



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΠΑΤΡΩΝ**
UNIVERSITY OF PATRAS

Τμήμα Μηχανολόγων & Αεροναυπηγών Μηχανικών

Σπουδαστική Εργασία

**Προσομοίωση Σεισμικής Απόκρισης
Εγκιβωτισμένου Σιδηροοπλισμού σε Παράκτιο
Περιβάλλον**

Μπράττης Ιωάννης – 5735

Επιβλέπων Καθηγητής: Χαράλαμπος Αποστολόπουλος



Εργαστήριο Τεχνολογίας & Αντοχής Υλικών

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες	3
Περίληψη	4
Abstract	5
1. Κεφάλαιο 1 - Εισαγωγή	6
1.1. Τεχνολογικό Πρόβλημα	6
1.2. Σκοπός και Αντικείμενο της Εργασίας	6
2. Θεωρητικό Υπόβαθρο	7
2.1. Οπλισμένο Σκυρόδεμα	7
2.2. Χάλυβας Οπλισμού Σκυροδέματος	8
2.3. Μηχανικές Ιδιότητες του χάλυβα οπλισμού	8
2.4. Μοντέλα πρόβλεψης της διάρκειας ζωής σε κόπωση του χάλυβα	10
2.5. Πρόβλεψη υστερητικών βρόγχων χάλυβα υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση	12
2.6. Μηχανισμός διάβρωσης χάλυβα οπλισμού λόγω χλωριόντων	14
Βιβλιογραφία	15
3. Πειραματική Διαδικασία	18
3.1. Πρόγραμμα Πειραματικής Μελέτης	18
3.2. Παραγωγή Δοκιμών Ο/Σ	18
3.2.1. Χάλυβας Οπλισμού	18
3.2.2. Σκυρόδεμα (20/25)	20
3.2.3. Συντήρηση Δοκιμών	21
3.3. Επιταχυνόμενη Διάβρωση	27
3.3.1. Επιβολή Ηλεκτρικού Ρεύματος	27
3.4. Εκτίμηση της βλάβης διάβρωσης των χαλύβδινων ράβδων	31
3.5. Μηχανικές Δοκιμές Κόπωσης – Επιβολή δυναμικών φορτίων (σεισμική)	33
3.6. – Προσομοίωση της μηχανικής απόκρισης διαβρωμένου χάλυβα οπλισμού σε συνθήκες ολιγοκυκλικής κόπωσης	33
3.7. Μοντελοποίηση των βρόγχων υστέρησης διαβρωμένου χάλυβα οπλισμού υπό ολιγοκυκλική κόπωση	35
4. Πειραματικά Αποτελέσματα και Ανάλυση	38
5. Συμπεράσματα	49

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της παρούσας Σπουδαστικής Εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντά μου, Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Χάρη Αποστολόπουλο για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση που μου προσέφερε, στοιχεία τα οποία λειτούργησαν καταλυτικά για την ολοκλήρωση της εργασίας μου.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τα μέλη της Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής, Καθηγητή κ. Γιώργο Λαμπέα και Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Κωνσταντίνο Τσερπέ, για τις χρήσιμες υποδείξεις τους, κατά τη διάρκεια εκπόνησης της Εργασίας.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες θα ήθελα να αποδώσω προς τους συνεργάτες και κυρίως φίλους κ.κ. Κωνσταντίνο Κουλούρη, Μαρία Μπασδέκη, για τη συναδελφικότητα και τη αμέριστη και ανιδιοτελή βοήθεια που προσέφεραν καθ' όλη τη διάρκεια παραμονής μου στο Εργαστήριο Τεχνολογίας και Αντοχής Υλικών. Ακόμα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τα υπόλοιπα μέλη του εργαστηρίου για την υπομονή που έδειξαν και την βοήθεια που προσέφεραν κατά την διάρκεια της εκπόνησης των πειραμάτων μου στο χώρο του εργαστηρίου Τεχνολογίας και Αντοχής Υλικών.

Τελευταίες και σημαντικές ευχαριστίες θα ήθελα να δώσω στην οικογένεια μου, τους φίλους και την Ιωάννα μου, για την υπομονή αγάπη και την στήριξη που απλόχερα δείχνουν και δίνουν όλα αυτά τα χρόνια.

