

Διερεύνηση αξιοπιστίας συγκολλήσεων με παράθεση χαλύβων οπλισμού σκυροδέματος

Κ. Μηγιάκης
Μεταλλουργός Μηχανικός Ε.Μ.Π.

Ι. Νικολάου
Δρ. Μεταλλουργός Μηχανικός Ε.Μ.Π., ΧΑΛΥΒΟΥΡΓΙΚΗ Α.Ε.

Γ.Δ. Παπαδημητρίου
Καθηγητής, Εργαστήριο Μεταλλογνωσίας, Σχολή Μηχανικών Μετ./Μεταλλουργών Ε.Μ.Π.

Σ. Μουγιάκος
Εργαστήριο Μετάλλων, ΚΕΔΕ, Υ.ΠΕ.ΧΩ.ΔΕ

Λέξεις κλειδιά: συγκόλληση, επικάλυψη, παράθεση, Tempcore

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Πραγματοποιήθηκε εκτενής πειραματική μελέτη που περιλαμβάνει συγκολλήσεις με επικάλυψη σε ράβδους οπλισμού διαμέτρου 8, 14 και 20mm και συγκόλληση με δύο τεχνικές συγκόλλησης (SMAW, GMAW). Ο σχεδιασμός και εκτέλεση των συγκολλήσεων πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τον Κ.Τ.Χ. 2000. Πραγματοποιήθηκε μια σειρά εφελκυσμών σε ασυγκόλλητες και συγκολλημένες ράβδους οπλισμού με παράθεση (επικάλυψη) με την βοήθεια των οποίων καθορίστηκαν οι μέσοι όροι και τυπικές αποκλίσεις τόσο των χαρακτηριστικών αντοχής αλλά και ολκιμότητας. Με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα διενεργήθηκαν στατιστικοί έλεγχοι για να απαντηθούν δυο βασικά ζητήματα. Πρώτο, κατά πόσο οι τιμές των μηχανικών χαρακτηριστικών κατανέμονται κανονικά και δεύτερο αν οι διαφορές που παρατηρούνται μεταξύ των μεγεθών είναι στατιστικά σημαντικές ή όχι σύμφωνα με ανάλυση ANOVA.

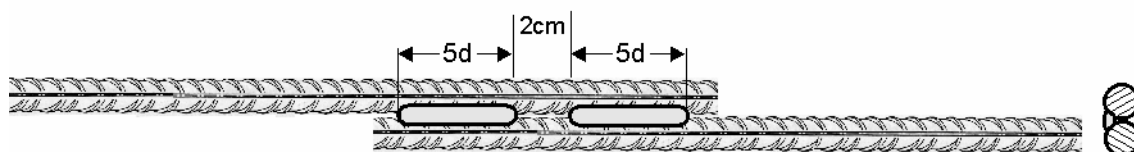
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι χάλυβες οπλισμού σκυροδέματος που χρησιμοποιούνται σήμερα στην Ευρώπη αλλά και στην Ελλάδα, είναι χάλυβες συγκολλησιμοι, υψηλής αντοχής και ολκιμότητας και παράγονται κυρίως με την μέθοδο Tempcore (συγκεκριμένη θερμομηχανική κατεργασία). Σύμφωνα με τα ισχύοντα πρότυπα και κανονισμούς προβλέπεται η συγκόλληση των χαλύβων οπλισμού η οποία πραγματοποιείται κυρίως με συγκόλληση ηλεκτρικού τόξου (ηλεκτροσυγκόλληση). Ανάλογα με την σχετική θέση των ράβδων διακρίνονται δύο βασικοί τύποι σύνδεσης: α) άκρο με άκρο (μετωπική) και β) με παράθεση (επικάλυψη) των ράβδων. Οι συγκολλήσεις με παράθεση είναι περισσότερο εύχρηστες σε σχέση με τις μετωπικές και αφετέρου αποτελούν συχνά την μόνη δυνατή επιλογή μιας και σε μικρές διαμέτρους ράβδων (διάμετρο μικρότερη από 20mm) η μετωπική συγκόλληση είναι πρακτικά αδύνατη. Η εκτέλεση τους εξ' άλλου δεν απαιτεί ιδιαίτερες ικανότητες εκ μέρους του συγκολλητή.

Σύμφωνα με τον Κ.Τ.Χ. 2000, η συγκόλληση με παράθεση πρέπει να εκτελείται μονόπλευρα με δύο ραφές μήκους 5d (όπου d η διάμετρος της ράβδου οπλισμού) αφήνοντας ένα διάκενο περίπου 2cm μεταξύ των δύο ραφών (Σχήμα 1). Εκτεταμένη πειραματική διερεύνηση έχει αποδείξει ότι όταν οι συγκολλήσεις εκτελούνται σύμφωνα με τα παραπάνω προσφέρουν ιδιαίτερα αξιόπιστα αποτελέσματα και χαρακτηρίζονται από μηχανικά χαρακτηριστικά που καλύπτουν τις απαιτήσεις σχεδιασμού των κατασκευών (Νικολάου Ι. 2004).

Ο έλεγχος των μηχανικών χαρακτηριστικών των συγκολλήσεων με επικάλυψη πραγματοποιείται με την διενέργεια δοκιμής εφελκυσμού. Σύμφωνα με το prEN17660 (2002), η

εφελκυστική αντοχή της συγκόλλησης πρέπει να είναι τουλάχιστον ίση με την χαρακτηριστική τιμή αντοχής των χαλύβων οπλισμού που έχουν συγκολληθεί, ενώ σύμφωνα με το παλιότερο εθνικό πρότυπο ΕΛΟΤ 971 (1994) η εφελκυστική αντοχή πρέπει να είναι μεγαλύτερη από το 90% της αρχικής αντοχής (όριο θραύσης) των χαλύβων. Αποτελεί κοινή διαπίστωση από τους σχετικούς ισχύοντες κανονισμούς (DIN 488: 1984, CEN 247/BS 7123: 1989, prEN17660: 2002, ΕΛΟΤ 1421: 2005, ANSI/AWS D1.4: 1992, W186-M1990: 1998) ότι η μόνη απαίτηση που αφορά στη δοκιμή εφελκυσμού σχετίζεται με την εφελκυστική αντοχή των συγκολλήσεων ενώ δεν γίνεται καμία αναφορά στην ολκιμότητα των συνδέσεων ή και στο όριο διαρροής, παράγοντες που καθορίζουν την ικανότητα πλαστικής παραμόρφωσης των συγκολλημένων ράβδων.



Σχήμα 1. Συγκόλληση με παράθεση (επικάλυψη) των ράβδων σύμφωνα με τον Κ.Τ.Χ. 2000.

