

# Οριακές Καταστάσεις Συμπεριφοράς (ή Αστοχίας) Υποστυλωμάτων Οπλισμένου Σκυροδέματος

Ανθος Ιωάννου<sup>1</sup>, Σταυρούλα Πανταζοπούλου<sup>2</sup>  
Αντρούλα Γεωργίου<sup>3</sup> και Ρογήρος Ιλλαμπας<sup>4</sup>

*Λέξεις κλειδιά: στροφή, διάτμηση, αξονικό φορτίο, πεπερασμένα στοιχεία*

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ:** Η κατανόηση της ανελαστικής συμπεριφοράς υποστυλωμάτων οπλισμένου σκυροδέματος (Ο.Σ.) υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση και θλιπτικό αξονικό φορτίο είναι η βάση του αντισεισμικού σχεδιασμού, καθότι ο έλεγχος της ικανότητας παραμόρφωσης των εν λόγω στοιχείων καθορίζει την έκταση και την επισκευασιμότητα των βλαβών στην κατασκευή. Οι δείκτες αστοχίας σε όρους παραμορφώσεων πρέπει να προσδιορισθούν με αξιοπιστία προκειμένου να ορισθούν τα όρια επιτελεστικότητας. Αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η κατανόηση μέσω ανελαστικής προσομοίωσης, των δεικτών που καθορίζουν την μηχανική συμπεριφορά υποστυλωμάτων έναντι οριζόντιας μετάθεσης. Για την διερεύνηση της παραμετρικής ευαισθησίας των μεγεθών (ποσοστό διατμητικού και εγκάρσιου οπλισμού, διατμητικό άνοιγμα, ανηγμένο αξονικό φορτίο κ.λ.π) χρησιμοποιείται ως εργαλείο βαθμονόμησης μία βάση δεδομένων με υποστυλώματα με διατμητική και καμπτοδιατμητική αστοχία υπο ανακυκλιζόμενη φόρτιση. Η μελέτη αναδεικνύει το ρόλο του αξονικού φορτίου, ενώ επιδιώκεται μια βελτιωμένη βαθμονόμηση των υφιστάμενων σχέσεων υπολογισμού των δεικτών αστοχίας και ο χαρακτηρισμός του βαθμού βλάβης του στοιχείου.

**ABSTRACT:** The understanding of the nonlinear behavior of RC columns under cyclic loading and compressive axial load is the basis of seismic design, since controlling of deformation capacity of the aforementioned elements determines the range of damage and the repair possibility. The damage factors in terms of deformation must be determined with reliability in order to define the design capacity limits. The objective of the present research is the understanding, through nonlinear simulation, of the factors defining the mechanical behavior of columns against horizontal displacement. For the investigation of the sensitivity of the parameters (transverse and longitudinal reinforcement percentage, shear span, axial load ratio etc ) a data base of shear and flexure-shear critical columns under seismic loading is used as a tool of gradation. The research shows the effect of the axial load, while an improved gradation of the existing equations for calculating the failure factors is at aim as well as the characterization of the level of damage of the element.

<sup>1</sup>Υποψ. Διδάκτ. Πολ. Μηχ., Τμ. Πολ. Μηχ. & Μηχ. Περιβ., Πανπ. Κύπρου, ioannou.anthos@ucy.ac.cy

<sup>2</sup>Καθηγ., Τμ. Πολιτ. Μηχ., Σχολή Μηχαν. Λασσόντ, Πανεπ. Γιόρκ., Τορόντο, Καναδά, pantazo@yorku.ca

<sup>3</sup>Δρ.Πολ. Μηχ., Μεταδιδ. Ερευν., Τμ. Πολ. Μηχ. & Μηχ. Περιβ. Πανπ. Κύπρου, georgiou.antroula@ucy.ac.cy

<sup>4</sup>Δρ. Πολ. Μηχ., Μεταδιδ. Ερευν., Τμ. Πολ. Μηχ. & Μηχ. Περιβ. Πανπ. Κύπρου, ilampas.rogiros@ucy.ac.cy

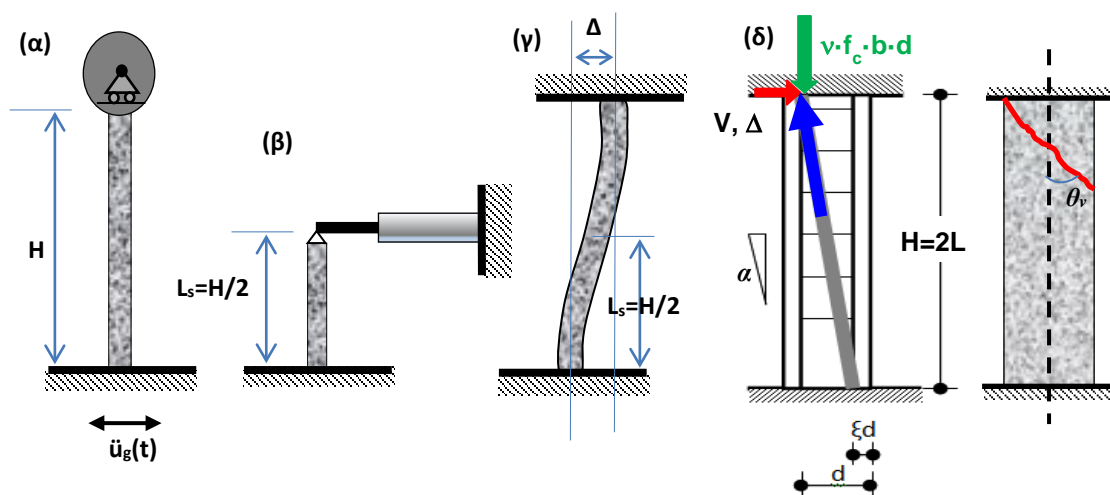
## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η αποτίμηση της σεισμικής συμπεριφοράς υποστυλωμάτων οπλισμένου σκυροδέματος (Ο.Σ.) απέκτησε ιδιαίτερη σημασία για τη μελέτη της σεισμικής απόκρισης υφιστάμενων κατασκευών μετά την περίοδο 1995-2010, κατά την οποία εκδηλώθηκε μεγάλος αριθμός καταρρεύσεων κτιρίων Ο.Σ. Χαρακτηριστικά αναφέρονται οι σεισμοί του Northridge (1994, California), της Αθήνας (1999, Πάρνηθα), της Γ' Aquila (2009, Ιταλία), και του Izmit (1999, Τουρκία) που οδήγησαν σε καταρρεύσεις κτηρίων Ο.Σ. κυρίως τύπου πιλοτής. Σε αυτή την περίοδο γίνεται για πρώτη φορά στη βιβλιογραφία αναφορά ως τελικό στάδιο αστοχίας υποστυλωμάτων έναντι σεισμού αυτό της «αδυναμίας στήριξης των κατακόρυφων φορτίων», που αποτελεί προϋπόθεση για την κατάρρευση. Πλήθος εργασιών έχουν δημοσιευθεί έκτοτε σχετικά με την ικανότητα παραμόρφωσης υποστυλωμάτων, κυρίως στοιχείων με ανεπαρκείς παλαιού τύπου λεπτομέρειες όπλισης, με σκοπό την καλύτερη κατανόηση των κρίσιμων παραμέτρων που επηρεάζουν τη σεισμική συμπεριφορά αυτής της κατηγορίας στοιχείων σε προηγμένα στάδια παραμόρφωσης. Παρά την έκταση της συναφούς βιβλιογραφίας, διαπιστώνεται μεγάλο εύρος διασποράς στις χαρακτηριστικές τιμές παραμόρφωσης και αστοχίας υποστυλωμάτων ΟΣ έναντι οριζόντιας μετάθεσης [Syntzirma and Pantazopoulou (2007), Pantazopoulou and Syntzirma (2010), Berry et al. (2004), Inel et al. (2007), Biskinis and Fardis (2009, 2010), Grammatikou et al. (2017), Elwood and Moehle (2005)].

