

ΚΑΤΗΓΟΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΠΑΛΑΙΩΝ ΧΑΛΥΒΩΝ ΟΠΛΙΣΜΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ ΤΑ ΙΣΧΥΟΝΤΑ ΠΡΟΤΥΠΑ

Νέζης Χρήστος

Πολιτικός Μηχανικός Πανεπιστημίου Πατρών

Δρίτσος Στέφανος

Αν.Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών

Λέξεις κλειδιά: Χάλυβας, οπλισμός, παραμόρφωση, πρότυπα, κατηγοριοποίηση, ΕΛΟΤ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Στη παρούσα εργασία γίνεται μία προσπάθεια κατηγοριοποίησης των χαλύβων οπλισμού σκυροδέματος, που έχουν χρησιμοποιηθεί στο παρελθόν στις κατασκευές, με βάση τα σημερινά ισχύοντα πρότυπα. Αξιολογούνται αποτελέσματα πειραματικών δοκιμών από ένα μεγάλο πλήθος δοκιμών χάλυβα S500s που είχαν δοκιμαστεί στο ΚΕΔΕ του ΥΠΕΧΩΔΕ. Πέραν της κατηγοριοποίησης που προκύπτει, προσεγγίζεται, για τους χάλυβες που εξετάστηκαν, η σχέση της παραμόρφωσης θραύσης που προβλέπουν τα παλαιά πρότυπα με την παραμόρφωση αστοχίας στο μέγιστο φορτίο που προβλέπουν τα νεότερα.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Από την αρχή του 2007, ισχύουν στη χώρα μας νέα πρότυπα χαλύβων οπλισμού σκυροδέματος.

Μέχρι το 1969 οι κατηγορίες χάλυβα που εχρησιμοποιούντο στην κατασκευή ως οπλισμός σκυροδέματος καθορίζονταν από το Β.Δ. του 1954 «Κανονισμός δια την Μελέτην και Εκτέλεσιν Οικοδομικών Έργων εξ Οπλισμένου Σκυροδέματος», που δημοσιεύτηκε στο ΦΕΚ 160Α-1954. Οι κατηγορίες χαλύβων που επιτρέπονταν να παραχθούν και να χρησιμοποιηθούν με βάση αυτές τις κανονιστικές διατάξεις ήταν οι StI, StIIIα, StIIIβ, StIVα και StIVβ.

Το 1969 εκδόθηκε το ευρωπαϊκό πρότυπο EU 80-69 που αναφερόταν σε χάλυβες μη συγκολλησίμους (ή συγκολλησίμους υπό προϋποθέσεις) και δεν είχε κανένα περιορισμό στη χημική σύσταση του προϊόντος. Με το πρότυπο αυτό εισάγονται οι νέες κατηγορίες χαλύβων FeB40 και FeB50. Επίσης, είναι η πρώτη φορά που καθιερώνεται τρόπος σήμανσης για την αναγνώριση των διαφορετικών κατηγοριών χαλύβων οπλισμού και της προέλευσής τους. Το πρότυπο αυτό αντικαθίσταται το 1985 από το πρότυπο

EU 80-85. Το νέο πρότυπο αναφέρεται μόνο σε συγκολλησίμους χάλυβες κατηγορίας FeB400 και FeB500.

Το 1987, παρουσιάζονται πλέον και τα δυο ελληνικά πρότυπα ΕΛΟΤ 959 και ΕΛΟΤ 971 εκ των οποίων το μεν πρώτο ταυτίζεται με το EU 80-69 ως προς τις κατηγορίες συγκολλησίμων υπό προϋποθέσεις χαλύβων S220, S400 και S500 ενώ το δεύτερο με το EU 80-85 και αναφέρεται σε συγκολλησίμους χάλυβες S400s και S500s.

Το έτος 2005 εκδίδεται το πρότυπο EN 10080 το οποίο αντικαθιστά το EU 80-85 το οποίο αναφέρεται αποκλειστικά σε συγκολλησίμους χάλυβες κατατάσσοντας τους σε τρεις διαφορετικές κατηγορίες ολκιμότητας A, B και C. Στην Ελλάδα σχεδόν παράλληλα εκδίδονται τα πρότυπα ΕΛΟΤ 1421-1, ΕΛΟΤ 1421-2 και ΕΛΟΤ 1421-3 εισάγοντας τις κατηγορίες A και C. Τέλος, το 2006 το πρότυπο ΕΛΟΤ 1421-1 αντικαθίσταται από το ΕΛΟΤ EN 10080 και ισχύει παράλληλα με τα ΕΛΟΤ 1421-2 και ΕΛΟΤ 1421-3 [KTX2007].

Καθώς, λοιπόν, σύγχρονα πρότυπα εκδίδονται γεννάται η ανάγκη ένταξης των παλαιότερων χαλύβων οπλισμού, σε μια εκ των σύγχρονων κατηγοριών αλλά και η ανάγκη συσχέτισης των παλαιών μέτρων ποιότητας με αυτά που ήρθαν να τα αντικαταστήσουν. Τα παραπάνω αποτελούν και σκοπό της παρούσας εργασίας.

2. ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΧΑΛΥΒΩΝ ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ ΠΑΛΑΙΟΤΕΡΑ ΚΑΙ ΙΣΧΥΟΝΤΑ ΠΡΟΤΥΠΑ

Οι κατηγορίες χαλύβων που εισήχθησαν κατά καιρούς από τα νέα πρότυπα στην Ελλάδα, παρουσιάζουν διαφορές μεταξύ τους, άλλοτε μικρές και άλλοτε εντονότερες.

Μέχρι την αρχή της δεκαετίας του 1960 χρησιμοποιούνταν στη χώρα μας ο χάλυβας StI που αφορά λείους χάλυβες, συγκολλησίμους υπό προϋποθέσεις ενώ από τα μέσα τη δεκαετίας του 50' είχαν εμφανισθεί οι κατηγορίες StIIIa και StIVa που αναφέρονται σε λείες, υπό προϋποθέσεις συγκολλησίμες ράβδους και οι StIIIβ και StIVβ αναφερόμενες σε ράβδους με νευρώσεις. Επίσης, το όριο διαρροής της κατηγορίας StI είναι 220MPa, της StIII 400MPa ή 420MPa και της StIV 500MPa, ενώ οι λείες ράβδοι ήταν προϊόντα θερμής έλασης, σε αντίθεση με τους νευροχάλυβες που ήταν προϊόντα θερμής έλασης και εν συνεχεία ψυχρής κατεργασίας. Για τους παραπάνω χάλυβες είχαν τεθεί, επίσης, όρια για την εφελκυστική αντοχή και τη παραμόρφωση μετά τη θραύση.

Τα πρότυπα ΕΛΟΤ 959 και ΕΛΟΤ 971 αντικατέστησαν τους παραπάνω χάλυβες με τους S220, S400 και S500 ή S400s και S500s. Ο δείκτης s υποδηλώνει συγκολλησίμους χάλυβες. Οι ιδιότητες των χαλύβων αυτών ήταν παρεμφερείς με αυτές των προκατόχων τους με ελαφριές αλλαγές στη χημική σύνθεση και κυρίως για τους συγκολλησίμους, η βασική διαφορά τους ήταν πως πλέον αποτελούσαν προϊόντα θερμής έλασης.

Μέχρι τις αρχές της δεκαετίας του 90' χρησιμοποιούνταν οι χάλυβες S400 και λιγότερο οι S220 ενώ από τα μέσα της δεκαετίας του 90' χρησιμοποιούνταν σχεδόν αποκλειστικά ο χάλυβας S500s και εξακολούθησε να χρησιμοποιείται ο χάλυβας S220 [KTX2007]. Ο KTX2000 εισήγαγε, αργότερα, πρόσθετες απαιτήσεις για τους χάλυβες.

Από τις αρχές του 2007, καθίσταται υποχρεωτική η χρήση νέου τύπου χαλύβων κατηγορίας B500A και B500C όπως αυτοί ορίζονται κατ' αντιστοιχία, από τα πρότυπα ΕΛΟΤ 1421-2 και ΕΛΟΤ 1421-3. Σημειώνεται πως το πρότυπο EN 10080 προδιαγράφει τις γενικές απαιτήσεις των σύγχρονων χαλύβων χωρίς να διαχωρίζει τις κατηγορίες τους. Η κατηγορία A αναφέρεται σε ράβδους χαμηλής ολκιμότητας ενώ η C σε ράβδους υψηλής. Οι διαφορές των χαλύβων αυτών από τους προηγούμενους είναι πως πλέον τίθενται όρια για την ολκιμότητα μέσω της παραμόρφωσης στο μέγιστο φορτίο, ϵ_u , αλλά και της εφελκυστικής αντοχής μέσω του λόγου εφελκυστικής αντοχής, f_t προς τη τάση διαρροής f_y . Η χρήση των κατηγοριών αυτών είναι κοινή για όλες σχεδόν τις ευρωπαϊκές χώρες με μια επιπλέον κατηγορία ενδιάμεσης ολκιμότητας, την B, που δεν αναγνωρίζεται από τα ελληνικά πρότυπα. Ο KTX2007 αναφέρει αποκλειστικά τη χρήση χαλύβων B500C σαν ράβδους κύριου οπλισμού ενώ η χρήση των B500A επιτρέπεται μόνο για τη κατασκευή δομικών πλεγμάτων.

Στο παρακάτω πίνακα 1, παρουσιάζονται συγκριτικά, οι προδιαγραφές των παλαιών προτύπων ΕΛΟΤ 959 και ΕΛΟΤ 971 αλλά και των νέων ΕΛΟΤ EN 10080, ΕΛΟΤ 1421-2/-3. Συμπληρωματικά, παρουσιάζονται οι προδιαγραφές της κατηγορίας B του ευρωπαϊκού EN 1992-1-1:2004. Τα αναφερόμενα μεγέθη είναι η εφελκυστική αντοχή, f_t , η ανηγμένη παραμόρφωση μετά τη θραύση, ϵ_5 , η ανηγμένη παραμόρφωση στο μέγιστο φορτίο, ϵ_u , ο λόγος εφελκυστικής αντοχής προς τη τάση διαρροής, f_t/f_y και ο λόγος πραγματικής τιμής της τάσης διαρροής προς την ονομαστική, $f_y,act/f_y,nom$.

