ύψους,  $d$ . Ο υπόλοιπος οπλισμός θεωρείται ομοιόμορφα κατανομημένος μεταξύ εφελκόμενου και θλιβόμενου πέλματος, με ποσοστό  $\rho_v$ , επίσης ανηγμένο στο  $bd$ . Στη συνήθη περίπτωση όπου η θλιβόμενη ζώνη βρίσκεται όλη μέσα στο θλιβόμενο πέλαμα, υπολογίζονται η ροπή διαρροής,  $M_y$ , και η καμπυλότητα στη διαρροή,  $\varphi_y$ , όπως και στις ορθογωνικές διατομές (Μπισκίνης & Φαρδής 2006). Στην περίπτωση που το ύψος της θλιβόμενης ζώνης,  $\xi_y$ , υπερβαίνει το πάχος του θλιβόμενου πέλματος, ο υπολογισμός των  $M_y$ ,  $\varphi_y$ ,  $\xi_y$ , γίνεται για το πραγματικό σχήμα της θλιβόμενης ζώνης (Π ή Τ).

Στην Εικόνα 6 γίνεται σύγκριση των θεωρητικών τιμών της  $M_y$  με τις πειραματικές τιμές. Στον Πίνακα 2 δίνονται τα στατιστικά στοιχεία του λόγου των δύο τιμών. Το συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι, για καλή συμφωνία με τις πειραματικές τιμές, οι θεωρητικές τιμές των  $M_y$  και  $\varphi_y$  πρέπει να πολλαπλασιάζονται με 1.065. Ο λόγος είναι ότι οι πειραματικές τιμές, στη γωνία μίας διγραμμικής περιβάλλουσας του πειραματικού βρόχου  $M-\delta$  βρίσκονται πάνω απ' το σημείο της πρώτης διαρροής του ακραίου εφελκόμενου χάλυβα, ή της εξάντλησης του  $\varepsilon_c = 0.002$  στην ακραία θλιβόμενη ίνα (στα βάρη κυκλικής διατομής θεωρήθηκε πλαστικοποίηση του 1/3 του οπλισμού της εφελκόμενης ζώνης και γι' αυτό δεν χρειάζεται διορθωτικός συντελεστής).



Εικόνα 6. Σύγκριση πειραματικής και θεωρητικής ροπής διαρροής, βάθρα κοίλης ορθογωνικής ή παρόμοιας (H, T κλπ) διατομής.



Εικόνα 7. Σύγκριση πειραματικής και θεωρητικής γωνίας στρώσης χορδής στη διαρροή, Εξ. (16). Βάθρα κοίλης ορθογωνικής ή παρόμοιας (H, T κλπ) διατομής.

Κατά αναλογία με την Εξ. (1) η γωνία στρώσης χορδής στη διαρροή κοίλων ορθογωνικών βάθρων δίνεται από την παρακάτω σχέση, στο καθαρά καμπτικό τμήμα της οποίας χρησιμοποιείται ο διορθωτικός συντελεστής 1.065 για τη  $\varphi_y$ :

$$\theta_y = 1.065\varphi_y \frac{L_s + a_V z}{3} + 0.0012 + a_{sl} \frac{\varphi_y d_b f_y}{8\sqrt{f_c}} \quad (f_y, f_c \text{ σε MPa}) \quad (12)$$

Οι μεταβλητές της Εξ. (12) είναι όπως έχουν οριστεί για την Εξ. (1), με τη διαφορά ότι ο μοχλοβραχίονας εσωτερικών δυνάμεων λαμβάνεται ίσως με  $z \approx d - d_1$ .

Πίνακας 2. Μέσος όρος\*, διάμεσος\* και συντελεστής μεταβλητότητας του λόγου πειραματικής προς θεωρητική τιμή χαρακτηριστικών μεγεθών. Βάθρα κοίλης ορθογωνικής ή παρόμοιας (H, T κλπ) διατομής.