Μπράττης Ιωάννης
Πάτρα, 2022

Περίληψη

Είναι γνωστό, ότι οι παράκτιες κατασκευές από Οπλισμένο Σκυρόδεμα (Ο/Σ) αντιμετωπίζουν σοβαρά προβλήματα ανθεκτικότητας (durability), λόγω της επιθετικής δράσης χλωριόντων επί του σιδηροοπλισμού. Ειδικότερα, σε σειсмоγόνες περιοχές τα φαινόμενα υποβάθμισης εντείνονται εξαιτίας της συνδυασμένης δράσης σεισμικών καταπονήσεων (κοπωτικά φορτία) και του επιθετικού θαλάσσιου περιβάλλοντος. Ωστόσο, παρά το γεγονός ότι η διάβρωση αναγνωρίζεται ως κύρια αιτία μείωσης της επιτελεστικότητας των κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος, έως σήμερα δεν έχει πραγματοποιηθεί η αναγκαία τεκμηρίωση και ποσοτικοποίηση του διαβρωτικού παράγοντα στην αποτίμηση της δομικής επάρκειας στοιχείων παλαιότερων κατασκευών.

Στην προκείμενη εργασία παρατίθεται το έλλειμα τεκμηρίωσης της βλάβης διάβρωσης του σιδηροοπλισμού. Με βάση το δεδομένο πρόβλημα πραγματοποιήθηκε μελέτη των συνέπειων που προκύπτουν από την διάβρωση του σιδηροοπλισμού σκυροδέματος επιβάλλοντας στο εργαστήριο πρώτον διάβρωση με επιβολή ηλεκτρικού ρεύματος και κατά δεύτερον ολιγοκυκλική κόπωση ώστε να προσομοιώσουμε την συμπεριφορά του διαβρωμένου χάλυβα σε συνθήκες σεισμού (δυναμική φόρτιση).

Η μηχανική συμπεριφορά του χάλυβα οπλισμού υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση έχει καθοριστική σημασία στη μηχανική απόκριση στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος. Οι έντονες σεισμικές δράσεις καθώς και το ιστορικό φόρτισης των στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος είναι γνωστό ότι καταναλώνουν σημαντικά ενεργειακά αποθέματα του χάλυβα (ανάλογο ολιγοκυκλικής κόπωσης). Το υστερητικό μοντέλο τάσεων - παραμορφώσεων του σιδηροοπλισμού υποβαθμίζεται, συμβάλλοντας δε επιπρόσθετα στην υποβάθμιση της μηχανικής απόκρισης του σιδηροοπλισμού και ο βαθμός διάβρωσής του.

Έως σήμερα, δεν έχει μελετηθεί επαρκώς η υποβάθμιση της μηχανικής συμπεριφοράς του χάλυβα υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση συνυπολογίζοντας το διαβρωτικό παράγοντα. Υπό το πρίσμα αυτό και με βάση πειραματικά δεδομένα δοκιμών ολιγοκυκλικής κόπωσης σε προ-διαβρωμένες ράβδους χάλυβα οπλισμού, στην παρούσα διατριβή πραγματοποιήθηκε μοντελοποίηση της διάρκειας ζωής του χάλυβα σε ανακύκλιση (μοντελοποίηση των υστερητικών του βρόγχων σε ολιγοκυκλική κόπωση) συναρτήσει του βαθμού διάβρωσης. Τα αναλυτικά μοντέλα πρόβλεψης που προέκυψαν έρχονται σε συμφωνία με τα πειραματικά αποτελέσματα και μπορούν να αποτελέσουν αξιόπιστο εργαλείο ως έναρξη μίας γενικότερης συζήτησης στη σεισμική ανάλυση στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος, λαμβάνοντας υπόψη το βαθμό διάβρωσης του χάλυβα.

Για την εργαστηριακή μελέτη του διαβρωτικού φαινομένου υιοθετήθηκε η επιταχυνόμενη μέθοδος ηλεκτροδιάβρωσης, μέσω επιβολής πυκνότητας ρεύματος στο χάλυβα οπλισμού των δοκιμών.