Πίνακας 1. Παρουσίαση διαφορών προτύπων ΕΛΟΤ 959, ΕΛΟΤ 971, ΕΛΟΤ EN10080, ΕΛΟΤ 1421-2, ΕΛΟΤ 1421-3 και EN10080.

Μέγεθος	ΕΛΟΤ 959, ΕΛΟΤ 971					ΕΛΟΤ EN10080, ΕΛΟΤ 1421-2 ΕΛΟΤ 1421-3 και EN1992-1-1:2004		EN1992-1- 1:2004 (Eurocode 2)
	S220	S400	S500	S400s	S500s	B500C	B500A	B500B
f_t [MPa]	≥340	≥500	≥550	≥440	≥550	*	*	*
ϵ_5 [%]	≥24	≥14	≥12	≥14	≥12	*	*	*
ϵ_u [%]	*	*	*	*	*	≥7,5	≥2,5	≥5,0
f_t/f_y	*	*	*	≥1,05	≥1,05	≥1,15 & ≤1,25	≥1,05	≥1,08
$f_y,act/f_y,nom$	*	*	*	*	*	≤ 0,35	*	*

* Δεν ορίζεται

Αναφέρεται πως σε αρκετά διεθνή πρότυπα, τα μεγέθη που παρουσιάστηκαν στον παραπάνω πίνακα 1, αναφέρονται με τα σύμβολα R_m αντικαθιστώντας το f_t , R_e αντικαθιστώντας το f_y , A_5 αντικαθιστώντας το ε_5 και A_{gt} αντικαθιστώντας το ε_u .

3. ΚΑΤΗΓΟΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΠΑΛΑΙΟΤΕΡΩΝ ΧΑΛΥΒΩΝ ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ ΤΑ ΣΗΜΕΡΙΝΑ ΙΣΧΥΟΝΤΑ ΠΡΟΤΥΠΑ

Κατά το παρελθόν χρησιμοποιούνταν διαφορετικά μέτρα κατηγοριοποίησης των χάλυβων οπλισμού από τα σημερινά με αποτέλεσμα να μην είναι εύκολη η ένταξη των χάλυβων σε κατηγορίες σύμφωνα με τα σημερινά ισχύοντα πρότυπα. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η χρήση της παραμόρφωσης μετά τη θραύση, ε_5 κατά το παρελθόν αντί της παραμόρφωσης στο μέγιστο φορτίο, ε_u που χρησιμοποιείται σήμερα. Για τον λόγο αυτό, αναζητήθηκαν πειραματικά δεδομένα στα οποία είχε γίνει καταγραφή περισσότερων χαρακτηριστικών από τα απαιτούμενα συμπεριλαμβανομένου και της παραμόρφωσης στο μέγιστο φορτίο.

Δεδομένα ελήφθησαν από 308 δείγματα 2 διαφορετικών παρτίδων χάλυβα κατηγορίας S500s τα οποία είχαν δοκιμαστεί σε εφελκυσμό στο ΚΕΔΕ του ΥΠΕΧΩΔΕ. Τα δεδομένα αφορούσαν το λόγο της τάσης εφελκυσμού προς τη τάση διαρροής (ft/fy), την επιμήκυνση στο μέγιστο φορτίο (ε_u) και την επιμήκυνση μετά τη θραύση (ε_5). Ακολούθησε στατιστική ανάλυση του δείγματος προκειμένου ευρεθεί η κατηγορία A, B ή C στην οποία τα ανήκουν τα δοκίμια.

Η κατηγοριοποίηση των δοκιμών βασίστηκε σε δυο διαφορετικές μεθόδους ανάλυσης. Κατά τη πρώτη μέθοδο εξετάστηκαν ποιοτικά τα αποτελέσματα της στατιστικής ανάλυσης και το πλήθος των απορριφθέντων δοκιμών ενώ για τη δεύτερη μέθοδο χρησιμοποιήθηκαν τα κριτήρια συμμόρφωσης που αναφέρονται στον ΚΤΧ2007.

3.1 Στατιστική επεξεργασία πειραματικών δεδομένων

Εξετάζοντας ποιοτικά τους παραπάνω χάλυβες και θεωρώντας κανονική κατανομή, διαπιστώθηκε πως οι μέσες τιμές των δειγμάτων των δυο παρτίδων, ευρισκόμενες άνω των ελάχιστων ορίων, ικανοποιούν τις απαιτήσεις των προτύπων και για τις τρεις τεχνικές κατηγορίες A, B και C. Τα αποτελέσματα για τους χάλυβες της δεύτερης παρτίδας ικανοποιούν πλήρως τις απαιτήσεις αφού δε παρατηρήθηκε κανένα απορριπτέο δείγμα. Επίσης, η τιμή της διασποράς του ε_u αλλά του λόγου ft/fy είναι μικρή με αποτέλεσμα το διάστημα των τιμών που ορίζεται από το τριπλάσιό της, στο οποίο περιέχεται το 99,7% του πλήθους των δειγμάτων, να ευρίσκεται άνω των ελάχιστων ορίων. Αναλυτικότερα παρατηρείται ότι το 99,7% του πλήθους των δοκιμών, έχει παραμόρφωση ε_u άνω του 7,8% ενώ ο λόγος ft/fy είναι μεγαλύτερος από 1,16 και μικρότερος από 1,22. Συνεπώς οι

χάλυβες της δεύτερης παρτίδας μπορούν χωρίς αμφιβολία να θεωρηθούν κατηγορίας C.