Προκειμένου να έχουμε μια ολοκληρωμένη εικόνα των μηχανικών χαρακτηριστικών των συγκολλήσεων, πραγματοποιήθηκε εκτενής πειραματική εργασία που περιλαμβάνει συγκολλήσεις με επικάλυψη σε ράβδους οπλισμού διαμέτρου 8, 14 και 20mm και συγκόλληση με δύο τεχνικές (χειρωνακτική συγκόλληση ηλεκτρικού τόξου με επικαλυμμένα ηλεκτρόδια, SMAW και ημιαυτόματη συγκόλληση ηλεκτρικού τόξου σε προστατευτική ατμόσφαιρα αερίου CO₂-Ar, GMAW). Ο σχεδιασμός και εκτέλεση των συγκολλήσεων πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με το Κ.Τ.Χ. 2000. Πραγματοποιήθηκε μια σειρά εφελκυσμών σε ασυγκόλλητες και συγκολλημένες ράβδους οπλισμού με παράθεση (επικάλυψη). Από τις δοκιμές καθορίστηκαν τόσο τα χαρακτηριστικά αντοχής αλλά και ολκιμότητας και υπολογίστηκαν οι μέσοι όροι και τυπικές αποκλίσεις. Με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα διενεργήθηκαν στατιστικοί έλεγχοι για να απαντηθούν δυο βασικά ζητήματα. Πρώτο, κατά πόσο οι τιμές των μηχανικών χαρακτηριστικών κατανέμονται κανονικά (δηλαδή ακολουθούν την κανονική κατανομή) και δεύτερο αν τα μεγέθη από τις διάφορες μεθόδους που μετρήθηκαν είναι στατιστικά ίσα ή διάφορα.

2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Πραγματοποιήθηκε πλήθος δοκιμών που περιλάμβανε εφελκυσμούς σε πλήθος ασυγκόλλητων ράβδων και ράβδων συγκολλημένων με επικάλυψη (παράθεση) με τις τεχνικές συγκόλλησης GMAW και SMAW. Οι χάλυβες οπλισμού εμπίπτουν στην κατηγορία S500s κατά ΕΛΟΤ 971 (1994) και παράγονται με την μέθοδο Tempcore. Πραγματοποιήθηκαν μονόπλευρες διακεκομμένες συγκολλήσεις με επικάλυψη συνολικού μήκους ραφής (L_w) 10d (2x5d). Στην περίπτωση της τεχνικής GMAW χρησιμοποιήθηκε ηλεκτρόδιο συγκόλλησης ER 70S-6, ενώ στην τεχνική SMAW, χρησιμοποιήθηκε ηλεκτρόδιο E6013. Οι συγκολλήσεις πραγματοποιήθηκαν σύμφωνα με τον Πίνακα 1. Ο έλεγχος πραγματοποιήθηκε σε ράβδους ονομαστικής διαμέτρου 8, 14 και 20 mm. Στην περίπτωση των ασυγκόλλητων ράβδων ελέγχθηκε δείγμα 15 δοκιμίων για κάθε διάμετρο, ενώ στην περίπτωση των συγκολλημένων δοκιμίων δείγμα 20 δοκιμίων για κάθε διάμετρο (8, 14, 20 mm) και τεχνική συγκόλλησης (GMAW, SMAW). Το ωφέλιμο μήκος l_0 των δοκιμίων ήταν 264, 460 και 550 mm για τις ράβδους διαμέτρου 8, 14 και 20 mm αντίστοιχα.

Καθώς τα μηχανικά χαρακτηριστικά των χαλύβων οπλισμού παρουσιάζουν σε ορισμένες περιπτώσεις σημαντικές διαφορές μεταξύ τους αν και εμπίπτουν στην ίδια ονομαστική κατηγορία, τόσο τα δοκίμια των αρχικών ράβδων όσο και τα συγκολλημένα δοκίμια επιλέχθηκαν να προέρχονται από το ίδιο μονοκόμματο σίδηρο έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθούν όσο το δυνατόν διαφοροποιήσεις που σχετίζονται τόσο με την χημική σύσταση των χαλύβων όσο και από την μετέπειτα θερμομηχανική κατεργασία (Tempcore). Η χημική σύσταση των χαλύβων που εξετάστηκαν δίνονται στον Πίνακα 2.

Πίνακας 1. Παράμετροι συγκόλλησης με τις οποίες πραγματοποιήθηκαν οι συγκολλήσεις.

Διάμετρος Ράβδου (mm)	Τεχνική Συγκόλλησης	Ηλεκτρόδιο	Διάμετρος Ηλεκτροδίου (mm)	Ένταση ρεύματος (A)	Τάση (V)
8	GMAW	ER 70S-6	1,2	138	17
8	SMAW	E 6013	2,5	90	17
14	GMAW	ER 70S-6	1,2	198	21
14	SMAW	E 6013	3,25	130	24
20	GMAW	ER 70S-6	1,2	240	26
20	SMAW	E 6013	4	160	29

Πίνακας 2. Χημική σύσταση των χαλύβων οπλισμού σκυροδέματος που εξετάστηκαν (%κ.β.). Όλοι οι χάλυβες παράγονται με την μέθοδο Tempcore και εμπίπτουν στην κατηγορία S500s.

D (mm)	C	Mn	Si	N	Ni	Cu	Cr	V	S	P	Ceq
8	0,24	0,80	0,22	0,049	0,09	0,30	0,11	0,002	0,04	0,01	0,46
14	0,18	0,82	0,16	0,010	0,09	0,40	0,03	0,001	0,03	0,02	0,36
20	0,22	0,95	0,21	0,015	0,22	0,25	0,13	0,030	0,04	0,03	0,52

Με βάση τις δοκιμές εφελκυσμού, προσδιορίστηκαν τα μηχανικά χαρακτηριστικά των ασυγκόλλητων και των συγκολλημένων χαλύβων οπλισμού σκυροδέματος και προσδιορίστηκαν το όριο διαρροής (Re), όριο θραύσης (Rm), η ομοιόμορφη συνολική (ελαστική-πλαστική) παραμόρφωση στο μέγιστο φορτίο (Agt).

Η επεξεργασία των αποτελεσμάτων μας επέτρεψε να καθορίσουμε:

- Τις μεταβολές που παρατηρούνται στα μηχανικά χαρακτηριστικά των συγκολλημένων χαλύβων σε σχέση με την αρχική κατάσταση τους.
- Την σύγκριση των μηχανικών χαρακτηριστικών των συγκολλήσεων και των ασυγκόλλητων χαλύβων οπλισμού μιας και η ασφαλής χρήση των συγκολλήσεων προϋποθέτει ότι δεν οδηγούν σε απρόβλεπτη συμπεριφορά.
- Διαφοροποιήσεις που παρατηρούνται σε συγκολλήσεις μεταξύ ράβδων οπλισμού διαφορετικής διαμέτρου (8, 14, 20 mm).
- Διαφοροποιήσεις που προκύπτουν από την χρήση διαφορετικών τεχνικών συγκόλλησης ηλεκτρικού τόξου (GMAW, SMAW).