Λέξεις Κλειδιά: [Διάβρωση, Χάλυβας B500c, Υστερητικό Μοντέλο, Επιταχυνόμενη διάβρωση, Ολιγοκυκλική Κόπωση, Μοντελοποίηση υστερητικών βρόγχων, διάρκεια ζωής χάλυβα]

Abstract

As it is widely known, most of the reinforced concrete structures located in coastal areas, suffer from the consequences of the corrosion factor. Chloride-induced corrosion, in synergy with other hazardous factors, such as seismic actions or air pollutant emissions, is harmful to the structures. The derived drop in durability, raises issues of security and reliability, concerning the structural integrity of the structures. Consequently, a great demand for handling such structures is created.

Although the durability of the reinforced concrete structures is a major issue, only recently has it captured the scientific community's interest and to date, the necessary documentation and quantification of the corrosive factor in the construction industry's valuation of elements of older constructions have not been carried out.

The extended study, analysis, and quantification of the corrosion consequences premise laboratory reproduction of the corrosion phenomenon, with the use of accelerated experimental techniques. In the present study, an analysis was conducted concerning the consequences of the corrosion phenomenon on steel reinforcement, with the use of accelerated experimental techniques such as applying electric current and secondly oligocyclic fatigue in order to simulate the behavior of corroded steel in earthquake conditions (dynamic loading).

The mechanical behavior of reinforcing steel under cyclic loading is of decisive importance in the mechanical response of reinforced concrete elements. Intense seismic actions as well as the loading history of reinforced concrete elements are known to consume significant energy reserves of the steel (similar to oligocyclic fatigue).

The hysteretic stress-strain model of the reinforced steel is degraded, additionally contributing to the degradation of the mechanical response of the reinforcement steel and its degree of corrosion. To date, the degradation of the mechanical behavior of steel under cyclic loading including the corrosive agent has not been sufficiently studied. In this light and based on experimental data of oligocyclic fatigue tests on pre-corroded reinforcing steel bars, in this study, a modeling of the lifetime of the steel in recycling (modelling of the hysteretic loops in oligocyclic fatigue) was carried out as a function of the degree of corrosion. The analytical prediction models obtained are in agreement with the experimental results and can be a reliable tool as the beginning of a more general discussion in the seismic analysis of reinforced concrete elements, taking into account the degree of steel corrosion.

For the laboratory study of the corrosive phenomenon, the accelerated electro corrosion method was adopted, by imposing a current density on the steel reinforcement of the samples along with mechanical stress & strain testing in the Material Testing System Machine.

Key Words: [Corrosion, Reinforcing Steel B500c, Hysteretic Material, Cyclic loading, Fatigue, Accelerated electro corrosion, durability]