Ένας σημαντικός παράγοντας που ευθύνεται για τη διασπορά των αποτελεσμάτων είναι η ανεπάρκεια των αναλυτικών προσομοιωμάτων που χρησιμοποιούνται να λάβουν υπόψη τους όλες τις παραμέτρους της συμπεριφοράς. Σε υποστυλώματα που ελέγχονται από καμπτική διαρροή πριν την αστοχία (καμπτο-διατμητικά στοιχεία), η ικανότητα έναντι οριζοντίου φορτίου γενικώς ελέγχεται από την κάμψη, όμως η ικανότητα παραμόρφωσης είναι κατά κανόνα αρκετά χαμηλότερη από αυτήν που προσδιορίζουν τα αναλυτικά προσομοιώματα όπως αυτά εξάγονται από θεμελιώδεις αρχές. Αντίθετα, σε υποστυλώματα όπου είτε (α) οι εγκάρσιοι οπλισμοί είναι ανεπαρκείς και δεν μπορούν να υποστηρίξουν την καμπτική διαρροή είτε (β) λόγω υψηλού αξονικού φορτίου δεν είναι εφικτή η σαφής διαρροή του διαμήκους εφελκυσμένου οπλισμού, η ψαθυρότητα της απόκρισης είναι δεδομένη και καθίσταται αρκετά πιο δύσκολη η εκτίμηση της φέρουσας ικανότητας καθώς επίσης και των δεικτών παραμορφωσιμότητας των στοιχείων. Σε κάθε περίπτωση το στάδιο απώλειας της ικανότητας ανάληψης κατακόρυφων φορτίων είναι απροσδιόριστο, με μοναδική πρόταση για τον υπολογισμό του την σχέση των Elwood and Moehle (2005) η οποία έχει βαθμονομηθεί έναντι περιορισμένου αριθμού δοκιμών στα οποία η εν λόγω κατάρρευση μπορούσε να παρατηρηθεί (δηλ. δοκιμές υποστυλωμάτων σε σεισμική τράπεζα και όχι υπο ελεγχόμενη επιβαλλόμενη μετατόπιση, Σχ. 1 (β)).

Η παρούσα εργασία σκοπεύει να διερευνήσει τις μέχρι σήμερα προτεινόμενες σχέσεις υπολογισμού της ικανότητας στροφής υποστυλωμάτων ΟΣ υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση κατά την αστοχία (α) σε διάτμηση και (β) σε αξονικό φορτίο. Σημειώνεται ότι ως διατμητική αστοχία ορίζεται το σημείο στην καμπύλη αντίστασης του δομικού στοιχείου πέραν του οποίου παρατηρείται αδυναμία ανάληψης μεγαλύτερου οριζόντιου φορτίου. Αντίστοιχα, η αστοχία υπό αξονικό φορτίο αναφέρεται στο μέγεθος οριζόντιας μετάθεσης όπου επέρχεται κατάρρευση – δηλαδή το υποστυλώμα δεν μπορεί πλέον να φέρει τα υπερκείμενα κατακόρυφα φορτία. Για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας αναπτύχθηκε προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων ενός υποστυλώματος τύπου πιλοτής (αμφίπακτο στην κεφαλή και στον πόδα) με σκοπό την ανάδειξη της

παραμορφωσιακής κατάστασης κοντά στο στάδιο της αστοχίας. Με το εν λόγω προσομοίωμα εξετάστηκε η επιρροή του μεγέθους του αξονικού φορτίου στη συνολική συμπεριφορά του υποστύλωματος όταν αυτό υποβάλλεται σε στατική οριζόντια σχετική μετάθεση των άκρων του μέχρι κατάρρευσης (Σχ. 1γ). Οι καμπύλες αντίστασης που προέκυψαν από την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων συσχετίστηκαν με αντίστοιχα πειραματικά αποτελέσματα με ιδιαίτερη έμφαση στην διαμόρφωση του επιπέδου ολισθήσεως στην κρίσιμη διατομή κατά το στάδιο της αστοχίας.



**Σχήμα 1.** Διάταξη δοκιμής υποστύλωματος (α) Σε οριζόντια διέγερση βάσης, (β) Με την βοήθεια υδραυλικού πιστονιού, (γ) Ορισμός σχετικής μετάθεσης άκρων (Στροφή =  $\Delta/H$ ) και (δ) Διορθωμένο προσομοίωμα Διάτμησης (Μεγαλοικονόμου 2018, Pardalopoulos et al. 2017, Chasioti et al. 2013)

## ΒΑΣΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΚΑΙ ΑΝΟΙΚΤΑ ΘΕΜΑΤΑ

Η συμπεριφορά υποστύλωμάτων ΟΣ χαρακτηρίζεται βάσει του αν ο διαμήκης οπλισμός προλαμβάνει να διαρρέυσει προ της αστοχίας του σε διάτμηση (ή λόγω άλλων ανεπαρκειών – π.χ. αστοχία μάτισης) ή όχι. Στην πρώτη περίπτωση η αστοχία χαρακτηρίζεται ως ψαθυρή / διατμητικού τύπου, ενώ η δεύτερη χαρακτηρίζεται ως καμπτοδιατμητική. Κατά γενική ομολογία η ικανότητα στρώσης των στοιχείων διατμητικού τύπου είναι ιδιαίτερα μικρή, και πάντως λιγότερη από την ονομαστική στρώση διαρροής του στοιχείου,  $\theta_y$ . Η στρώση διαρροής μπορεί να υπολογισθεί είτε με ανάλυση διατομής και μέλους (π.χ. RESPONSE 2000), είτε σύμφωνα με τον ΚΑΝΕΠΕ (2014) και τον EN1998-3 (2005), είτε ακόμη και με προσεγγιστικές σχέσεις (π.χ.  $\theta_y = 1/3 \cdot \phi_y \cdot L_s$ , όπου  $\phi_y = \min\{2.1\varepsilon_y/h ; 0.75\varepsilon_{co}/\chi\}$ ,  $\chi$  το ύψος της θλιβόμενης ζώνης της διατομής =  $\xi d$ ,  $L_s$  το μήκος διάτμησης, και  $h$  το συνολικό ύψος της διατομής του υποστύλωματος). Ψαθυρές αστοχίες καθαρά διατμητικού τύπου αναπτύσσονται σε τιμές στρώσης  $\theta = \theta_y \cdot V_n/V_{flex}$ , όπου  $V_n$  είναι η διατμητική αντοχή του στοιχείου και  $V_{flex}$  η καμπτική αντοχή που εκτιμάται από την ροπή διαρροής της κρίσιμης διατομής ανηγμένης προς το μήκος διάτμησης (Pardalopoulos et al. 2011). Στον υπολογισμό αυτό ο λόγος  $V_n/V_{flex}$  είναι σαφώς μικρότερος της μονάδας εφόσον πρόκειται για αστοχία διάτμησης πριν την καμπτική διαρροή, πλην όμως υπάρχει, ακόμα και σήμερα, αρκετά μεγάλη αβεβαιότητα ως προς την τιμή της διατμητικής αντοχής  $V_n$ . Η αβεβαιότητα αυτή κυριαρχεί και τις εκτιμήσεις ικανότητας στρώσης  $\theta$  σε στοιχεία υποστύλωματος που

αστοχούν διατμητικά μετά την διαρροή τους σε κάμψη (καμπτοδιατμητικά στοιχεία). Σημειώνεται ότι η εκδήλωση της διατμητικής αστοχίας – με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα – σχετίζεται με το μέγεθος του αξονικού φορτίου, με το μέγεθος της διατμητικής απαίτησης και με τον διαθέσιμο εγκάρσιο οπλισμό. Η επίδραση των παραπάνω παραμέτρων όμως περιγράφεται, ακόμη και σήμερα, μόνον εμπειρικά με ποσοτικές σχέσεις που έχουν προκύψει κατόπιν συσχέτισης μεγάλων βάσεων συναφών πειραμάτων (Berry et al 2004).