Ποσότητα	Αριθμός πειραμάτων	Μέσος όρος*	Διάμεσος*	Συντελεστής μεταβλητότητας
$M_{y,exp}/M_{y,pred}$ -βασικές αρχές	137	1.08	1.065	12.2%
$\theta_{y,exp}/\theta_{y,Eξ.(12)}$	122	1.05	1.01	29.55%
$(M_y L_s / 3 \theta_y)_{exp} / (M_y L_s / 3 \theta_y)_{Eξ.(2),(12)}$	122	1.055	0.985	36.1%
$(M_y L_s / 3 \theta_y)_{exp} / EI_{eff,Eξ.(13)}$	122	1.125	1.00	48.05%
$V_{R,exp}/V_{R,Eξ.(4a),(14)}$	24	1.03	0.98	17.5%
$V_{R,exp}/V_{R,Eξ.(4b),(14)}$	24	1.09	1.055	16.35%
$V_{R,exp}/V_{R,Eξ.(15)}$ Διαγώνια θλίψη	45	0.99	1.00	11%
$\theta_{u,exp}/\theta_{u,Eξ.(16),(17)}$	30	1.02	1.05	29.65%

\* βλ. υποσημείωση Πίνακα 1.

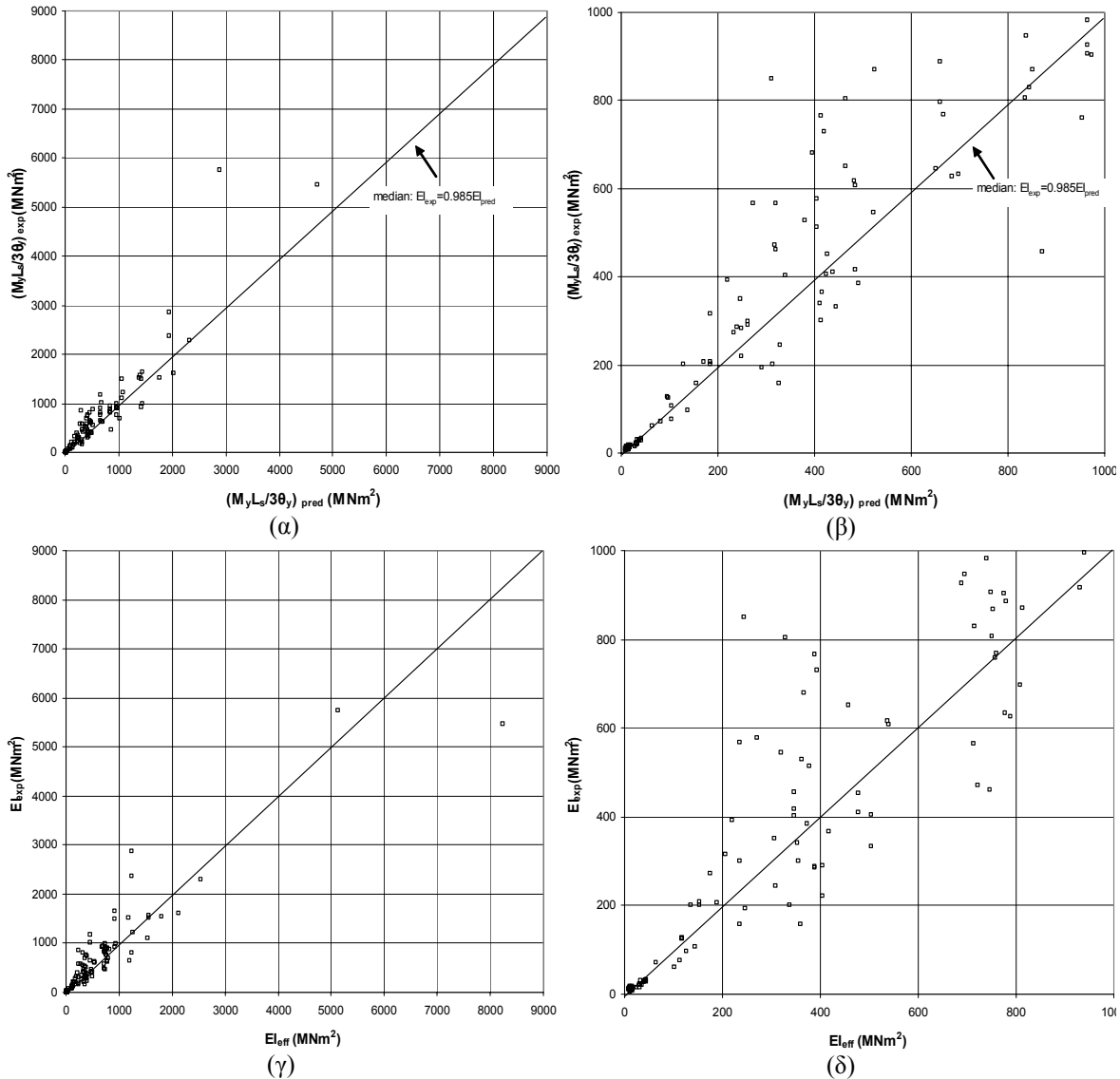
Στην Εικόνα 7 συγκρίνονται οι τιμές που προκύπτουν απ' την Εξ. (12) με τις πειραματικές τιμές για τα 55 πειράματα στα οποία έχει προσαρμοστεί η εξίσωση. Στον Πίνακα 2 δίνονται τα στατιστικά στοιχεία του λόγου πειραματικής προς θεωρητική τιμή. Στις Εικόνες 8(α) και 8(β) συγκρίνονται οι τιμές της ενεργού δυσκαμψίας στη διαρροή, Εξ. (2), με τις πειραματικές. Για την ανάλυση γεφυρών πριν τη διαστασιολόγηση των βάθρων, η δυσκαμψία των κοίλων ορθογωνικών βάθρων ή παρόμοιας μορφής, μπορεί να υπολογίζεται με την παρακάτω εμπειρική σχέση,