Κάτι τέτοιο δε φαίνεται να ισχύει για τους χάλυβες της πρώτης παρτίδας. Παρά του ότι η μέσης τιμές των ϵ_u και ft/fy καλύπτουν τις απαιτήσεις της κατηγορίας C, η διασπορά και το πλήθος των απορριφθέντων δοκιμίων δεν επιτρέπουν της ένταξη τους στη κατηγορία αυτή. Πιο συγκεκριμένα, το 5% του πλήθους των δοκιμίων, έχει παραμόρφωση ϵ_u κάτω του 6,70% και τιμές του λόγου ft/fy βρίσκονται μεταξύ 1,14 και 1,22. Το πλήθος των δοκιμίων που δεν ικανοποιεί όλες τις απαιτήσεις ορίων που προβλέπονται για χάλυβες κατηγορίας C ισούται με 9,47% και κρίνεται απαγορευτικό για την ένταξη του των χαλύβων στη κλάση αυτή. Όμως, μόνο ένα δοκίμιο από τα 188 δεν πληρεί τα κριτήρια της κατηγορίας B και για τους λόγους αυτούς η παρτίδα αυτή μπορεί να θεωρηθεί ως κατηγορία B.

Στον παρακάτω πίνακα 2 παρουσιάζονται η μέση τιμή ϵ_u , ο λόγος ft/fy καθώς και το ποσοστό των απορριφθέντων δοκιμίων (Απ) για τις δυο παρτίδες.

Πίνακας 2. Αποτελέσματα στατιστικής επεξεργασίας πειραματικών δεδομένων.

	ϵ_u (%)		Απ λόγω ϵ_u (%)			ft/fy		Απ λόγω ft/fy (%)			Σύνολο Απ (%)		
	m	s	A	B	C	m	s	A	B	C	A	B	C
Παρτίδα 1 188 δοκίμια	9,47	1,35	0,53	0,53	6,40	1,18	0,02	0	0	2,10	0,53	0,53	9,58
Παρτίδα 2 120 δοκίμια	10,77	0,99	0	0	0	1,19	0,01	0	0	0	0	0	0

Αξιολόγηση με βάση τα κριτήρια συμμόρφωσης του KTX2007

Τα κριτήρια συμμόρφωσης του KTX2007 ορίζουν πως για τον έλεγχο των ιδιοτήτων των χαλύβων σε εφελκυσμό λαμβάνονται 3 δοκίμια από κάθε παρτίδα και εξετάζονται. Αν αυτά δε πληρούν τις διατάξεις του κανονισμού λαμβάνονται 10 νέα δοκίμια και ελέγχεται εκ νέου η ικανοποίηση ελαστικότερων ορίων για κάθε μεμονωμένη τιμή του δείγματος αλλά και η ικανοποίηση των απαιτήσεων για τις μέσες τιμές των ιδιοτήτων του συνόλου των δειγμάτων. Συγκεκριμένα, οι ελαστικότερες διατάξεις των κριτηρίων συμμόρφωσης ορίζουν για τη κατηγορία A πως $\epsilon_u \geq 2,00$ και ft/fy $\geq 1,03$, για τη κατηγορία B πως $\epsilon_u \geq 4,50$ και ft/fy $\geq 1,06$ και για τη κατηγορία C πως $\epsilon_u \geq 7,00$ και $1,13 \leq \text{ft/fy} \leq 1,23$. Στη παρούσα εργασία κατά παρέκκλιση του πλήθους των 10 δοκιμίων που απαιτεί ο κανονισμός θα εξεταστεί δείγμα 188 δοκιμίων της πρώτης παρτίδας και 120 δοκιμίων της δεύτερης.

Οι μέσες τιμές των δειγμάτων των δοκιμίων ικανοποιούν στο σύνολό τους τις απαιτήσεις των τριών κατηγοριών χαλύβων A, B και C. Ο έλεγχος

σύμφωνα με τα κριτήρια συμμόρφωσης του KTX2007 για τις μεμονωμένες τιμές των ιδιοτήτων των δοκιμίων για τη παρτίδα 1, έδειξε πως σε σύνολο 188 δοκιμίων υπήρξαν 8 δοκίμια, ποσοστό 4,30% των οποίων η παραμόρφωση στο μέγιστο φορτίο, ϵ_u , δεν ικανοποιεί τις απαιτήσεις της κατηγορίας C και μόνο 1 δοκίμιο για τις κατηγορίες A και B, ποσοστά 0,53%, ενώ ως προς το λόγο ft/fy δε παρατηρήθηκαν απορριπτέα δοκίμια. Για τη παρτίδα 2, κάθε μεμονωμένη τιμή του ϵ_u και του ft/fy ικανοποιεί τις απαιτήσεις των κριτηρίων συμμόρφωσης των τριών κατηγοριών, σε σύνολο 120 δοκιμίων. Τα αποτελέσματα αυτά παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες 3 και 4.