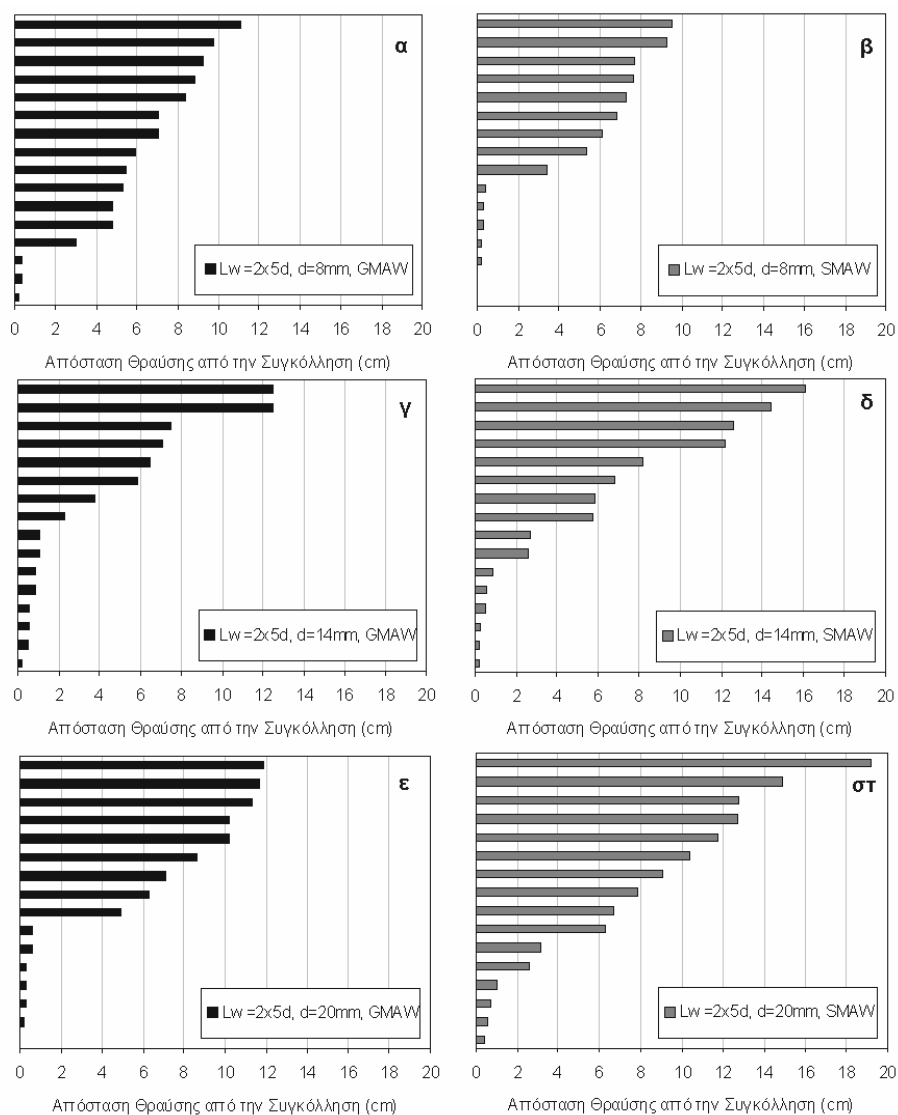
Η στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων έγινε με τη χρήση του λογισμικού MINITAB. Ο υπολογισμός του μέσου όρου (ή μέσης τιμής) και της τυπικής απόκλισης ενός πληθυσμού τιμών βασίζεται στο γεγονός ότι το πλήθος κατανέμεται κανονικά. Για τον λόγο αυτό αρχικά στις τιμές των μηχανικών χαρακτηριστικών που προσδιορίστηκαν με τις δοκιμές εφελκυσμού πραγματοποιήθηκε αρχικά έλεγχος κανονικότητας. Στην συνέχεια διενεργήθηκε σύγκριση των μηχανικών χαρακτηριστικών με τη μέθοδο ANOVA (Καρώνη Χρ., Οικονόμου Π.: 2004) που αποτελεί μια επέκταση του κλασικού έλεγχου υποθέσεων μέσω των μέσων τιμών δυο πιθανοσυνόλων, διότι μπορούν να εξεταστούν ταυτόχρονα περισσότερες από δύο στοχαστικές μεταβλητές.

3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ – ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

3.1 Περιοχή Θραύσης

Σε όλες τις συγκολλήσεις με επικάλυψη που εξετάστηκαν, η θραύση εκδηλώθηκε στον χάλυβα οπλισμού, δηλαδή, δεν παρατηρήθηκε καμία αστοχία στην περιοχή της συγκόλλησης. Η απόσταση της θραύσης από την άκρη της συγκόλλησης, φαίνεται για όλες τις περιπτώσεις στο Σχήμα 2. Η θραύση σημειώθηκε είτε στην ΘΕΖ (Θερμικά Επηρεασμένη Ζώνη) είτε μακριά από αυτήν επί της

ράβδου οπλισμού. Ποσοστό μεταξύ 25 έως 44% των θραύσεων των συγκολλήσεων που πραγματοποιήθηκαν με την τεχνική GMAW και μεταξύ 19-50% που πραγματοποιήθηκαν με την τεχνική SMAW, εκδηλώθηκε στην ΘΕΖ των χαλύβων οπλισμού. Είναι λογικό ότι το πλήθος αυτό είναι ενδεικτικό της επίδρασης των συγκολλήσεων στα μηχανικά χαρακτηριστικά των χαλύβων οπλισμού σκυροδέματος.



Σχήμα 2. Απόσταση σημείου θραύσης σε συγκολλήσεις με επικάλυψη (παράθεση) συνολικού μήκους ραφής 10d (2x5d) σε ράβδους διαμέτρου α,β) 8 mm γ,δ), 14 mm και ε,στ) 20 mm. Οι συγκολλήσεις έχουν πραγματοποιηθεί με α,γ,ε) την τεχνική GMAW και β,δ,στ) την τεχνική SMAW.