ανεξάρτητη του οπλισμού:

$$EI_{eff} = \alpha \left( 0.8 + \ln \frac{L_s}{h} \right) \left( 1 + 0.048 \frac{N}{A_c} \right) (1 - 0.25 a_{sl}) (EI)_c \quad (N/A_c \text{ σε MPa}) \quad (13)$$

Απ' την Εικόνα 8, και τα στατιστικά στοιχεία του Πίνακα 2, φαίνεται ότι οι προβλέψεις της Εξ. (2) για την ενεργό δυσκαμψία είναι καλύτερες απ' αυτές της Εξ. (13).



Εικόνα 8. Σύγκριση πειραματικής με θεωρητική ενεργό δυσκαμψία στη διαρροή: (α) Εξ. (2), (12); (β) λεπτομέρεια της (α); (γ) Εξ. (13); (δ) λεπτομέρεια της (γ).

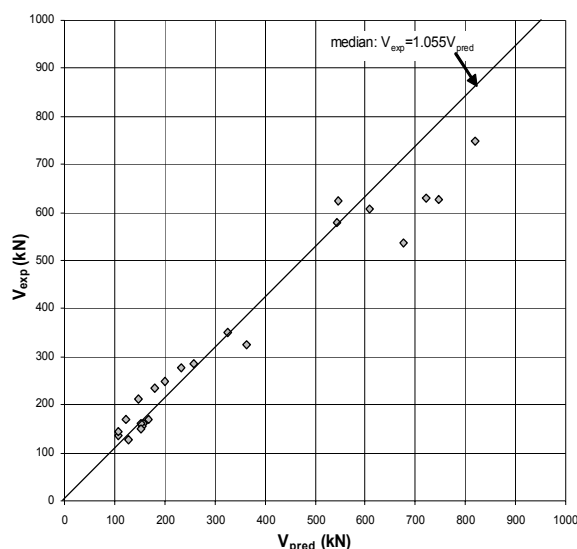
## 2.2 Διατμητική αντοχή υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση

Οι Εξ. (4α), (4β) για τον υπολογισμό της διατμητικής αντοχής με διαρροή του εγκάρσιου οπλισμού υπό ανακυκλιζόμενη ένταση πέραν της καμπτικής διαρροής, ισχύουν και για τα κοίλα ορθογωνικά (ή παρόμοιας μορφής) βάρη, με τις εξής τροποποιήσεις:

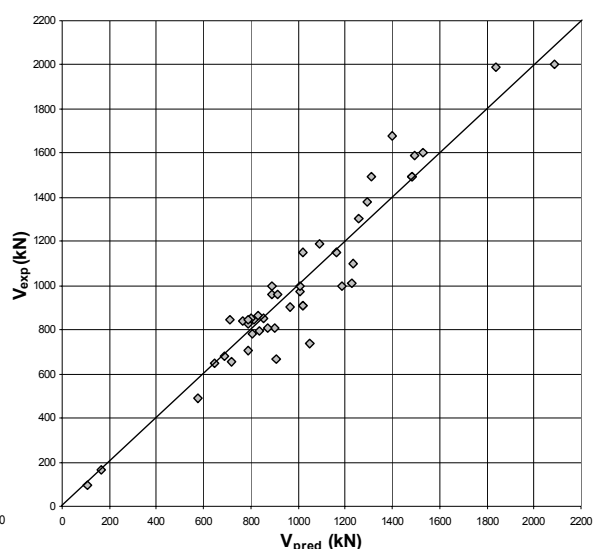
- Το εμβαδόν  $A_c$  λαμβάνεται ίσο με  $\Sigma b_w d$ , όπου  $\Sigma b_w$  είναι το συνολικό πλάτος των κορμών που είναι παράλληλοι στη διεύθυνση της φόρτισης και  $d$  το στατικό ύψος, ίσο με  $h-d_1$ , δηλαδή μέχρι το μέσον του εφελκόμενου πέλματος.
- Η συνεισφορά του εγκάρσιου οπλισμού στη διατμητική αντοχή,  $V_w$ , λαμβάνεται:

$$V_w = \rho_w \Sigma b_w z f_{yw} \quad (14)$$

όπου  $\rho_w$  και  $f_{yw}$  είναι το ποσοστό και η αντοχή του εγκάρσιου οπλισμού και  $z = d-d_1$  ο μοχλοβραχίονας εσωτερικών δυνάμεων.



Εικόνα 9. Σύγκριση διατμητικής αντοχής βάθρων κοίλης ορθογωνικής ή παρόμοιας διατομής (H, T κλπ) για διαρροή του εγκάρσιου οπλισμού μετά την καμπτική διαρροή, Εξ. (4), (14), με πειραματική τιμή.



Εικόνα 10. Σύγκριση διατμητικής αντοχής βάθρων κοίλης ορθογωνικής ή παρόμοιας μορφής διατομής (H, T κλπ) για αστοχία σε λοξή θλίψη πριν ή μετά την καμπτική διαρροή, Εξ. (15), με πειραματική τιμή.

Στην Εικόνα 9 και στον Πίνακα 2 γίνεται η σύγκριση των τιμών που προβλέπουν οι Εξ. (4), (14) για τη διατμητική αντοχή με τις πειραματικές τιμές, για τα 24 πειράματα ανακυκλιζόμενης φόρτισης βάθρων με κοίλη ορθογωνική διατομή ή παρόμοιου τύπου (H, T κλπ) που αστόχησαν σε διάτμηση μετά την καμπτική διαρροή.