Πίνακας 3. Αποτελέσματα ανάλυσης με βάση τα κριτήρια συμμόρφωσης του KTX2007 για τις μέσες τιμές του συνόλου των δειγμάτων.

	Τιμές μεμονωμένων δειγμάτων					
	Απαιτήσεις KTX2007 και EN1992-1-1:2004		Μέση Τιμή Παρτίδας 1		Μέση Τιμή Παρτίδας 2	
κατηγορία	ϵ_u (%)	ft/fy	ϵ_u (%)	ft/fy	ϵ_u (%)	ft/fy
A	$\geq 2,50$	$\geq 1,05$				
B	$\geq 5,00$	$\geq 1,08$	9,47	1,18	10,77	1,19
C	$\geq 7,50$	$\geq 1,15$ $\leq 1,25$				

Πίνακας 4. Αποτελέσματα ανάλυσης με βάση τα κριτήρια συμμόρφωσης του KTX2007 για τις τιμές των μεμονωμένων δειγμάτων.

	Τιμές μεμονωμένων δειγμάτων					
	KTX 2007		Απορριφθέντα Παρτίδας 1 (%)		Απορριφθέντα Παρτίδας 2 (%)	
κατηγορία	ϵ_u (%)	ft/fy	Λόγω ϵ_u	Λόγω ft/fy	Λόγω ϵ_u	Λόγω ft/fy
A	$\geq 2,00$	$\geq 1,03$	0,53	0	0	0
B	$\geq 4,50$	$\geq 1,06$	0,53	0	0	0
C	$\geq 7,00$	$\geq 1,13$ $\leq 1,23$	4,30	0	0	0

Παρατηρώντας τους πίνακες 3 και 4, φαίνεται πως σε έλεγχο με τα ελαστικότερα κριτήρια συμμόρφωσης το ποσοστό των απορριφθέντων χαλύβων, για κάθε κατηγορία ελέγχου της παρτίδας 2, είναι μηδενικό και εξάγεται, λοιπόν, το συμπέρασμα πως οι χάλυβες της δεύτερης παρτίδας μπορούν να θεωρηθούν κατηγορίας C. Για τη πρώτη παρτίδα, το 95,7% των δοκιμίων ικανοποιεί τις απαιτήσεις της κατηγορίας C και δεδομένου ότι

χρησιμοποιήθηκαν 188 δείγματα αντί των 10 που απαιτεί ο κανονισμός, θεωρούνται οριακά ως χάλυβες κατηγορίας C.

Λαμβάνοντας υπ' όψη και τα αποτελέσματα της πρώτης μεθόδου ελέγχου αναφέρεται πως οι χάλυβες της δεύτερης παρτίδας ανήκουν καθαρά στη κατηγορία C ενώ αυτοί της πρώτης βρίσκονται κάπου μεταξύ των κατηγοριών B και C.

4. ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ϵ_u ΚΑΙ ϵ_5

Η μεγαλύτερη αλλαγή που παρατηρήθηκε στα νέα πρότυπα, είναι η θέσπιση υψηλών απαιτήσεων ολκιμότητας καθώς και η αλλαγή των μέτρων που χρησιμοποιούνται για τη καταγραφή της.

Η ολκιμότητα (ductility) των χάλυβων οπλισμού σκυροδέματος, αναφέρεται στην ικανότητα του υλικού και συνεπώς της κατασκευής, να αναλαμβάνει πλαστικές παραμορφώσεις όταν υπερφορτίζεται.

Κατά το παρελθόν, τα όρια για την ολκιμότητα των χάλυβων θεσπίζονταν, από τα τότε ισχύοντα πρότυπα, μέσω της παραμόρφωσης μετά τη θραύση, ϵ_5 . Τα ισχύοντα ελληνικά πρότυπα ΕΛΟΤ EN 10080, ΕΛΟΤ 1421-2 και ΕΛΟΤ1421-3 αλλά και τα διεθνή EN1992-1-1:2004 θεσπίζουν ένα νέο μέτρο για την εκτίμηση της ολκιμότητας των χάλυβων, τη παραμόρφωση στο μέγιστο φορτίο, ϵ_u .