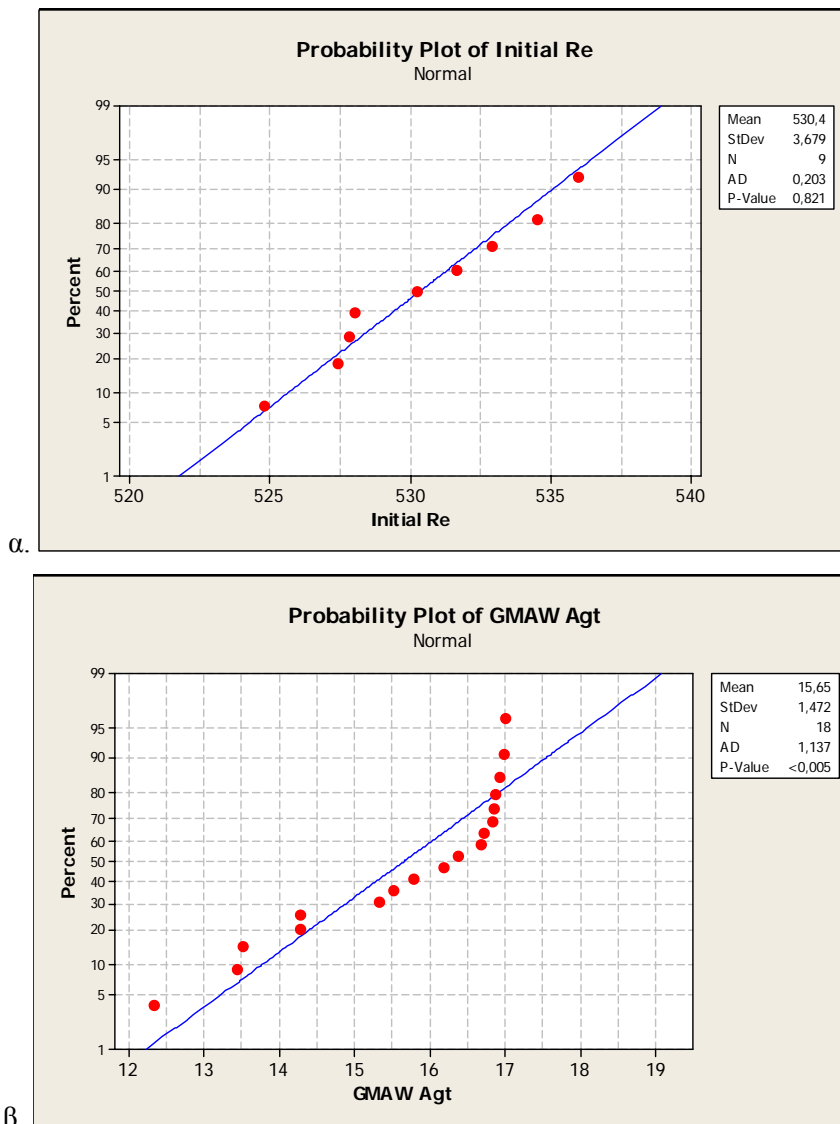
3.2 Στατιστικός έλεγχος κανονικότητας των κατανομών των μηχανικών χαρακτηριστικών

Ο υπολογισμός του μέσου όρου (ή μέσης τιμής) και της τυπικής απόκλισης ενός πληθυσμού τιμών βασίζεται στο γεγονός ότι το πλήθος κατανέμεται κανονικά. Για τον λόγο αυτό στις τιμές των μηχανικών χαρακτηριστικών που προσδιορίστηκαν με τις δοκιμές εφελκυσμού πραγματοποιήθηκε αρχικά έλεγχος κανονικότητας. Διακρίνονται δύο τρόποι ελέγχου της κανονικότητας: Ο πρώτος

έλεγχος (γραφικός) βασίζεται σε κατάλληλη γραφική απεικόνιση των τιμών, σύμφωνα με την οποία οι τιμές του πλήθους πρέπει να συμπίπτουν με την ευθεία κανονικότητας. Ο δεύτερος βασίζεται στην μέθοδο Anderson-Darling (D. C. Montgomery, 1997) κατά την οποία ελέγχεται η τιμή p-value της κατανομής.:

Αν $p > 0,05$ τότε ισχύει η υπόθεση H_0 : οι τιμές ακολουθούν την κανονική κατανομή

Αν $p < 0,05$ τότε ισχύει η υπόθεση H_1 : οι τιμές δεν ακολουθούν την κανονική κατανομή



Σχήμα 3. Διαγράμματα κανονικότητας μεγεθών: (α) Το R_m ακολουθεί την κανονική κατανομή και (β) το A_{gt} δεν ακολουθεί την κανονική κατανομή

Χαρακτηριστικά παραδείγματα διαγραμμάτων κανονικότητας δίνονται στο Σχήμα 3. Στο Σχήμα 3α δίνεται η τυπική εικόνα πλήθους τιμών που κατανέμονται κανονικά όπου και παρατηρείται ότι οι πειραματικές τιμές συμπίπτουν με την ευθεία κανονικής κατανομής και η τιμή p-value είναι μεγαλύτερη από 0,05 (0,821) όπως ορίζει το κριτήριο Anderson-Darling. Από τα πειραματικά αποτελέσματα αποδείχθηκε ότι σε όλες τις περιπτώσεις το όριο διαρροής (R_e) και το όριο θραύσης (εφελκυστική αντοχή, R_m) ακολουθούν την κανονική κατανομή, όπως φαίνεται και στον Πίνακα 3 στον οποίο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του ελέγχου κανονικότητας για ολόκληρο το

δειγματικό χώρο της μελέτης. Αντιθέτως, σε ορισμένες περιπτώσεις, οι τιμές της ομοιόμορφης παραμόρφωσης (Agt) ή του λόγου Rm/Re δεν ικανοποιούν τα κριτήρια κανονικότητας. Χαρακτηριστική μορφή διαγράμματος στο οποίο δεν ικανοποιούνται οι απαιτήσεις κανονικότητας δίνεται στο Σχήμα 3β, όπου και παρατηρείται ότι οι τιμές δεν ταυτίζονται με την ευθεία κανονικότητας και η τιμή p-value είναι μικρότερη από 0,05.

Πίνακας 3. Έλεγχος κανονικότητας των μηχανικών χαρακτηριστικών συγκολλημένων (GMAW, SMAW) και ασυγκόλλητων (αρχικά) χαλύβων οπλισμού σκυροδέματος

Διάμετρος ράβδου	Μηχανικό Χαρακ/κό	Αρχικά		GMAW		SMAW	
		Δεκτή η H ₀	Δεκτή η H ₁	Δεκτή η H ₀	Δεκτή η H ₁	Δεκτή η H ₀	Δεκτή η H ₁
8mm	Rm	✓		✓		✓	
	Re	✓		✓		✓	
	Agt	✓			✓	✓	
	Rm/Re	✓		✓		✓	
14mm	Rm	✓		✓		✓	
	Re	✓		✓		✓	
	Agt		✓	✓			✓
	Rm/Re	✓			✓	✓	
20mm	Rm	✓		✓		✓	
	Re	✓		✓		✓	
	Agt	✓		✓			✓
	Rm/Re		✓	✓		✓	

3.3 Μηχανικά χαρακτηριστικά συγκολλημένων και ασυγκόλλητων χαλύβων οπλισμού σκυροδέματος

Ο έλεγχος υποθέσεων σύμφωνα με την μέθοδο ANOVA (Καρώνη Χρ., Οικονόμου Π. 2004) αποτελεί μια επέκταση του κλασικού έλεγχου υποθέσεων μέσω των τιμών δυο πιθανοσυνόλων, διότι μπορούν να εξεταστούν ταυτόχρονα περισσότερες από δύο στοχαστικές μεταβλητές. Στην προκειμένη περίπτωση οι μεταβλητές είναι τα μηχανικά χαρακτηριστικά από τρεις διαφορετικές κατηγορίες δοκιμών (συγκολλημένα με τη μέθοδο GMAW, συγκολλημένα με τη μέθοδο SMAW και τα αρχικά). Σαν μηδενική υπόθεση στην ανάλυση που έγινε είναι η ισότητα των μέσω των τιμών των μηχανικών χαρακτηριστικών Rm, Re, Agt, και Rm/Re και σαν εναλλακτική ότι όλες οι μέσες τιμές δεν είναι ίσες. Δηλαδή έγινε ο εξής έλεγχος για κάθε μηχανικό χαρακτηριστικό:

Μηδενική υπόθεση: $H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3$

Εναλλακτική υπόθεση: $H_1: \mu_1 \neq \mu_2 \neq \mu_3$

Σύμφωνα με τη θεωρία της στατιστικής το τεστ αυτό που διενεργείται είναι δίπλευρο και επιλέγουμε σαν επίπεδο σημαντικότητας $\alpha=5\%$ για την αποδοχή της μηδενικής υπόθεσης και $\alpha=1\%$ για την απόρριψη της.