Λόγω του συγκριτικά μικρού κορμού τους, τα κοίλα ορθογωνικά (ή παρόμοιας μορφής) βάθρα είναι ενδεχόμενο ν' αστοχήσουν λόγω λοξής θλίψης του σκυροδέματος, πριν ή μετά την καμπτική διαρροή. Τα πειραματικά δεδομένα δείχνουν ότι, όπως για διατμητική αστοχία λόγω διαρροής των συνδετήρων, Εξ. (4), έτσι και για τη διατμητική αστοχία λόγω διαγώνιας θλίψης, η διατμητική αντοχή του μέλους μειώνεται όσον αυξάνονται οι πλαστικές παραμορφώσεις με την ανακύκλιση της φόρτισης. Η εμπειρική σχέση των Biskinis και Συνεργάτες (2004) δίνει τη διατμητική αντοχή για αστοχία σε λοξή θλίψη,  $V_{R,max}$ , ως συνάρτηση του δείκτη πλαστιμότητας γωνιών στροφής χορδής της ακραίας διατομής,  $\mu^p_{\theta}$ :

$$V_{R,max} = 0.85 \left( 1 - 0.06 \min \left( 5; \mu^p_{\theta} \right) \right) \left( 1 + 1.8 \min \left( 0,15; \frac{N}{A_c f_c} \right) \right) \left( 1 + 0.25 \max \left( 1,75; 100 \rho_{tot} \right) \right) \left( 1 - 0.2 \min \left( 2; \frac{L_s}{h} \right) \right) \sqrt{\min(100; f_c)} \Sigma b_w z \quad (15)$$

Τα πειραματικά δεδομένα δείχνουν ότι η Εξ. (15) ισχύει όχι μόνο για διατμητική αστοχία μετά την καμπτική διαρροή, αλλά και πριν απ' αυτή, οπότε στην Εξ. (15) τίθεται  $\mu^p_{\theta} = 0$ . Στην Εικόνα 10 και στον Πίνακα 2 γίνεται η σύγκριση της διατμητικής αντοχής κατά την Εξ. (15) με τις

πειραματικές τιμές για τα 45 πειράματα ανακυκλιζόμενης φόρτισης βάθρων με διατομή κοίλη ορθογωνική ή παρόμοιας μορφής (Τ,Η κλπ), που αστόχησαν σε λοξή θλίψη του κορμού πριν ή μετά την καμπτική διαρροή.

Βάθρα με διατομή κοίλη ορθογωνική ή παρόμοιας μορφής (Τ,Η κλπ), θα πρέπει να διαστασιολογούνται σε διάτμηση με βάση την μικρότερη διατμητική αντοχή,  $V_R$  ή  $V_{R,max}$ , όπως αυτή προκύπτει απ' τις Εξ. (4) και (15) αντίστοιχα, χρησιμοποιώντας ως  $\mu^p_{\theta} = \mu_{\theta} - 1$  τη στοχευόμενη (ή την απαιτούμενη) πλαστιμότητα.