Η μέτρηση της παραμόρφωσης μετά τη θραύση, ϵ_5 γίνεται σε τμήμα της ράβδου που περιλαμβάνει και το λαιμό θραύσης ενώ η μέτρηση της παραμόρφωσης στο μέγιστο φορτίο ϵ_u , γίνεται σε απόσταση τουλάχιστον 5cm από το λαιμό θραύσης που σε εκείνο το σημείο το υλικό έχει αναπτύξει μικρότερη παραμόρφωση. Αυτός είναι και ο βασικός λόγος που τιμές του ϵ_5 είναι κατά πολύ μεγαλύτερες από αυτές του ϵ_u . Αυτό που ενδιαφέρει κυρίως, στην επιστήμη του πολιτικού μηχανικού είναι τι γίνεται σε ένα μεγαλύτερο τμήμα της ράβδου και όχι ακριβώς στο λαιμό, αφού, εξ' άλλου και η πλαστική άρθρωση ενός μέλους μετράτε σε μήκος 40 cm, πράγμα που κάνει πιο ενδιαφέρουσα τη χρήση του ϵ_u .

Βασικό, πρόβλημα που παρουσιάστηκε είναι η ύπαρξη πειραματικών αποτελεσμάτων αλλά και του συντριπτικά μεγαλύτερου μέρους των κατασκευών οπλισμένων με χάλυβες που υπάκουαν στα παλαιότερα πρότυπα για τους οποίους δεν υπάρχουν μετρήσεις άμεσα αξιοποιήσιμες. Θα ήταν, λοιπόν, μεγάλη διευκόλυνση σε έργα ανασχεδιασμού υφιστάμενων κατασκευών, κατά την εκτίμηση της φέρουσας ικανότητας τους αλλά ακόμα και για την διεύρυνση των αποτελεσμάτων από παλαιότερα πειράματα με στόχο την επαναξιοποίησή τους στις μέρες μας, η συσχέτιση της παραμόρφωσης στο μέγιστο φορτίο, ϵ_u και της παραμόρφωσης μετά τη θραύση, ϵ_5 .

Τα μεγέθη των παραμορφώσεων εν γένει επηρεάζονται από τη χημική σύσταση του υλικού και κυρίως τη περιεκτικότητα σε μαγγάνιο και τη ψυχρή κατεργασία των χάλυβων κατά το στάδιο της παραγωγής ή

μετέπειτα. Η αύξηση της ποσότητας του μαγγανίου όπως και η ψυχρή κατεργασία των χαλύβων μειώνουν της ολκιμότητα.

4.1 Πειραματικά δεδομένα δοκιμών καθαρού εφελκυσμού

Δεδομένα λαμβάνονται από 404 δείγματα χαλύβων που προέρχονται από τρεις παρτίδες χαλύβων S500s. Οι πρώτες δυο παρτίδες αφορούν τα 308 δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν για τη κατηγοριοποίηση των παλαιών χαλύβων (κεφάλαιο 3) στα οποία προστέθηκαν 22 δοκίμια, ακόμα, που δεν είχαν χρησιμοποιηθεί προηγουμένως διότι δεν υπήρχε καταγραφή του λόγου εφελκυστικής αντοχής προς τη τάση διαρροής. Η τρίτη παρτίδα αφορά 74 δοκίμια για τα οποία έχουν καταγραφεί μόνο η παραμόρφωση στο μέγιστο φορτίο και η παραμόρφωση θραύσης.

Για λόγους εποπτείας αλλά και για να ευρεθεί ο παράγοντας που επηρεάζει τη συσχέτιση διατηρήθηκε κάθε φορά σταθερή μια από τις παραμέτρους που μπορεί επηρεάσει τα αποτελέσματα. Έτσι οι κατηγορίες συσχέτισης και σύγκρισης ήταν η κατηγοριοποίηση μεταξύ ράβδων διαφορετικών διαμέτρων, κατηγοριοποίηση μεταξύ ράβδων διαφορετικής παρτίδας ανεξάρτητα της διαφορετικής διαμέτρου (όλες διαμέτρους ανά παρτίδα) και κατηγοριοποίηση μεταξύ ράβδων διαφορετικών διαμέτρων ανεξάρτητα της διαφορετικής παρτίδας (όλες οι παρτίδες ανά διάμετρο).

Οι παραπάνω κατηγορίες εξετάστηκαν καταλήγοντας στα συμπεράσματα σχετικά με τη διαδικασία συσχέτισης τα οποία παρουσιάζονται παρακάτω.

4.2 Αξιολόγηση πειραματικών δοκιμών

Γενικά, σε καθεμία από τις τρεις κατηγορίες σύγκρισης η γραμμή που ανταποκρίνεται περισσότερο στη συσχέτιση των ϵ_u και ϵ_s είναι ευθεία της μορφής $y = ax$, με ανοδική τάση, διερχόμενη από το σημείο (0,0).

Η μεγαλύτερη ομοιογένεια στη συσχέτιση των δειγμάτων των τριών παρτίδων παρατηρείται στα δοκίμια της 2^{ης} παρτίδας και στη κατηγορία σύγκρισης «διαφορετικής διαμέτρου και διαφορετικής παρτίδας». Η ποιότητα της παρτίδας αυτής είναι ιδιαίτερα υψηλή, αφού όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, παρουσιάζει τα καλύτερα αποτελέσματα, με όλα τα δείγματα να πληρούν τις απαιτήσεις των προτύπων ΕΛΟΤ EN 10080 και ΕΛΟΤ 1421-3, ως προς την ολκιμότητά τους ενώ παρουσιάζει τη μεγαλύτερη μέση τιμή και τη μικρότερη τυπική απόκλιση για την παραμόρφωση ϵ_u . Πιθανόν, λοιπόν, η ομοιογένεια που παρουσιάζεται στις ευθείες παρεμβολής της δεύτερης παρτίδας να μην είναι τυχαία αλλά να οφείλεται στη καλή ποιότητα του υλικού.