1. Κεφάλαιο 1 - Εισαγωγή

1.1. Τεχνολογικό Πρόβλημα

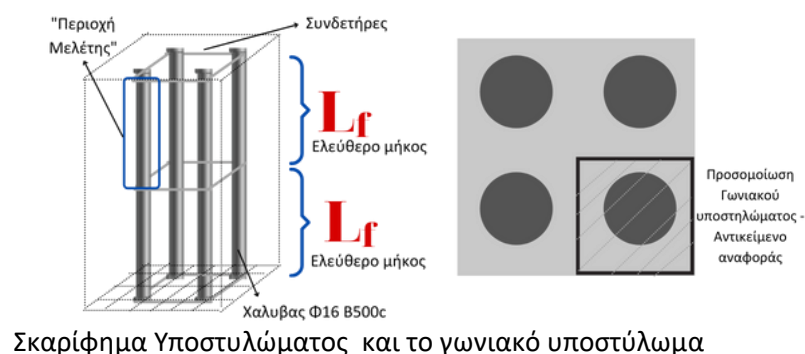
Από τις αρχές του προηγούμενου αιώνα, το οπλισμένο σκυρόδεμα (Ο/Σ) έχει επικρατήσει ως το δημοφιλέστερο υλικό κατασκευών και υποδομών παγκοσμίως, καθώς χαρακτηρίζεται από υψηλή μηχανική απόδοση, χαμηλό κόστος παραγωγής και ευκολία στη διάθεση των πρώτων υλών του. Ωστόσο, η παρουσία των κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος σε παράκτιες περιοχές επιφέρει **έντονα προβλήματα ανθεκτικότητας στο χρόνο (durability), λόγω της διάβρωσης του χαλύβδινου οπλισμού από την επιθετική δράση χλωριόντων, η οποία αναγνωρίζεται ως κύρια αιτία υποβάθμισης**. Πιο συγκεκριμένα, η διάβρωση του χάλυβα οπλισμού έχει **δυσμενείς επιπτώσεις στη φέρουσα ικανότητα των κατασκευών αλλοιώνοντας το υλικό του χάλυβα**. Επιπρόσθετα, σε περιοχές όπως η Ελλάδα που, εκτός των επιθετικών περιβαλλοντικών συνθηκών, **χαρακτηρίζονται από έντονη σεισμική δραστηριότητα, οι ισχυρές ανακυκλιζόμενες (δυναμικές) φορτίσεις και ανελαστικές παραμορφώσεις στα μέλη των κατασκευών επιφέρουν πρόσθετη βλάβη στο χαλύβδινο οπλισμό λόγω κόπωσης**. Έπειτα από μελέτες και έρευνες των τελευταίων χρόνων που εστιάζουν στα φαινόμενα της διάβρωσης του χάλυβα οπλισμού στις κατασκευές Ο/Σ έχει διαπιστωθεί, η διάβρωση λόγω χλωριόντων, επί των εγκιβωτισμένων σε σκυρόδεμα χαλύβδινων ράβδων η οποία παρουσιάζει **ανομοιόμορφη βλάβη κατά μήκος αυτών, προκαλώντας βελονισμούς, τοπική απώλεια της διατομής και πτώση των μηχανικών ιδιοτήτων, σε όρους δυνάμεων και, κυρίως, παραμορφώσεων**. Ειδικότερα, σε σειсмоγόνες περιοχές τα φαινόμενα υποβάθμισης εντείνονται εξαιτίας της συνδυασμένης δράσης κόπωσης και του επιθετικού περιβάλλοντος.

1.2. Σκοπός και Αντικείμενο της Εργασίας

Όπως προαναφέρθηκε, τα τελευταία χρόνια παρατηρούνται ολοένα και πιο συχνά φαινόμενα πρόωρης γήρανσης και υποβάθμισης της ανθεκτικότητας των κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος λόγω διάβρωσης του χαλύβδινου οπλισμού. Ειδικότερα σε παράκτιες περιοχές, η έκθεση των κατασκευών σε χλωριόντα οδηγεί σε εντονότερες συνθήκες διάβρωσης. Δεδομένου ότι οι επιπτώσεις της διάβρωσης γίνονται εμφανείς σε βάθος χρόνου λόγω του αργού ρυθμού εξέλιξης του φαινομένου στη φύση, δημιουργήθηκε η ανάγκη εργαστηριακής μελέτης με επιταχυνόμενες μεθόδους. Για αυτό τον λόγο λοιπόν, με απώτερο σκοπό να αυξηθεί η σημερινή γνώση σχετικά με τις επιπτώσεις της διάβρωσης στη δομική επάρκεια στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος, προκαλούμενης από τη δράση χλωριόντων, διενεργήθηκε πειραματική μελέτη σε γυμνά και εγκιβωτισμένα σε σκυρόδεμα δοκίμια χάλυβα οπλισμού, ακολουθώντας τις δύο δημοφιλέστερες μεθόδους επιταχυνόμενης διάβρωσης: α) σε θάλαμο αλατονέφωσης και β) μέσω επιβολής ηλεκτρικού ρεύματος. Η εργασία εστιάζει συγκεκριμένα στην επίδραση του διαβρωτικού περιβάλλοντος στη μηχανική συμπεριφορά του χάλυβα υπό ανακυκλιζόμενες φορτίσεις (σεισμικά φορτία) λαμβάνοντας υπόψη την επιρροή στο βαθμό υποβάθμισης κι άλλων παραμέτρων, όπως η πυκνότητα του εγκάρσιου οπλισμού (συνδετήρων).