### 2.3 Γωνία στροφής χορδής στην αστοχία υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση

Ο αριθμός των πειραμάτων σε βάθρα κοίλης ορθογωνικής (ή παρόμοιας) διατομής που εμφάνισαν καμπτική αστοχία υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση, είναι πολύ μικρός και δεν μπορεί να στηρίξει αυτοδύναμη σχέση για τον υπολογισμό της γωνίας στροφής χορδής στην αστοχία,  $\theta_u$ . Για το λόγο αυτό, το προσομοίωμα που προτείνεται είναι υπό-περίπτωση γενικού προσομοιώματος για τον υπολογισμό της  $\theta_u$  υποστυλωμάτων, δοκών, τοιχωμάτων, και γενικότερα μελών με ορθογωνικό κορμό και θλιβόμενη ζώνη. Στηριζόμενοι σε βάση πειραματικών δεδομένων με 975 πειράματα ανακυκλιζόμενης φόρτισης, απ' τα οποία τα 30 είναι βάθρα κοίλης ορθογωνικής (ή παρόμοιας) διατομής, αναπτύχθηκε πλήρως εμπειρική σχέση για τον υπολογισμό της γωνίας στροφής χορδής στην καμπτική αστοχία. Η διαφοροποίηση μεταξύ δοκών, υποστυλωμάτων, τοιχωμάτων και κοίλων ορθογωνικών βάθρων γίνεται μόνο μέσω του λόγου  $h/b_w$ , όπου  $h$  είναι το ύψος της διατομής και  $b_w$  το πάχος του κορμού (του ενός, εάν υπάρχουν περισσότεροι από ένας παράλληλοι κορμοί). Για ανακυκλιζόμενη φόρτιση η εμπειρική σχέση υπολογισμού του  $\theta_u$  είναι:

$$\theta_u = \theta_y + 1.05(1 + 0.6a_{sl}) \left( 1 - 0.05 \max \left( 1.5, \min \left( 10, \frac{h}{b_w} \right) \right) \right) (0.2)^v \left( \frac{\max(0.01, \omega') L_s}{\max(0.01, \omega) h} \right)^{1/3} f_c^{0.2} 25^{\left( \alpha \rho_s \frac{f_{yw}}{f_c} \right)} \quad (16)$$

όπου:

$\theta_y$ : είναι η γωνία στροφής χορδής στην διαρροή για κοίλες ορθογωνικές διατομές, Εξ. (12),

$v = N/bhf_c$ ,

$b$  = πλάτος της θλιβόμενης ζώνης της διατομής,

$N$  = αξονική δύναμη, θετική για θλίψη,

$\omega, \omega'$ : τα μηχανικά ποσοστά οπλισμού,  $\rho_f/f_c$ , του διαμήκου οπλισμού που είναι σε εφελκυσμό (συμπεριλαμβανομένου και του ενδιάμεσου οπλισμού μεταξύ των δύο πελμάτων) και σε θλίψη αντίστοιχα,

$f_c$ : η αντοχή του σκυροδέματος (σε ΜΡα)

$L_s/h = M/Vh$ : ο λόγος διάτμησης στη διατομή του βάρου με την μέγιστη ροπή,

$\rho_s = A_{sh}/b_w s_h$ : το ποσοστό εγκάρσιου οπλισμού, παράλληλα στη διεύθυνση φόρτισης,

$f_{yw}$ : η τάση διαρροής του εγκάρσιου οπλισμού,

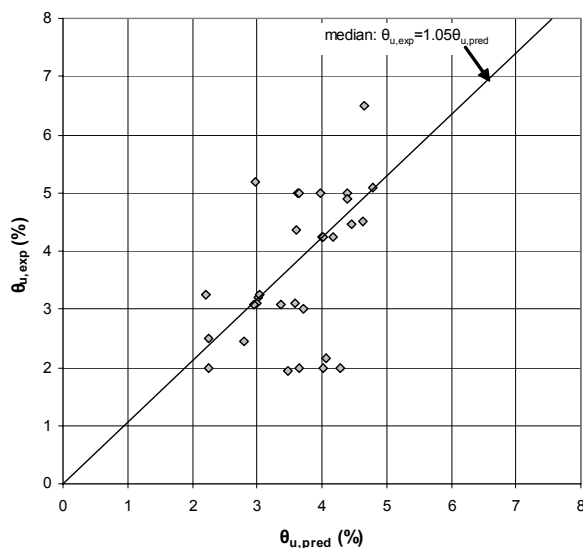
$\alpha$ : ο συντελεστής αποδοτικότητας της περίσφιξης κατά Sheikh & Uzumeri (1982):

$$\alpha = \left( 1 - \frac{s_h}{2b_c} \right) \left( 1 - \frac{s_h}{2h_c} \right) \left( 1 - \frac{\sum b_i^2}{6b_c h_c} \right) \quad (17)$$

όπου  $b_c$  και  $h_c$  οι διαστάσεις του πυρήνα σκυροδέματος (μέχρι τον άξονα των συνδετήρων) και  $b_i$  η απόσταση στην περίμετρο της διατομής μεταξύ διαδοχικών ράβδων που συγκρατούνται από γωνία ή άγκιστρο συνδετήρα.