Δημιουργήθηκαν τρεις βασικές ομάδες δοκιμών, τα αρχικά (ασυγκόλλητες ράβδοι), τα συγκολλημένα με τη μέθοδο GMAW και τα συγκολλημένα με τη μέθοδο SMAW. Κάθε ομάδα χωρίστηκε σε τρεις υποομάδες διαφορετικών διαμέτρων 8, 14 και 20 mm. Στο πλήθος των δοκιμών κάθε υποομάδας έγιναν δοκιμές εφελκυσμού από τις οποίες εξήχθησαν οι τιμές για τα μηχανικά χαρακτηριστικά των ράβδων όπως το όριο θραύσης Rm, το όριο διαρροής Re, η ομοιόμορφη παραμόρφωση Agt και ο λόγος Rm/Re. Τα αποτελέσματα για κάθε μηχανικό χαρακτηριστικό, δίνονται συγκεντρωτικά στους Πίνακες 4-7 ενώ για κάθε διάμετρο στα Σχήματα

4-6. Στους Πίνακες 4-7, έχουν γραμμοσκιαστεί οι περιπτώσεις που δεν ικανοποιούν τα κριτήρια κανονικότητας όπως προκύπτει από τον Πίνακα 3.

Όπως αποδείχθηκε παραπάνω, σε όλες τις περιπτώσεις το όριο διαρροής (Re) και το όριο θραύσης (εφελκυστική αντοχή, Rm) ακολουθούν την κανονική κατανομή. Η ισοδύναμη τάση διαρροής και θραύσης (εφελκυστική αντοχή) των συγκολλήσεων με επικάλυψη (Πίνακες 4-5) αν και παρουσιάζει ορισμένες διαφορές σε σχέση με τους ασυγκόλλητους χάλυβες οπλισμού, είναι σε όλες τις περιπτώσεις μεγαλύτερη της τιμής των 500 MPa, που είναι η χαρακτηριστική τιμή της κατηγορίας S500s. Σε σχέση με την αρχική κατάσταση των χάλυβων, η ποσοστιαία μεταβολή του ορίου διαρροής (Re) κυμαίνεται μεταξύ 96 και 110% για τις εξεταζόμενες διαμέτρους. Οι διαφορές που παρατηρούνται μεταξύ των δύο τεχνικών συγκόλλησης είναι μικρή, ενώ δεν φαίνεται να υπάρχει κάποια εξάρτηση με την διάμετρο της ράβδου που έχει συγκολληθεί (Πίνακας 5). Όσον αφορά στο όριο θραύσης (εφελκυστική αντοχή), η ποσοστιαία μεταβολή κυμαίνεται μεταξύ 96 και 105% για τις εξεταζόμενες διαμέτρους (Πίνακας 4).

Πίνακας 4. Μέση τιμή και τυπική απόκλιση του ορίου θραύσης (Rm) των ασυγκόλλητων χάλυβων οπλισμού και της ισοδύναμης τάσης θραύσης των συγκολλήσεων με επικάλυψη ($L_w=2x5d$) σε ράβδους διαμέτρου 8, 14 και 20mm.

Διάμετρος d (mm)	GMAW (ER 70S-6)		SMAW (E 6013)		Ασυγκόλλητοι	
	Μέση τιμή	Τυπική απόκλιση	Μέση τιμή	Τυπική απόκλιση	Μέση τιμή	Τυπική απόκλιση
8	709,7	20,7	702,8	16,0	723,5	19,2
14	656,0	6,3	681,8	21,6	647,4	2,7
20	631,7	3,1	609,9	2,3	637,5	2,8

Πίνακας 5. Μέση τιμή και τυπική απόκλιση του ορίου διαρροής (Re) των ασυγκόλλητων χάλυβων οπλισμού και της ισοδύναμης τάσης διαρροής των συγκολλήσεων με επικάλυψη ($L_w=2x5d$) σε ράβδους διαμέτρου 8, 14 και 20mm.

Διάμετρος d (mm)	GMAW (ER 70S-6)		SMAW (E 6013)		Ασυγκόλλητοι	
	Μέση τιμή	Τυπική απόκλιση	Μέση τιμή	Τυπική απόκλιση	Μέση τιμή	Τυπική απόκλιση
8	608,8	26,9	610,2	21,6	631,0	26,0
14	542,9	4,7	581,0	26,1	530,4	3,7
20	525,9	3,2	534,5	2,7	532,0	4,0

Πίνακας 6. Μέση τιμή και τυπική απόκλιση του λόγου Rm/Re (όριο θραύσης, Rm προς όριο διαρροής, Re) των ασυγκόλλητων χάλυβων οπλισμού και λόγος των ισοδύναμων τάσεων θραύσης και διαρροής των συγκολλήσεων με επικάλυψη ($L_w=2x5d$) σε ράβδους διαμέτρου 8, 14 και 20mm.

Διάμετρος d (mm)	GMAW (ER 70S-6)		SMAW (E 6013)		Ασυγκόλλητοι	
	Μέση τιμή	Τυπική απόκλιση	Μέση τιμή	Τυπική απόκλιση	Μέση τιμή	Τυπική απόκλιση
8	1,17	0,04	1,15	0,02	1,15	0,02
14	1,20	0,01	1,17	0,02	1,22	0,01
20	1,20	0,01	1,14	0,01	1,19	0,01