Οι επικρατέστερες προτάσεις σήμερα για την εκτίμηση της διατμητικής αντοχής στοιχείων έναντι σεισμού είναι οι σχέσεις που περιέχονται στους κανονισμούς ACI (ASCE/SEI 41, 2007) και EN1998-3 (2005) αντιστοίχως (για σκοπούς αποτιμήσεων υφιστάμενων μελών, στις παραπάνω σχέσεις λαμβάνονται οι μέσες τιμές αντοχής υλικών ( $f_c, f_{yw}$ ):

$$V_n = V_c + V_s = k^A (\mu_\Delta) \cdot 0.6 \sqrt{f_c} \cdot (0.8 A_g) \cdot \left[ \frac{d}{L_s} \cdot \sqrt{1 + \frac{N}{0.5 A_g \cdot \sqrt{f_c}}} \right] + k^A (\mu_\Delta) \cdot \frac{A_{sw} \cdot f_{yw} \cdot d}{s} \quad (1)$$

$$V_n = V_c + V_s + V_N = k^E (\mu_\Delta) \cdot 0.16 \sqrt{f_c} \cdot (0.8 A_g) \left[ \max\{0.5, 100 \rho_{tot}\} \cdot (1 - 0.16 \cdot \min\{5, \frac{L_s}{h}\}) \right] + k^E (\mu_\Delta) \cdot \frac{A_{sw} \cdot f_{yw} \cdot (d - d')}{s} + \min\{N, 0.55 A_c f_c\} \cdot \tan \alpha \quad (2)$$

Η γωνία  $\alpha$  αναφέρεται στην κλίση του διαγωνίου θλιπτήρα όπως φαίνεται στο Σχ. 1 (δ). Στην σχέση (1) έχουν προταθεί μεταγενέστερα κάποιες διορθώσεις για καλύτερη συμβατότητα προς τις θεμελιώδεις αρχές, ήτοι:

(α) Το ενεργό εμβαδό της διατομής του σκυροδέματος που συμβάλει στην διατμητική αντοχή στην κρίσιμη διατομή λαμβάνεται ίσο με το εμβαδόν της θλιβόμενης ζώνης, και άρα ο όρος  $0.6 \sqrt{f_c} \cdot (0.8 A_g)$  αντικαθίσταται με το  $0.4 \sqrt{f_c} \cdot (\chi \cdot b)$  [Tureyen and Frosch (2003)] – εδώ το ύψος της θλιβόμενης ζώνης λαμβάνεται ως  $\chi = \xi d$ . (β) Η συμβολή του αξονικού φορτίου  $N$  λαμβάνεται χωριστά ως η οριζόντια συνιστώσα του διαγωνίου θλιπτήρα (βλ. Chasioti et al. 2013, Pardalopoulos et al. 2013 και Σχ.1 (δ)) και (γ) Ο αριθμός των συνδετήρων που συμμετέχουν στον όρο  $V_s$  προσδιορίζεται από την κλίση του επιπέδου ολισθήσεως  $\theta_v$  το οποίο δεν λαμβάνεται γενικώς ως  $45^\circ$  όπως θεωρούν οι Εξ. (1, 2) [ $\cot \theta_v = 1$ ] αλλά εξαρτάται από το μέγεθος του ανηγμένου αξονικού φορτίου που ασκείται στην διατομή (βλ. Σχ. 1 (δ)):

$$\theta_v = 45^\circ \text{ for } v < 0.1 \ \& \ \theta_v = 45^\circ - 15^\circ \cdot \frac{v}{0.25} \geq 30^\circ \text{ for } v \geq 0.25$$

$$V_n = 0.4 \xi b d \sqrt{f_c} + \lambda \cdot v \cdot (b d f_c) \tan \alpha + A_{sw} f_{yw} \frac{d(1-\xi)}{s} \cdot \cot \theta_v \quad (3)$$

-  $\lambda = 1$  αν  $v \geq 0.1$ , αλλιώς  $\lambda = 0$

$$- \text{Av: } \frac{d(1-\xi)}{s} \cdot \cot \theta_v < 1 \quad \text{τότε η συμμετοχή του οπλισμού αγνοείται}$$

Συνεπώς στο βελτιωμένο προσομοίωμα λαμβάνεται υπόψη η συμμετοχή των εγκάρσιων οπλισμών ( $V_s$ ) εφόσον τουλάχιστον ένας συνδετήρας τέμνει το επίπεδο ολισθήσεως. Επίσης η συμμετοχή του αξονικού φορτίου λαμβάνεται υπόψη εφόσον το ανηγμένο μέγεθος του είναι τουλάχιστον  $v=0.1$ , προκειμένου να διασφαλισθεί ότι οι ρωγμές λόγω ανακύκλισης της φόρτισης στην θλιβόμενη ζώνη έχουν κλείσει ώστε να λειτουργεί ο

συνεχής θλιπτήρας για την μεταφορά του αξονικού από την μία κρίσιμη διατομή στην απέναντί της. Οι όροι  $V_c$  και  $V_s$  στην πιο πάνω εξίσωση (3) επιδέχονται απομείωση με αυξανόμενη μετακίνηση μέσω του εμπειρικού συντελεστή  $k(\mu_A)$  σύμφωνα με την (1) (οι δείκτες  $A$  και  $E$  αναφέρονται στους δύο κανονισμούς αναφοράς ACI και EN1998-3 αντιστοίχως οι οποίοι χρησιμοποιούν διαφορετικές εκφράσεις για τον εν λόγω συντελεστή). Το ως άνω προσομοίωμα επιδέχεται συσχέτιση με αναλυτικά αποτελέσματα για καλύτερη κατανόηση της σχέσης του επιπέδου ολισθήσεως (που ορίζεται από την γωνία  $\theta_v$ ) με τον λόγο του ανηγμένου αξονικού φορτίου και τις λοιπές παραμέτρους σχεδιασμού (π.χ.  $L_s/d$ ) του προβλήματος. Η σχέση αυτή εξετάζεται κάτωθι με την βοήθεια μη-γραμμικής προσομοίωσης με πεπερασμένα στοιχεία.

Ένα ακόμη ζήτημα που χρήζει τεκμηρίωσης και διερεύνησης είναι τα μεγέθη σχετικής στροφής του παραμορφωμένου στοιχείου από την χορδή του κεντροβαρικού άξονα στα στάδια αστοχίας που έχουν οριστεί, δηλαδή στο σημείο απώλειας της διατμητικής αντοχής καθώς και στο σημείο απώλειας της φέρουσας ικανότητας έναντι κατακορύφων φορτίων. Στην βιβλιογραφία έχει προταθεί ένα μόνον προσομοίωμα για τον προσδιορισμό αυτών των μεγεθών, στηριγμένο σε συσχέτιση ενός απλοποιημένου μηχανιστικού μοντέλου με πειραματικά δεδομένα (Elwood and Moehle 2005). Οι σχέσεις αυτές έχουν ως εξής:

(1) Για τον υπολογισμό της σχετικής στροφής κατά την αστοχία σε διάτμηση (απομένουσα αντοχή 80% του μεγίστου):

$$\theta_{sh, fail} = 3\% + 4 \cdot \rho_{st} - 0.025 \cdot \frac{\tau_{ave}}{\sqrt{f_c}} - 0.025 \cdot \nu \geq 1\% \quad (4)$$

όπου  $\rho_{st}$  είναι το ποσοστό του εγκάρσιου οπλισμού,  $\tau_{ave}$  είναι η μέση ονομαστική τάση διάτμησης (απαίτηση, σε MPa), και  $\nu$  είναι το ανηγμένο αξονικό φορτίο. Η ως άνω σχέση υποδηλώνει ότι η ικανότητα παραμόρφωσης του στοιχείου μειώνεται με αυξανόμενο αξονικό φορτίο και διατμητική απαίτηση. Επισημαίνεται ότι δεν εξάγονται σαφή συμπεράσματα μεταξύ της σχέσης που έχει η παραμόρφωση κατά την αστοχία σε διάτμηση με το αξονικό φορτίο όταν πρόκειται για μεγάλα ποσά εγκάρσιου οπλισμού.