Από τις στατιστικές αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν για καθεμία από τις τρεις κατηγορίες ελέγχου παρατηρήθηκε μεγαλύτερη σύγκλιση των αποτελεσμάτων στη σύγκριση «μεταξύ ράβδων διαφορετικών διαμέτρων

(όλες οι παρτίδες ανά διάμετρο)». Έτσι, η διάμετρος φαίνεται να παίζει καθοριστικό ρόλο στη συσχέτιση των ϵ_u και ϵ_5 έναντι της ποιότητας του υλικού.

Τελικά, για την εύρεση της παραμόρφωσης στο μέγιστο φορτίο, ϵ_u με δεδομένη τη τιμή της παραμόρφωσης στη θραύση, ϵ_5 στο σύνολο των δοκιμών προκύπτουν οι ευθείες παρεμβολής που φαίνονται στον παρακάτω πίνακα 5. Προτιμάται η πολυωνυμική συσχέτιση αφού εμφανίζει μεγαλύτερες τιμές του συντελεστή προσδιορισμού R^2 , έναντι της γραμμικής πράγμα που σημαίνει πως τα αποτελέσματα ανταποκρίνονται περισσότερο στη πραγματικότητα.

Πίνακας 5. Συσχέτιση ϵ_u και ϵ_5 για κάθε διάμετρο.

Πολυωνυμική συσχέτιση	Γραμμική συσχέτιση
$\epsilon_u = 0.769 \epsilon_5 - 0.014 \epsilon_5^2$	$\epsilon_u = 0.43 \epsilon_5$ $\epsilon_5 = 2.32 \epsilon_u$

Επίσης, υπολογίστηκαν και οι εξισώσεις συσχέτισης ανάλογα με τη διάμετρο των ράβδων. Η γραμμική συσχέτιση πλησίασε περισσότερο στη πραγματικότητα από τη πολυωνυμική όπως φάνηκε μετά από παρατήρηση των συντελεστών προσδιορισμού R^2 , που για τις πολυωνυμικές εξισώσεις πήρε χαμηλότερες τιμές έναντι των γραμμικών είναι κι ο λόγος για τον οποίο προτιμάται.

Στον παρακάτω πίνακα 6 φαίνονται οι γραμμικές εξισώσεις συσχέτισης ανά διάμετρο ράβδων.

Πίνακας 6. Ακριβέστερες εξισώσεις συσχέτισης ϵ_u και ϵ_5 ανάλογα με τη διάμετρο των ράβδων.

Διάμετρος ράβδου	Εξισώσεις γραμμικής συσχέτισης	
Φ8	$\epsilon_u = 0,32 \epsilon_5$	$\epsilon_5 = 3,17 \epsilon_u$
Φ10	$\epsilon_u = 0,40 \epsilon_5$	$\epsilon_5 = 2,50 \epsilon_u$
Φ12	$\epsilon_u = 0,42 \epsilon_5$	$\epsilon_5 = 2,38 \epsilon_u$
Φ14	$\epsilon_u = 0,42 \epsilon_5$	$\epsilon_5 = 2,38 \epsilon_u$
Φ16	$\epsilon_u = 0,46 \epsilon_5$	$\epsilon_5 = 2,17 \epsilon_u$
Φ18	$\epsilon_u = 0,47 \epsilon_5$	$\epsilon_5 = 2,13 \epsilon_u$
Φ20	$\epsilon_u = 0,50 \epsilon_5$	$\epsilon_5 = 2,00 \epsilon_u$

Φανερή είναι η επιρροή της διαμέτρου στη συσχέτιση των ϵ_u και ϵ_5 . Αύξηση της διαμέτρου οδηγεί σε μείωση του λόγου ϵ_5/ϵ_u , μειούμενος σταδιακά από 2,50 για ράβδους Φ10, σε 2,00 για ράβδους Φ20 και κάνοντας ένα μεγάλο άλμα από 3,17 για ράβδους Φ8 σε 2,50 για ράβδους Φ10. Παρουσιάζεται,