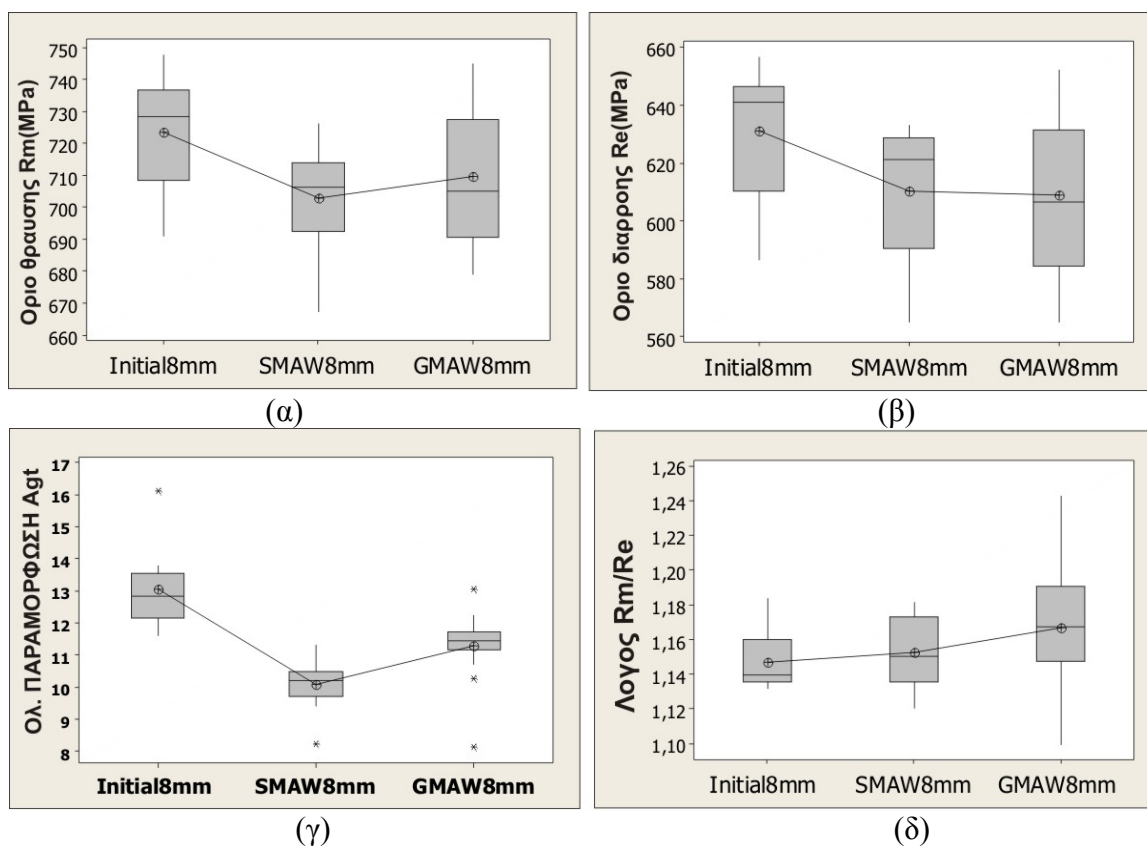
Καθώς οι μεταβολές που παρατηρούνται στις ισοδύναμες τάσεις θραύσης και διαρροής είναι για ορισμένη διάμετρο προς την ίδια κατεύθυνση, ο λόγος Rm/Re παραμένει πρακτικά αμετάβλητος, όπως αποδεικνύεται από την ποσοστιαία μεταβολή κυμαίνεται μεταξύ 96 και 102% για τις εξεταζόμενες διαμέτρους (Πίνακας 6).

Σε αντιδιαστολή με την μεταβολή των τάσεων θραύσης και διαρροής, η ολκιμότητα των χάλυβων, παρά το γεγονός ότι διατηρείται σε σχετικά αυξημένα επίπεδα, επηρεάζεται σε

μεγαλύτερο βαθμό. Σε σχέση με την αρχική κατάσταση των χαλύβων, η μείωση κυμαίνεται μεταξύ 10 και 23% για τις εξεταζόμενες διαμέτρους (Πίνακας 7).

Πίνακας 7. Μέση τιμή και τυπική απόκλιση της συνολικής ομοιόμορφης παραμόρφωσης στο μέγιστο φορτίο, Agt, των ασυγκόλλητων χαλύβων οπλισμού και των συγκολλήσεων με επικάλυψη ($L_w=2 \times 5d$) σε ράβδους διαμέτρου 8, 14 και 20 mm.

Διάμετρος d (mm)	GMAW (ER 70S-6)		SMAW (E 6013)		Ασυγκόλλητοι	
	Μέση τιμή	Τυπική απόκλιση	Μέση τιμή	Τυπική απόκλιση	Μέση τιμή	Τυπική απόκλιση
8	11,3	1,0	10,0	1,1	13,0	1,3
14	13,3	1,3	13,0	1,3	16,0	0,8
20	16,4	1,1	15,7	0,9	18,3	1,7

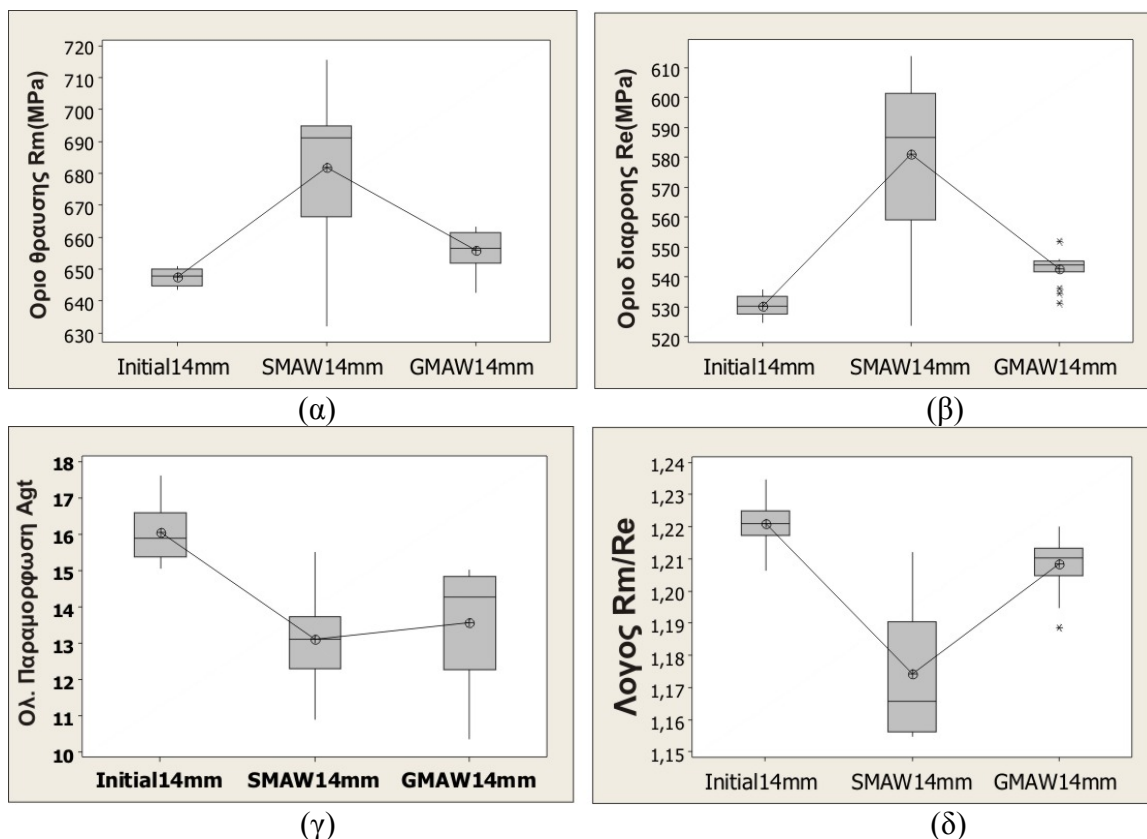


Σχήμα 4. Διαγράμματα σύγκρισης μηχανικών χαρακτηριστικών ασυγκόλλητων και συγκολλημένων (SMAW, GMAW) ράβδων οπλισμού σκυροδέματος διαμέτρου 8mm (α) ορίου θραύσης (εφελκυστική αντοχή) Rm, (β)ορίου διαρροής Re, (γ) ολικής ομοιόμορφης παραμόρφωσης Agt και (δ) λόγου Rm/Re