Στην Εικόνα 11 γίνεται σύγκριση των τιμών που δίνουν οι Εξ. (16), (17) με τις πειραματικές τιμές της γωνίας στροφής χορδής στην αστοχία για τα 30 βάθρα κοίλης ορθογωνικής (ή παρόμοιας) διατομής που αστόχησαν καμπτικά υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση. Στον Πίνακα 2 δίνονται τα στατιστικά στοιχεία του λόγου πειραματικής προς θεωρητική τιμή. Για σύγκριση με τη συνολική βάση των 975 πειραμάτων ανακυκλιζόμενης έντασης μελών ορθογωνικής διατομής, εκεί ο

διάμεσος και ο συντελεστής μεταβλητότητας είναι, αντίστοιχα, 1.00 και 38.2%.



Εικόνα 11. Σύγκριση πειραματικών–θεωρητικών τιμών γωνίας στροφής χορδής καμπτικής αστοχίας υπό ανακυκλιζόμενη ένταση. Βάθρα κοίλης ορθογωνικής διατομής ή παρόμοιας μορφής (H, T κλπ), Εξ.(16), (17)

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η Γενική Γραμματεία Έρευνας & Τεχνολογίας (ΓΓΕΤ) υποστηρίζει την παρούσα έρευνα μέσω του προγράμματος ΑσΠροΓε (Αντισεισμική Προστασία Γεφυρών).

## ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. Μπισκίνης, Δ.Ε., Ρουπακιάς, Γ.Κ., Φαρδής, Μ.Ν., Αντοχή και διαστασιολόγηση μελών Ο.Σ. έναντι ανακυκλιζόμενης τέμνουσας, 14ο Συνέδριο Σκυροδέματος, Τόμος Α', σελ. 363-374, Κως 2003.
2. Μπισκίνης, Δ.Ε. και Φαρδής, Μ.Ν., Αντοχή και ικανότητα παραμόρφωσης μελών ΟΣ υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση, συμπεριλαμβανομένων ενισχυμένων μελών. 15<sup>ο</sup> Συνέδριο Σκυροδέματος, Αλεξανδρούπολη, 2006.
3. Μπισκίνης, Δ.Ε., Παραμορφώσεις μελών οπλισμένου σκυροδέματος στη διαρροή και στην αστοχία. Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Παν/μιο Πατρών, Πάτρα, 2006.
4. Biskinis, D.E. and Fardis, M.N., Cyclic strength and deformation capacity of RC members, including members retrofitted for earthquake resistance, Balkema, *Proc. 5<sup>th</sup> International Ph.D Symposium in Civil Engineering*, 2004, Delft, 1125-1133.
5. Biskinis, D.E., Roupakias, G. and Fardis, M.N., Degradation of shear strength of RC members with inelastic cyclic displacements, *ACI Structural Journal*, 2004, 101(6):773-783.
6. CEN, *European Standard EN 1998-3:2005 Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance - Part 3: Assessment and retrofitting of buildings*, Comite Europeen de Normalisation, 2005, Brussels.
7. Newman, K., and Newman, J.B., Failure theories and design criteria for plain concrete, in: *Structure, Solid Mechanics and Engineering Design*, Edited by Te'eni, J.Wiley-Interscience, New York, N.Y., 1971.
8. Sheikh, S.A. and S.M. Uzumeri, Analytical model for concrete confinement in tied columns, *Journal of Structural Division, ASCE*, 1982, 108(ST12):2703-2722.