σε ράβδους μεγαλύτερων διαμέτρων, μια καλύτερη κατανομή της παραμόρφωσης μέσα στο υλικό, που ακόμα και μακρύτερα από το λαιμό, διατηρείται στο μισό αυτής του λαιμού. Συμπεριλαμβανομένου και των διαφορετικών χρονικών σημείων μέτρησης της ϵ_u και της ϵ_5 κατά το στάδιο της φόρτισης, συμπεραίνεται η μεγαλύτερη ομοιογένεια των ράβδων μεγαλύτερης διαμέτρου και η ικανότητα τους να εμφανίζουν υψηλή ολκιμότητα σε τμήματα κοντά στη περιοχή θραύσης.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Προκειμένου για τη κατηγοριοποίηση των χαλύβων S500s σε μια εκ των κατηγοριών A, B και C εξετάστηκαν δυο παρτίδες χαλύβων που αφορούσαν 188 δείγματα η πρώτη και 120 δείγματα η δεύτερη ενώ χρησιμοποιήθηκαν δυο διαφορετικές μέθοδοι αξιολόγησης. Η πρώτη μέθοδος, που βασίστηκε σε ποιοτική εξέταση των παρτίδων, έδειξε πως οι χάλυβες της δεύτερης παρτίδας είναι κατηγορίας C, αφού το σύνολο των δειγμάτων ικανοποιεί τις απαιτήσεις της κατηγορίας, ενώ για αυτούς της πρώτης παρτίδας, το 95% του πλήθους των δειγμάτων δεν ικανοποιεί τις απαιτήσεις της κατηγορίας C, σχεδόν οριακά και για το λόγο αυτό εντάσσεται στη κατηγορία B. Η δεύτερη μέθοδος βασίστηκε στα κριτήρια συμμόρφωσης που αναφέρονται στον KTX2007 και σύμφωνα με αυτήν οι χάλυβες της δεύτερης παρτίδας ανήκουν με βεβαιότητα στη κατηγορία C αλλά και αυτοί της πρώτης παρτίδας μπορούν οριακά να θεωρηθούν της ίδιας κατηγορίας με ποσοστό 95,7% του πλήθους των δειγμάτων να ικανοποιεί τις απαιτήσεις της.

Τελικά, οι δύο παραπάνω μέθοδοι καταλήγουν στο συμπέρασμα πως οι χάλυβες S500s της παρτίδας 2 είναι κατηγορίας C ενώ της παρτίδας 1 βρίσκονται στο όριο μεταξύ των κατηγοριών B και C.

Η παραμόρφωση στο μέγιστο φορτίο και η παραμόρφωση μετά τη θραύση εξαρτώνται από ένα πλήθος παραγόντων που δε μπορούν να ευρεθούν χωρίς να γίνουν εργαστηριακά πειράματα. Η εξάρτηση αυτή δυσχεραίνει την άμεση συσχέτιση των δυο μεγεθών, όμως σαν μια καλή προσέγγιση μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο παραπάνω πίνακας 4, που δίνει αποτελέσματα σε σχέση με τη διάμετρο των ράβδων ή η παρακάτω εξίσωση.

$$\epsilon_u = 0,759\epsilon_5 - 0,014\epsilon_5^2 \quad (1)$$

Τέλος, παρατηρείται η διατήρηση ολοένα και υψηλότερων τιμών παραμόρφωσης σε περιοχές κοντά στο λαιμό της θραύσης καθώς αυξάνεται η διάμετρος της ράβδου, που μεταφράζεται σε αύξηση της ομοιογένειας του υλικού.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ευχαριστίες απευθύνονται στο ΚΕΔΕ του Υ.ΠΕ.ΧΩ.ΔΕ. και στον κ. Σ. Μουγιάκο για τη παροχή σχετικών δεδομένων από δοκιμές εφελκυσμού δοκιμίων χάλυβα οπλισμού σκυροδέματος.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

Πρότυπα

Ελληνικός οργανισμός τυποποίησης, ΕΛΟΤ 959, Χάλυβες οπλισμού σκυροδέματος, Αθήνα (1996)

Ελληνικός οργανισμός τυποποίησης, ΕΛΟΤ 971, Συγκολλησιμοι χάλυβες οπλισμού σκυροδέματος, Αθήνα (1996)

Ελληνικός οργανισμός τυποποίησης, ΕΛΟΤ EN 10080, Χάλυβες οπλισμού σκυροδέματος – Συγκολλησιμοι χάλυβες – Γενικές απαιτήσεις, Αθήνα (2005)

Ελληνικός οργανισμός τυποποίησης, ΕΛΟΤ 1421-1, Χάλυβες οπλισμού σκυροδέματος – Συγκολλησιμοι χάλυβες, Μέρος 1: Γενικές απαιτήσεις, Αθήνα (2004)

Ελληνικός οργανισμός τυποποίησης, ΕΛΟΤ 1421-2, Χάλυβες οπλισμού σκυροδέματος – Συγκολλησιμοι χάλυβες, Μέρος 2: Τεχνική κατηγορία B500A, Αθήνα (2007)

Ελληνικός οργανισμός τυποποίησης, ΕΛΟΤ 1421-3, Χάλυβες οπλισμού σκυροδέματος – Συγκολλησιμοι χάλυβες, Μέρος 3: Τεχνική κατηγορία B500C, Αθήνα (2007)

Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε, Κανονισμός Τεχνολογίας Χαλύβων Οπλισμού Σκυροδέματος 2007, ΚΤΧ 2007, Αθήνα (2007)

EN 1992-1-1:2004 Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings, CEN (2004)

Προσωπικές επαφές

Σ. Μουγιάκος, Μεταλλουργός Μηχανικός ΚΕΔΕ, Υ.ΠΕ.ΧΩ.ΔΕ., (2007)