(2) Για τον υπολογισμό της σχετικής στροφής κατά την απώλεια στήριξης του αξονικού φορτίου υπολογίζεται η απομένουσα αντοχή που οφείλεται στο μηχανισμό τριβής κατά μήκος του επιπέδου ολισθήσεως ως εξής:

$$\theta_{a, fail} = 4\% \cdot \left[ \frac{1 + \cot^2 \theta_v}{\cot \theta_v} \right] \cdot \frac{1}{1 + (N/V_{s,o})} \quad \text{όπου } V_{s,o} = \frac{A_{sw} f_{yw} (d - d')}{s} \cdot \cot \theta_v \quad (5)$$

Όπου η γωνία κλίσης του επιπέδου ολίσθησης σε σχέση με τον κατακόρυφο άξονα του στοιχείου  $\theta_v$  λαμβάνεται ίση με  $65^\circ$  για την εξαγωγή της (5). Το αποτέλεσμα αυτό προέκυψε κατόπιν συσχέτισης του ως άνω προσομοιώματος με πειραματικές παρατηρήσεις αποκρίσεων από δοκιμές υποστυλωμάτων όπου είχε καταγραφεί η απώλεια αντοχής σε ανάληψη κατακόρυφου φορτίου (e.g. Matchulat et al. (2008)).

## ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΜΕ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ

Στην παρούσα μελέτη τα αποτελέσματα που λαμβάνονται από τις αναλυτικές εξισώσεις (1)-(5) συγκρίνονται με δεδομένα από πειράματα σε υποστυλώματα καμπτοδιατμητικού τύπου και με αριθμητικά αποτελέσματα που προέκυψαν από προσομοιώσεις με πεπερασμένα στοιχεία. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιούνται επιλεγμένα πειραματικά

αποτελέσματα που αναφέρονται σε ομάδες υποστυλωμάτων ορθογωνικής διατομής τα οποία υποβλήθηκαν σε αυξανόμενου εύρους ανακυκλιζόμενη φόρτιση μονής ή διπλής καμπυλότητας μέχρι την αστοχία. Το σημαντικότερο κριτήριο επιλογής των δεδομένων σύγκρισης από τη βιβλιογραφία αφορούσε στην εκδήλωση καθαρά διατμητικής αστοχίας. Χάριν συσχέτισης, συμπεριελήφθησαν από τις μελέτες αναφοράς και ένας ελάχιστος αριθμός δοκιμίων που αστόχησαν καμπτοδιατμητικά. Τα πειραματικά δεδομένα που παρατίθεται εξήχθησαν από μεγαλύτερες βάσεις δεδομένων των Berry et al.(2004) και Biskinis et al. (2007). Οι δοκιμές βάση των οποίων συντάχθηκαν οι προαναφερθείσες βάσεις δεδομένων πραγματοποιήθηκαν από τους Sokoli and Ghannoum (2016), Galal et al.(2005), Imai and Castro (2003), Kabesayasawa et al. (2002), Umemmura et al. (2004), Lynn et al. (1996), Elwood and Moehle (2003), Matchulat et al. (2005), Sezen and Moehle (2001), Wight and Sozen (1973), Henkhaus et al. (2013), Watson and Park (1994) και Holub and Elnashai (2011). Σημειώνεται ότι ως παραμόρφωση διατμητικής αστοχίας ( $\theta_{sh,fail}$ ) λήφθηκε η στροφή κατά την οποία παρατηρείται μείωση της πλευρικής φέρουσας ικανότητας του δοκιμίου κατά 20%, ενώ η αστοχία λόγω αξονικού φορτίου ( $\theta_{a,fail}$ ) αναφέρεται στη στροφή κατά την οποία επέρχεται απώλεια στήριξης του αξονικού φορτίου.

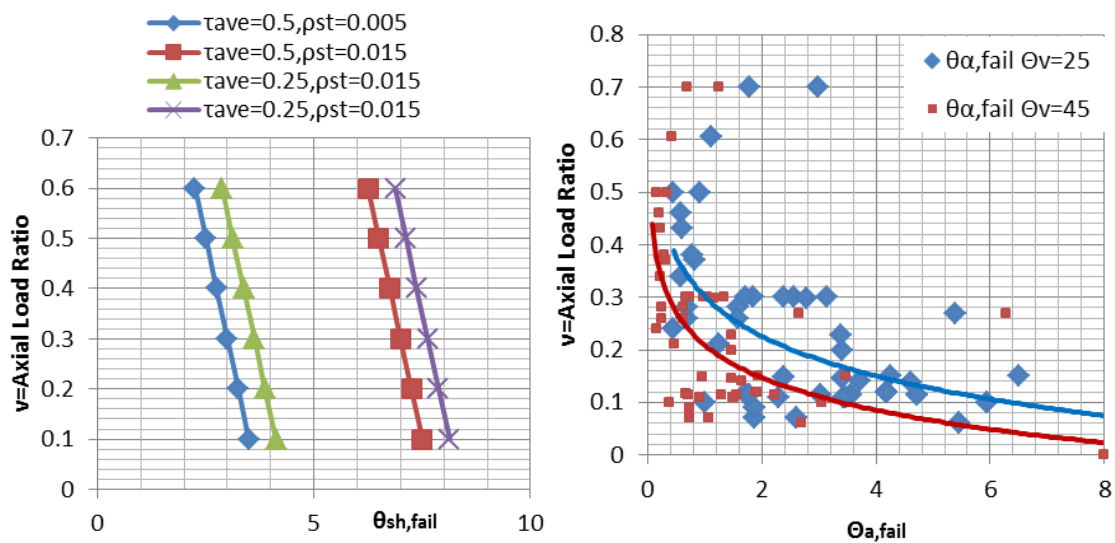
Για σκοπούς σύγκρισης μεταξύ αναλυτικών και αριθμητικών αποτελεσμάτων, πραγματοποιήθηκαν μη γραμμικές αναλύσεις με εξελιγμένα προσομοιώματα πεπερασμένων στοιχείων που αναπτύχθηκαν στο λογισμικό ABAQUS/CAE. Για το σκοπό αυτό, διεξήχθη μελέτη παραμετρικής ευαισθησίας της υπό μελέτης συμπεριφοράς χρησιμοποιώντας ως σημείο αναφοράς ένα συγκεκριμένο δοκίμιο υποστυλώματος από το σύνολο των πειραμάτων που εξετάστηκαν. Πρόκειται για το δοκίμιο 'Specimen1' από την μελέτη Sezen et al. (2002) το οποίο κατά τον πειραματικό έλεγχο παρουσίασε καμπτοδιατμητικού τύπου αστοχία (δηλ. αστόχησε από τέμνουσα αλλά αφού προηγουμένως είχε αναπτύξει καμπτική διαρροή).

## **ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ - ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ**

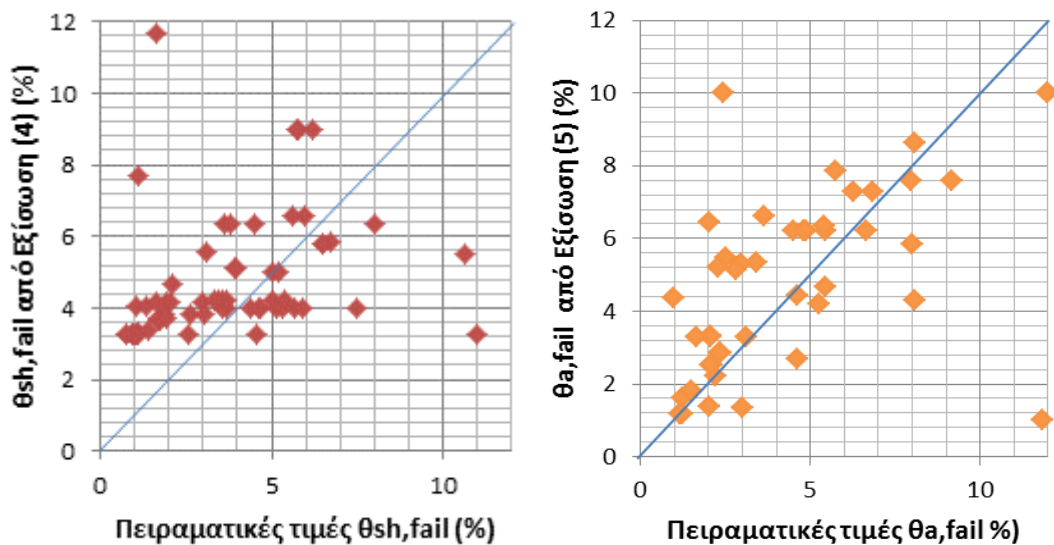
### **Διερεύνηση Σχέσης Δεικτών Παραμόρφωσης - Αξονικού Φορτίου**