3.4 Ράβδοι διαμέτρου $\Phi 8$ mm

Στο Σχήμα 4 παρουσιάζονται τα διαγράμματα που προέκυψαν από τη στατιστική σύγκριση των μηχανικών χαρακτηριστικών για τις ασυγκόλλητες και συγκολλημένες ράβδους διαμέτρου 8mm. Όσον αφορά το όριο διαρροής Re και το όριο θραύσης Rm ο στατιστικός έλεγχος για την ισότητα των μέσων τιμών έδωσε την μηδενική υπόθεση $H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3$ δεκτή σε διάστημα εμπιστοσύνης $\alpha=95\%$. Το τελευταίο υποδηλώνει ότι αν και παρατηρείται, όπως αναπτύχθηκε στην παράγραφο

3.3, διαφορά της τάξης 96-110% και 95-105% για το όριο διαρροής και θραύσης, αντίστοιχα, σε σχέση με τις ασυγκόλλητες ράβδους, η διαφορά αυτή δεν είναι στατιστικά σημαντική σύμφωνα με την ανάλυση ANOVA. Αυτό φαίνεται και από τα διαγράμματα στο Σχήμα 4 όπου οι μέσες τιμές των μεγεθών βρίσκονται πολύ κοντά και η διακυμάνσεις των τιμών τους τέμνονται σε μεγάλα διαστήματα. Όσον αφορά την ολική ομοιόμορφη παραμόρφωση Agt ο στατιστικός έλεγχος απέρριψε τη μηδενική υπόθεση H_0 με p -value $<0,005$. Αυτό φαίνεται και στο Σχήμα 4.γ για την ολική ομοιόμορφη παραμόρφωση όπου στις αρχικές ράβδους είναι μεγαλύτερη από αυτή των συγκολλημένων δοκιμίων και με τις δύο μεθόδους συγκόλλησης. Η μείωση κυμαίνεται μεταξύ 10 και 23% για όλες τις εξεταζόμενες διαμέτρους (Πίνακας 7). Όσον αφορά στις τιμές του λόγου Rm/Re (Σχήμα 4.δ) τόσο οι μέσες τιμές όπως και τα διαστήματα διακύμανσης και για τις τρεις ομάδες δοκιμίων δεν διαφέρουν σημαντικά.

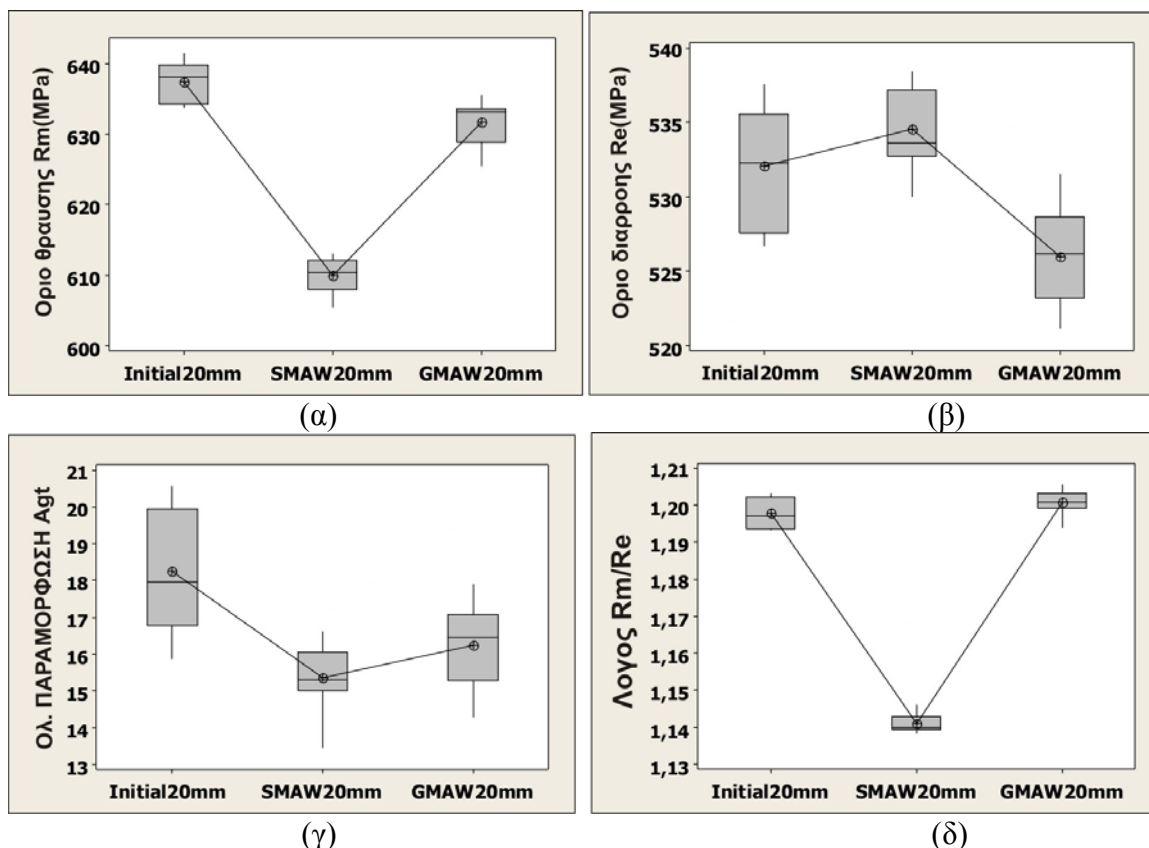


Σχήμα 5. Διαγράμματα σύγκρισης μηχανικών χαρακτηριστικών ασυγκόλλητων και συγκολλημένων (SMAW, GMAW) ράβδων σπλισμού σκυροδέματος διαμέτρου 14mm (α) ορίου θραύσης (εφελκυστική αντοχή) Rm, (β)ορίου διαρροής Re, (γ) ολικής ομοιόμορφης παραμόρφωσης Agt και (δ) λόγου Rm/Re

3.5 Ράβδοι διαμέτρου Φ14 mm

Στο Σχήμα 5 δίνονται τα διαγράμματα που προέκυψαν από τη στατιστική σύγκριση των μηχανικών χαρακτηριστικών για τις ράβδους διαμέτρου 14mm. Σε αυτή τη περίπτωση όσον αφορά το όριο διαρροής Re και το όριο θραύσης Rm ο στατιστικός έλεγχος για την ισότητα των μέσων τιμών απέρριψε την μηδενική υπόθεση $H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3$. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.α-β, οι μέσες τιμές και οι διακυμάνσεις των αρχικών και των συγκολλημένων με τη μέθοδο GMAW είναι πολύ κοντά, σε σχέση με τις τιμές των δοκιμίων που συγκολλήθηκαν με τη μέθοδο SMAW. Το φαινόμενο αυτό

παρατηρείται και όσον αφορά την ομοιόμορφη ολική παραμόρφωση Agt αλλά και το λόγο Rm/Re, Σχήμα 5.γ-δ μόνο που στις δύο τελευταίες περιπτώσεις οι τιμές των συγκολλημένων με την τεχνική SMAW είναι μικρότερες από τις τιμές των δοκιμίων των άλλων δυο κατηγοριών.