Με βάση τις πειραματικές καμπύλες αντίστασης κάθε υποστυλώματος της βάσης δεδομένων, καταγράφηκαν οι παράμετροι  $\theta_{sh,fail}$  και  $\theta_{a,fail}$  όπως ορίστηκαν στις ως άνω σχέσεις (σημείο έναρξης φθιττού κλάδου και σημείο απώλειας στήριξης κατακορύφων φορτίων). Οι πειραματικές τιμές παρουσιάζονται έναντι του ανηγμένου αξονικού φορτίου στα Σχ. 2 (α) και (β) για τις δύο οριακές καταστάσεις. Παρατηρείται ότι η ικανότητα παραμόρφωσης στις δύο οριακές καταστάσεις βαίνει μειούμενη με αυξανόμενο αξονικό φορτίο. Σημειώνεται ότι οι τιμές  $\theta_{sh,fail}$  που λαμβάνονται στο σημείο απώλειας αντοχής κατά 20% θεωρούνται υποκειμενικές αν δεν έχει προηγηθεί διόρθωση για τα φαινόμενα δευτέρας τάξης, καθώς η απομείωση αντοχής σε τέτοια περίπτωση είναι μερικώς πλασματική και οφείλεται στην συμβολή του αξονικού φορτίου στην πρόκληση ροπής στη βάση ( $M=V_{exp} \cdot L_s + N \cdot 0.5 \Delta$ ; Άρα η θεωρητική αντοχή είναι:  $V_n = M/L_s = V_{exp} + N \cdot (0.5 \Delta/L_s) = V_{exp} + N \cdot (\Delta/H) = V_{exp} + N \cdot \theta$  και συνεπώς η στροφή  $\theta_{sh,fail}$  θα έπρεπε να λαμβάνεται στο σημείο με απομένουσα θεωρητική αντοχή ίση με  $80\% \cdot V_n$ , δηλ.  $\theta_{sh,fail} = [0.8(M/L_s) - V_{exp}]/N$  και όχι η στροφή από την περιβάλλουσα σε απομένουσα αντοχή ίση με  $80\% \cdot V_{exp}$ ). Οι αναλυτικές τιμές (από τις Εξ. (4) και (5)) αντιπαραβάλλονται με τις αναλυτικές τιμές στο Σχ. 3 (α) και (β). Αν και τα σημεία συγκεντρώνονται σε νέφος γύρω από την γραμμή με κλίση 1:1 (ισότητα) – είναι

εμφανής η διασπορά μεταξύ αναλυτικού και πειραματικού αποτελέσματος. Η ασάφεια που δημιουργείται από τον ορισμό της διατμητικής αστοχίας φαίνεται και στην φτωχή συσχέτιση των πειραματικών τιμών με τα αποτελέσματα της Εξ. (4) στο Σχ. 3 (α). Αντίθετα η αξονική αστοχία είναι αδιαπραγμάτευτη έννοια (η παραμόρφωση κατά την οποία επέρχεται αξονική κατάρρευση) και άρα δεν υπεισέρχονται σφάλματα κατά τον ορισμό της, γεγονός που αντικατοπτρίζεται στην βελτιωμένη συσχέτιση μεταξύ πειραματικών δεδομένων και Εξ. (5) στο Σχ. 3 (β). Πέραν της ασάφειας ορισμού της  $\theta_{sh, fail}$ , οι διαφορές των αναλυτικών από τις πειραματικές τιμές αποδίδονται - εκτός του αξονικού φορτίου - και στην γωνία κλίσης του επιπέδου ολισθήσεως (που εδώ μετράται με αναφορά στον διαμήκη κεντροβαρικό άξονα του στοιχείου: Αυτό φαίνεται στο Σχ. 2 (β) όπου η αναλυτική εκτίμηση (καμπύλη γραμμής) έχει υπολογισθεί για δύο διαφορετικές υποθετικές τιμές για την  $\theta_n$  με σημαντική απόσταση μεταξύ των καμπυλών εκτίμησης της ικανότητας του δομικού στοιχείου.



**Σχήμα 2.** (α) Σχέση μεταξύ  $\theta_{sh, fail}$  και ανηγμένου αξονικού φορτίου (+ values  $\rightarrow$  Compression) και (β) Σχέση μεταξύ  $\theta_{a, fail}$  και ανηγμένου αξονικού φορτίου (+ values  $\rightarrow$  Compression).



**Σχήμα 3. (α)** Πειραματικές τιμές  $\theta_{sh, fail}$  και αναλυτικά αποτελέσματα της Εξ. (4). Οι τιμές που δίδονται έχουν ληφθεί από τις πειραματικές καμπύλες χωρίς πρότερη διόρθωση. και (β) Πειραματικές τιμές  $\theta_{a, fail}$  και αναλυτικά αποτελέσματα της Εξ. (5).

### Μη Γραμμική Ανάλυση με Πεπερασμένα Στοιχεία

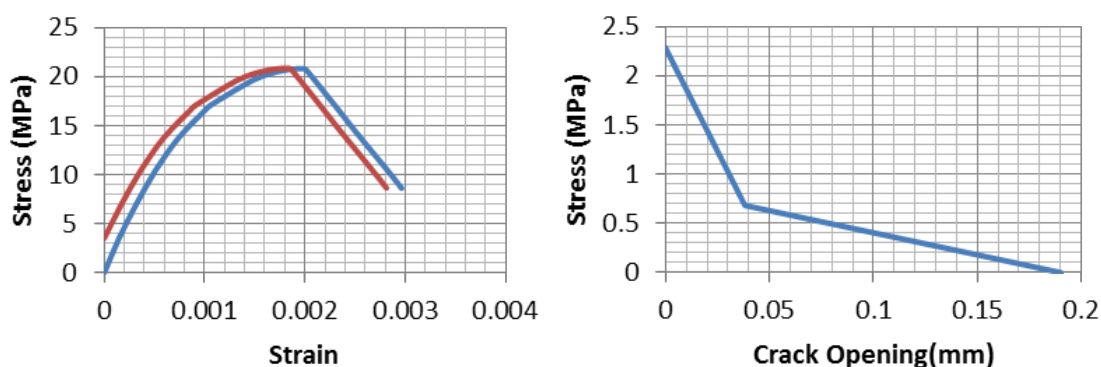
Για διερεύνηση του ρόλου των δύο παραμέτρων διεξήχθη παραμετρική διερεύνηση με σημείο αναφοράς το υποστύλωμα του Σχ. 5 (Specimen 1 από την μελέτη Sezen & Moehle 2003): Πέραν της πειραματικής τιμής ( $\nu=0.15$ ), θεωρούνται πέντε διαφορετικά επίπεδα ανηγμένου αξονικού φορτίου ( $\nu=0.0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4$ ). Για την προσομοίωση το υποστύλωμα αναφοράς διακριτοποιήθηκε με 8-κομβά χωρικά στοιχεία (εξαεδρικά) διαστάσεων 50mm (κύβοι). Οι διαμήκεις ράβδοι προσομοιώθηκαν ως ραβδωτά δίκομβά στοιχεία (truss elements) σε πλήρη σύνδεση με το σκυρόδεμα (πλήρης συνάφεια) και ο εγκάρσιος οπλισμός προσομοιώθηκε ομοίως με ραβδωτά στοιχεία (truss elements). Το υποστύλωμα υπεβλήθη σε σχετική μετακίνηση των άκρων του (100 mm) σε μονοτονικά αυξανόμενα βήματα υπό τις εξής συνοριακές συνθήκες:

- Στήριξη Βάσης:  $u_x=0, u_y=0, u_z=0, \theta_x=0, \theta_y=0, \theta_z=0$
- Στήριξη Κορυφής:  $u_x=100\text{mm}, u_y \neq 0, u_z=0, \theta_x=0, \theta_y=0, \theta_z=0$
- Συμμετρία στο επίπεδο  $z=0$ :  $u_z(0)=0$ .

Για την προσομοίωση της μηχανικής συμπεριφοράς των υλικών χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο Concrete-Damaged Plasticity (CDP) για το σκυρόδεμα και το μοντέλο ελαστοπλαστικής συμπεριφοράς με κράτυνση που βασίζεται στο κριτήριο αστοχίας Von Mises. (Metal Plasticity Model) για τον χάλυβα.

### Μηχανική συμπεριφορά Καταστατικού Προσομοιώματος Σκυροδέματος

Το καταστατικό μοντέλο CDP θεωρεί ως μηχανισμούς αστοχίας την εφελκυστική ρηγματώση και την σύνθλιψη του σκυροδέματος. Η μεταβολή της επιφάνειας διαρροής (ή αστοχίας) ελέγχεται από δυο μεταβλητές κράτυνσης, δηλαδή το ρυθμό πλαστικής παραμόρφωσης στην κύρια θλίψη  $\dot{\epsilon}_c^{pl}$  και σε κύριο εφελκυσμό,  $\dot{\epsilon}_t^{pl}$ , που συνδέονται με τους μηχανισμούς αστοχίας για θλιπτικό και εφελκυστικό φορτίο αντίστοιχα. Η απόκριση του σκυροδέματος σε μονοαξονικό εφελκυσμό και θλίψη χαρακτηρίζεται από ελαστικό και πλαστικό τμήμα (η ανελαστική παραμόρφωση χαρακτηρίζεται ως βλάβη, Σχήμα 4.



**Σχήμα 4.** Πλαστικό τμήμα της απόκρισης του σκυροδέματος σε μονοαξονική φόρτιση για: (α) μονοαξονική θλίψη, (β) μονοαξονικό εφελκυσμό

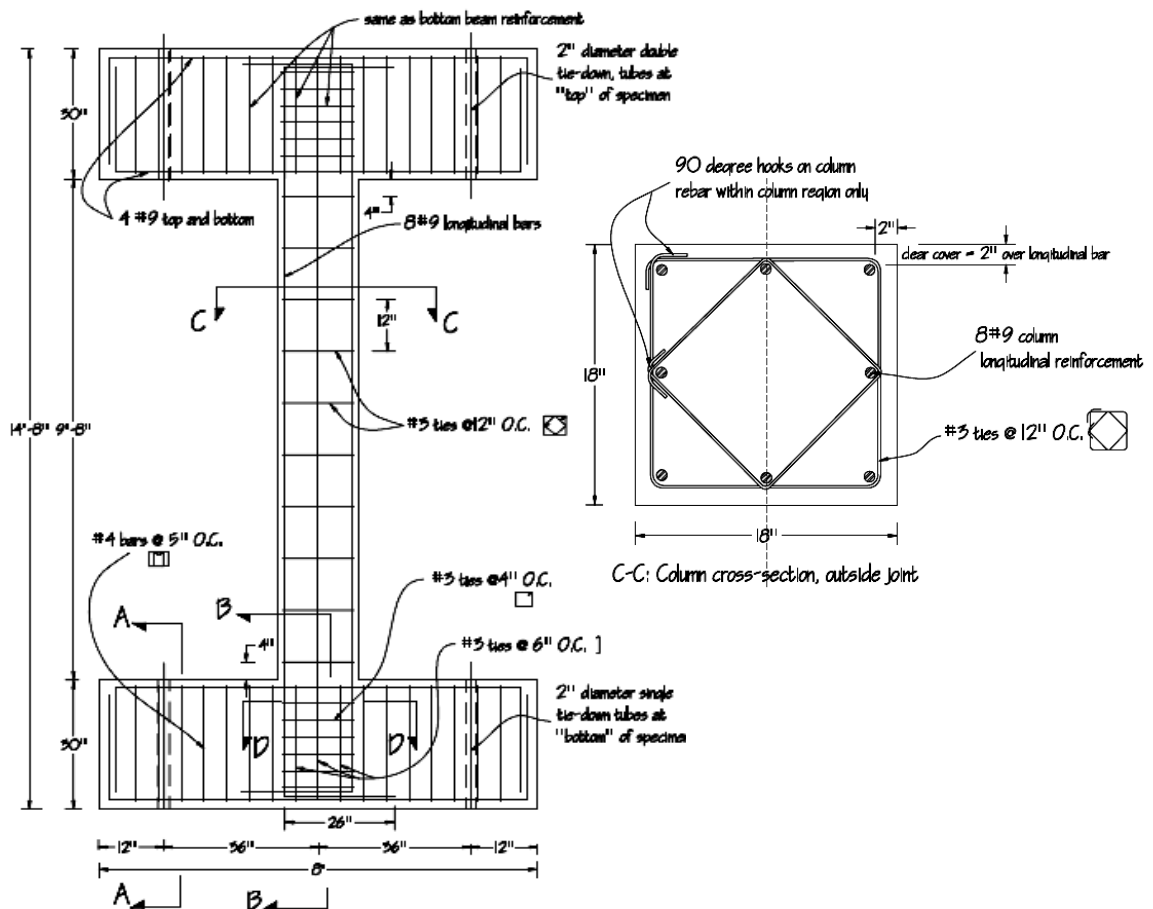


Στο μοντέλο CDP η κλίση του κλάδου αποφόρτισης είναι μικρότερη από την ελαστική δυσκαμψία  $E_o$  λαμβάνοντας υπόψη την συσσώρευση βλάβης (βλ. Εξ. 6, 7). Η μείωση αυτή χαρακτηρίζεται από δυο μεταβλητές βλάβης,  $d_t$  και  $d_c$ , οι οποίες θεωρούνται συναρτήσεις των πλαστικών παραμορφώσεων, της θερμοκρασίας και άλλων μεταβλητών. Οι τιμές των μεταβλητών βλάβης κυμαίνονται από το μηδέν, που σημαίνει υλικό χωρίς βλάβη, μέχρι τη μονάδα που σημαίνει ολική απώλεια της αντοχής. Οι σχέσεις τάσεων-παραμορφώσεων για μονοαξονικό εφελκυσμό και θλίψη είναι αντίστοιχα:

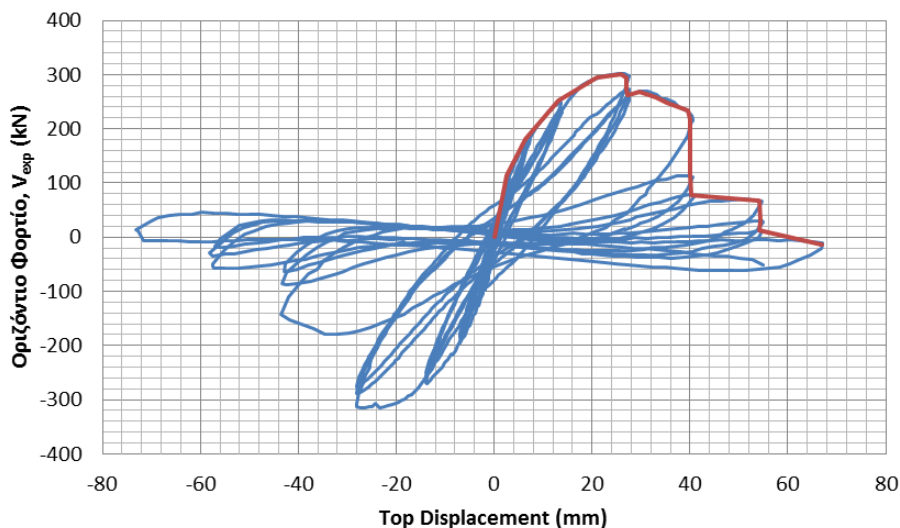
$$\sigma_t = (1 - d_t) E_o (\varepsilon_t - \varepsilon_t^{pl}) \quad (6)$$