Σχήμα 6. Διαγράμματα σύγκρισης μηχανικών χαρακτηριστικών ασυγκόλλητων και συγκολλημένων (SMAW, GMAW) ράβδων οπλισμού σκυροδέματος διαμέτρου 20mm (α) ορίου θραύσης (εφελκυστική αντοχή) Rm, (β) ορίου διαρροής Re, (γ) ολικής ομοιόμορφης παραμόρφωσης Agt και (δ) λόγου Rm/Re

3.6 Ράβδοι διαμέτρου $\Phi 20$ mm

Η στατιστική σύγκριση των μηχανικών χαρακτηριστικών για τις ράβδους διαμέτρου 20mm παρουσιάζεται στο Σχήμα 6. Τόσο το όριο θραύσης (εφελκυστική αντοχή, Rm) στα αρχικά δοκίμια και στα συγκολλημένα με τη μέθοδο GMAW δίνουν παρόμοια αποτελέσματα ενώ στα δοκίμια που συγκολλήθηκαν με τη μέθοδο SMAW δίνουν μικρότερες τιμές από τα δυο προηγούμενα. Στις τιμές του ορίου διαρροής παρατηρείται το αντίθετο φαινόμενο όπου τα δοκίμια που συγκολλήθηκαν με τη μέθοδο SMAW δίνουν μεγαλύτερες τιμές από τις άλλες δύο κατηγορίες δοκιμίων και πλησιάζουν πιο πολύ στις τιμές των αρχικών δοκιμίων σε σχέση με τα συγκολλημένα με τη μέθοδο GMAW. Τα αποτελέσματα για την ολική ομοιόμορφη παραμόρφωση Agt δείχνουν συμπεριφορές παρόμοιες με αυτά των ράβδων διαμέτρου 8mm. Και εδώ ο έλεγχος υπόθεσης απέρριψε την μηδενική υπόθεση αφού το ποσοστό παραμόρφωσης των αρχικών δοκιμίων αρκετά μεγαλύτερο από αυτό των συγκολλημένων δοκιμίων (Σχήμα 6.γ). Όσον αφορά στο λόγο Rm/Re βλέπουμε παρόμοια συμπεριφορά για τα αρχικά δοκίμια και για τα συγκολλημένα με τη μέθοδο GMAW αλλά αρκετά χαμηλότερες τιμές για τα δοκίμια που συγκολλήθηκαν με τη μέθοδο SMAW.

4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η τάση διαρροής και θραύσης (εφελκυστική αντοχή) των συγκολλήσεων με επικάλυψη αν και παρουσιάζει ορισμένες διαφορές σε σχέση με τους ασυγκόλλητους χάλυβες οπλισμού, είναι σε όλες τις περιπτώσεις μεγαλύτερη της τιμής των 500 MPa και 550 MPa, αντίστοιχα, που είναι οι χαρακτηριστικές τιμές της κατηγορίας S500s (ΕΛΟΤ 971.1994).

Οι συγκολλήσεις, που εκτελούνται σύμφωνα με τον Κ.Τ.Χ.2000 παρουσιάζουν μικρές σχετικά διαφορές στην αντοχή τους σε σχέση με τις ασυγκόλλητες ράβδους (λιγότερο από 10%) και σημαντικότερες στην ολκιμότητα τους (λιγότερο από 23%).

Σε σχέση με την αρχική κατάσταση των χάλυβων, η ποσοστιαία μεταβολή του ορίου διαρροής (Re) κυμαίνεται μεταξύ 96 και 110% για τις εξεταζόμενες διαμέτρους. Όσον αφορά στο όριο θραύσης (εφελκυστική αντοχή), η ποσοστιαία μεταβολή κυμαίνεται μεταξύ 96 και 105% για τις εξεταζόμενες διαμέτρους.

Από τα πειραματικά αποτελέσματα αποδείχθηκε (γραφικά και με το κριτήριο Anderson-Darling) ότι σε όλες τις περιπτώσεις το όριο διαρροής (Re) και το όριο θραύσης (εφελκυστική αντοχή, Rm) ακολουθούν την κανονική κατανομή. Αντιθέτως, σε ορισμένες περιπτώσεις, οι τιμές της ομοιόμορφης παραμόρφωσης (Agt) ή του λόγου Rm/Re δεν ικανοποιούν τα κριτήρια κανονικότητας.

Στην περίπτωση των συγκολλημένων ράβδων διαμέτρου 8 mm οι διαφορές στο όριο διαρροής και θραύσης δεν είναι σημαντικές σύμφωνα με την ανάλυση ANOVA. Αντιθέτως, στην περίπτωση ράβδων διαμέτρου 14 και 20mm η διαφορές που παρατηρούνται μεταξύ είναι στατιστικώς σημαντικές.

Συγκόλληση με την τεχνική GMAW προσφέρει περισσότερο αξιόπιστες συγκολλήσεις μιας και παρατηρούνται μικρότερες διαφορές σε σχέση με τις ασυγκόλλητες ράβδους.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

ANSI/AWS D1.4-92. 1992. Structural Welding Code – Reinforcing Steel.

CEN 247 /BS 7123. 1989. Metal Arc Welding of Steel for Concrete Reinforcement.

DIN 488. 1984. Reinforcing steel - grades, properties, marking.

Montgomery D. C., 1997, Design and Analysis of Experiments, New York, 3rd edition, John Wiley and Sons

prEN ISO 17660. 2002, Welding of reinforcing steel.

W186 – M1990. 1998. Welding of Reinforcing Bars in Reinforced Concrete Structures.

ΕΛΟΤ 1421 (Σχέδιο Προτύπου 2005). Χάλυβες οπλισμού σκυροδέματος – Συγκολλησιμοι χάλυβες.

ΕΛΟΤ 971. 1994. Συγκολλησιμοι χάλυβες οπλισμού σκυροδέματος.

Καρόνη Χ., Καρυώτη Β., 2001, Πιθανότητες και Στατιστική με το MINITAB, Αθήνα, Ε.Μ.Π.

Νικολάου Ι., 2004. Λειτουργικές ιδιότητες χάλυβων οπλισμού σκυροδέματος και οι συγκολλήσεις τους. *Διδακτορική διατριβή. Ε.Μ.Π.*, Αθήνα.

Μηγιάκης Κ., 2003. Στατιστική ανάλυση αντοχής συγκολλήσεων χάλυβων οπλισμού σκυροδέματος. Ε.Μ.Π., Αθήνα.

Υ.Π.Ε.Χ.Ω.Δ.Ε. 2000. Κανονισμός Τεχνολογίας Χαλύβων Οπλισμού Σκυροδέματος (Κ.Τ.Χ.).