$$\sigma_c = (1 - d_c) E_o (\varepsilon_c - \varepsilon_c^{pl}) \quad (7)$$

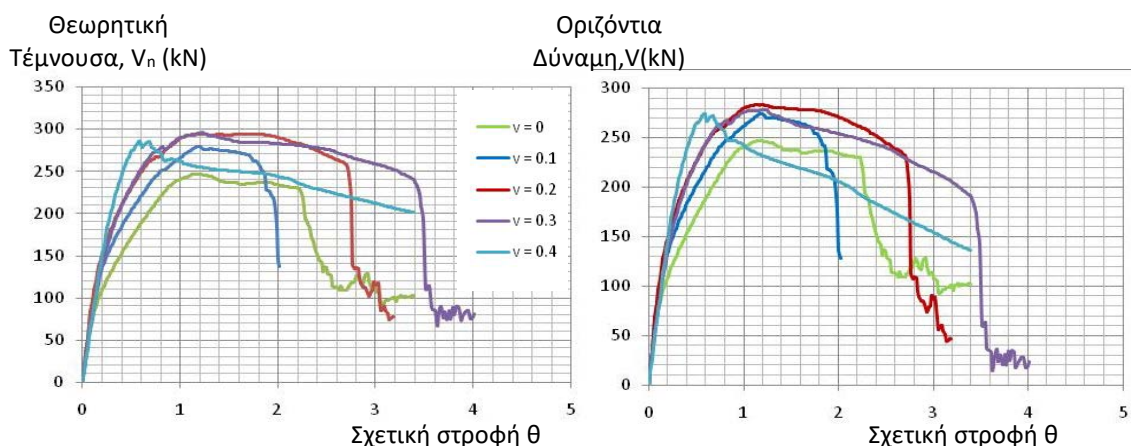
Οι επιφάνειες διαρροής και αστοχίας ορίζονται συναρτήσει ανηγμένων τασικών μέτρων, δηλ.  $\bar{\sigma}_t = \sigma_t / (1 - d_t)$  και  $\bar{\sigma}_c = \sigma_c / (1 - d_c)$ . Οι καμπύλες αντίστασης που εξήχθησαν για το δοκίμιο αναφοράς ( $\nu=0.15$ ) αλλά και για τις διάφορες τιμές του ανηγμένου αξονικού φορτίου δίδονται στα Σχ. 6 και 7 αντίστοιχως. Επιπλέον δίνεται το παραμορφωμένο σχήμα του στοιχείου όπως προέκυψε από την αναλυτική διερεύνηση στα στάδια διατμητικής και αξονικής αστοχίας με σκοπό την καλύτερη κατανόηση της σταδιακής μείωσης της γωνίας του επιπέδου ολισθήσεως (μετρούμενης σε σχέση με τον κεντροβαρικό άξονα) με αυξανόμενο αξονικό φορτίο.



Σχήμα 5. Γεωμετρικές Ιδιότητες Δοκίμιου [Από Sezen and Moehle 2001]



**Σχήμα 6.** Σύγκριση Πειραματικής καμπύλης αντίστασης και υπολογιστικής περιβάλλουσας (Sezen and Moehle, 2003).

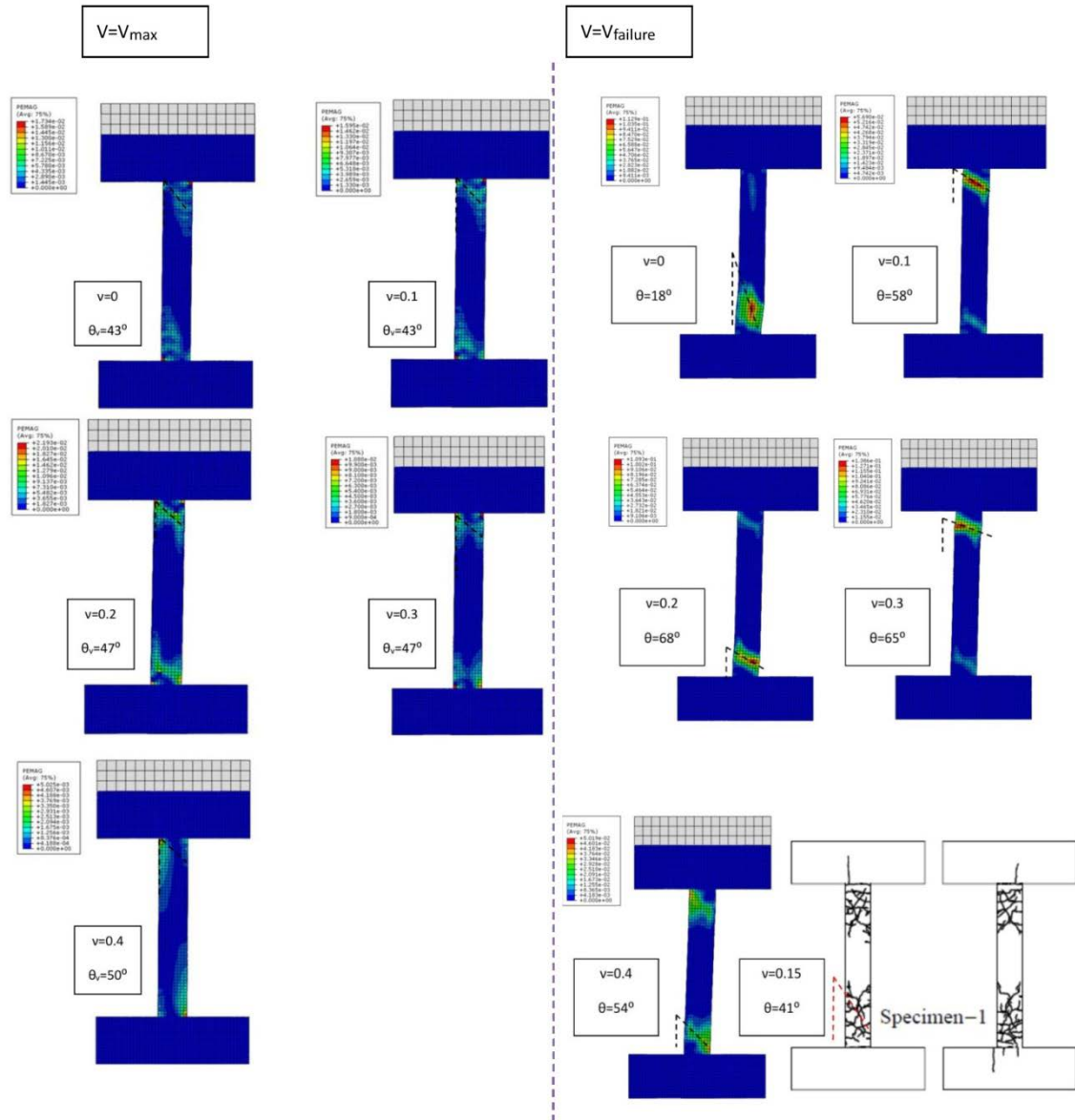


**Σχήμα 7.** Καμπύλες αντίστασης μοντέλου πεπερασμένου στοιχείων για διάφορα επίπεδα αξονικού φορτίου. (α) Θεωρητική τιμή  $= M/L_s$ , (β) Τέμνουσα κατόπιν διόρθωσης για τα φαινόμενα δευτέρας τάξης ( $V=(M/L_s)-N \cdot (\theta)$ ).

Το Σχ. 7 συγκρίνει τις καμπύλες αντίστασης ( $V-\theta$ ) που προκύπτουν λαμβάνοντας υπόψη τη θεωρητική τιμή της τέμνουσας ( $V= M/L_s$ ) (Σχ. 12α) και τις τιμές δύναμης που λαμβάνονται κατόπιν διόρθωσης για φαινόμενα δευτέρας τάξης ( $V=M/L_s-N \cdot \theta$ ) (Σχ. 12β), επιβεβαιώνοντας ορισμένα από τα προηγούμενα συμπεράσματα. Με την αύξηση του αξονικού φορτίου (Σχ. 7 (β)) προκύπτει άμεση μείωση της διαθέσιμης ικανότητας παραμορφώσεων και ταχύτερη απομείωση του κλάδου μετά το μέγιστο σε σχέση με το Σχ. 7 (α), γεγονός που επισημαίνει τους κινδύνους από τον ορισμό της ικανότητας παραμόρφωσης από την περιβάλλουσα της καμπύλης αντίστασης, χωρίς προηγούμενη διόρθωση για τα φαινόμενα δευτέρας τάξης. Στα κάτωθι σχήματα δίδεται το παραμορφωμένο σχήμα των αναλυτικών προσομοιωμάτων (για τις διάφορες τιμές του  $v$ ) στο τέλος της ανάλυσης.

Από το Σχήμα 8 παρατηρείται ότι με αυξανόμενο ανηγμένο αξονικό φορτίο αυξάνεται η έκταση της περιοχής με βλάβη, η οποία έχει τραπεζοειδή μορφή – η γωνία μπορεί να ορισθεί είτε ως κλίση του διαμέσου επιπέδου (με μαύρη διακεκομμένη γραμμή) είτε με την γωνία κλίσης της διαγωνίου του τραπεζιού σε σχέση με την κατακόρυφο. Η γωνία κλίσης αυτή δείχνει περισσότερη ευαισθησία στην παράμετρο μελέτης και γι'αυτό τον

λόγο αναφέρεται η τιμή της ως αντιπροσωπευτική της  $\theta_v$  για τις προηγούμενες σχέσεις υπολογισμού της διατμητικής αντοχής και των παραμορφώσεων στις οριακές καταστάσεις. Στον επόμενο πίνακα δίδονται οι τιμές της γωνίας  $\theta_v$  όπως ορίζεται με βάση τα αναλυτικά αποτελέσματα καθώς και οι τιμές που εκτιμώνται για τις παραμέτρους συμπεριφοράς βάσει των σχέσεων 1-5.



**Σχήμα 8.** Αποτελέσματα ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων για διάφορα επίπεδα αξονικού φορτίου για  $V_{max}$  και  $V_{failure}$

Ανηγμένο αξονικό, $v$	1 $\theta_v$	2 $\theta_v$	$V_s$ βάσει $\theta_v$ από εκδοχή 2	$V_n$ (Εξ. (3))	$\theta_{sh, fail}(\%)$	$\theta_{a, fail}(\%)$
0.00	43.00	37.00	119.23	253.54	3.29	8.32
0.10	43.00	45.00	82.94	274.15	3.22	1.32
0.20	47.00	43.00	77.80	333.75	3.20	0.68
0.30	47.00	44.00	66.17	382.43	3.20	0.40
0.40	50.00	47.00	51.53	426.33	3.23	0.24

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η κατανόηση μέσω ανελαστικής προσομοίωσης, με την βοήθεια τρισδιάστατων πεπερασμένων στοιχείων όγκου, των δεικτών που καθορίζουν την μηχανική συμπεριφορά υποστυλωμάτων έναντι οριζόντιας μετάθεσης με ιδιαίτερη αναφορά στους μηχανισμούς αστοχίας και ανελαστικής ικανότητας παραμόρφωσης. Για την διερεύνηση της παραμετρικής ευαισθησίας των μεγεθών ελέγχθηκαν μέσω προσομοίωσης επιλεγμένα στοιχεία της πειραματικής βάσης που αναδεικνύουν πειραματικά το ρόλο του αξονικού φορτίου, ενώ με βάση το σύνολο των αποτελεσμάτων αξιολογήθηκαν οι σχέσεις που έχουν προταθεί για τις οριακές καταστάσεις αστοχίας σε όρους παραμόρφωσης (αστοχία διατμητικού μηχανισμού και αστοχία φέρουσας ικανότητας) και εντοπίστηκε ο ρόλος της γωνίας του επιπέδου ολισθήσεως και η επίδραση του αξονικού φορτίου στην πραγματοποίηση των φαινομένων αστοχιών με ιδιαίτερη έμφαση στα φαινόμενα δευτέρας τάξης.

## ΑΝΑΦΟΡΕΣ

### *Άρθρα σε επιστημονικά περιοδικά*

- Abraham C. Lynn, Jack P. Moehle, Stephen A. Mahin, and William T. Holmes (1996) Seismic Evaluation of Existing Reinforced Concrete Building Columns. *Earthq.Spectra*: 12(4), pp. 715-739, Nov. 1996.
- Biskinis D., Fardis M. N., Deformations at flexural yielding of members with continuous or lap-spliced bars, *Structural Concrete*, **11**(3):127-138, 1 Sep 2010, ISSN 1464-4177, 1751-7648.
- Elwood K., Matamoros A., Wallace J., Lehman D., Heintz J., Mitchell A., Moore M., Valley M., Lowes L., Comartin C., Moehle J., Update to ASCE/SEI 41 Concrete Provisions”, *Earthq.Spectra*, **23**(3):493-523, 2007.
- Elwood, K.J., and Moehle, J.P., (2005b) Axial Capacity Model for Shear-Damaged Columns, *ACI Struct. J.*, **102**(4):578-587.
- Elwood, K.J., and Moehle, J.P., Drift Capacity of R.C. Columns with Light Transverse Reinf., *Earthq. Spectra*, *EERI*, **21**(1):71-89, 2005.
- Galal K., Ghobarah A., Retrofit of RC square short columns, *Engin.Struc.*, **27**(4):801-813, 2005
- Henkhaus K., Pujol S., Ramirez J., Axial Failure of Reinforced Concrete Columns Damaged by Shear Reversals, *Journal of Structural Engineering ASCE*, **139**(7):1172-1180, July 2013.
- Inel M., Aschheim M., and Pantazopoulou S. J., Seismic Deformation Capacity Indices for Concrete Columns: Model Estimates and Exper. Results, *Magazine of Concrete Research* **59**(4):297-310, 2007.
- Kima S. J., Holub C., Elnashai A.S., Experimental investigation of the behavior of RC bridge piers subjected to horizontal and vertical earthquake motion, *J.Engin.Struc.*, **33**(7):2221-2235, July 2011.
- Panagiotakos T., and Fardis M. Deformation of Reinforced Concrete Members at Yielding and Ultimate, *ACI Structural Journal* **98**(2):135-148, March 2001.
- Sezen H. and Moehle J.P., Seismic Tests of Concrete Columns with Light Transverse Reinforcement, *ACI Structural Journal* **103**(6):05-265, 2006.
- Sokoli D. and Ghannoum W., High-Strength Reinforcement in Columns under High Shear Stresses, *ACI Structural Journal*, **113**(03): 605-614, June 2016.
- Syntzirma D.V., Pantazopoulou S.J. Deformation Capacity of RC Members with Brittle Details under Cyclic Loads”, *ACI Special Publication 236*, “Seismic Shear”, ACI-ASCE Committee 445, 2007.
- Tureyen, A.K. and Frosch, R.J., Concrete Shear Strength: Another Perspective, *ACI Structural Journal*, **100**(5):609-615, 2003.
- Watson S., and Park R., Simulated Seismic Load Tests on RC Columns, *J.Struct.Eng. ASCE*, **120**(6): 1825-1849, June 1994.

### *Διδακτορικές διατριβές και διπλωματικές / μεταπτυχιακές εργασίες*

- Matchulat L., Matamoros A., Mitigation of Collapse Risk in Vulnerable Concrete Buildings, MSc Thesis, Civil Eng., Univ. of Kansas, 2008.