Πιο αναλυτικά, μελετάται η μηχανική απόκριση προ-διαβρωμένων ράβδων χάλυβα σε συνθήκες ολιγοκυκλικής κόπωσης, καθώς τα ισχυρά σεισμικά φορτία, που επιβάλλουν ανακυκλιζόμενες φορτίσεις και μεγάλα εύρη παραμορφώσεων, εργαστηριακά προσομοιώνονται με συνθήκες ολιγοκυκλικής κόπωσης. Αν και οι σύγχρονοι αντισεισμικοί κανονισμοί προσεγγίζουν τα σεισμικά συμβάντα ως μεμονωμένα γεγονότα, το ιστορικό φόρτισης της κατασκευής δεν πρέπει να αγνοείται, καθώς έχει σημαντική επίδραση στην απομένουσα αντοχή και την ολκιμότητα του χάλυβα οπλισμού. Ως εκ τούτου, η παράβλεψη του παράγοντα της κόπωσης του χάλυβα, όταν δε αυτός συνδυάζεται με τη διάβρωσή του,

μπορεί λανθασμένα να υπερεκτιμήσει τη φέρουσα ικανότητα των κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος και να αποδειχθεί ζημιογόνα, καθώς σημαντικά ενεργειακά αποθέματα καταναλώνονται λόγω των σεισμικών δράσεων. Για αυτό το λόγο, μέρος της εργασίας αφιερώνεται στην πρόβλεψη της διάρκειας ζωής σε κόπωση διαβρωμένων ράβδων οπλισμού, και στην ανάπτυξη μοντέλων πρόβλεψης των βρόγχων υστέρησης του διαβρωμένου οπλισμού σε συνθήκες ολιγοκυκλικής κόπωσης.



Σκαρίφημα Υποστυλώματος και το γωνιακό υποστύλωμα

2. Θεωρητικό Υπόβαθρο

2.1. Οπλισμένο Σκυρόδεμα

Η ικανότητα ενός υλικού να φέρει με ασφάλεια τις εξωτερικά επιβαλλόμενες φορτίσεις και να είναι ανθεκτικό στο χρόνο (durability) συνιστά βασικό κριτήριο για την επιλογή του κατά τη διαστασιολόγηση φερόντων κατασκευών. Για το λόγο αυτό, το οπλισμένο σκυρόδεμα έχει κυριαρχήσει ως δομικό υλικό παγκοσμίως, καθώς παρέχει υψηλή μηχανική απόδοση, ανθεκτικότητα, ενώ παράλληλα δεν απαιτείται υψηλό κόστος για την παραγωγή του.

Αρχικά, το άοπλο σκυρόδεμα, που αποτελείται από διαφόρων μεγεθών αδρανή (σκύρα), τα οποία "δένονται" μεταξύ τους μέσω κατάλληλου συνδετικού κονιάματος, χρησιμοποιείται ως δομικό υλικό από την αρχαιότητα. Ιδιαίτερα, κατά τη ρωμαϊκή εποχή, βρήκε ευρεία εφαρμογή, όπου κατασκευάζονταν ιδιαίτερα ανθεκτικές κατασκευές με τη χρήση ποζολανικής κονιάς, μερικές από τις οποίες (π.χ. υδραγωγεία) σώζονται έως και σήμερα. Από πλευράς μηχανικών ιδιοτήτων, το σκυρόδεμα παρέχει υψηλή αντοχή έναντι θλίψης, η οποία ποικίλει ανάλογα με την ποιότητα και την αναλογία των συστατικών του. Ωστόσο, αδυνατεί να αναλάβει εφελκυστικές και διατμητικές καταπονήσεις, καθιστώντας τη μόρφωση φορέων από άοπλο σκυρόδεμα περιορισμένη. Εξαιτίας αυτού, γεννήθηκε η ανάγκη για ενίσχυση του σκυροδέματος με τη συνδυαστική χρήση ενός άλλου υλικού, στις κρίσιμες περιοχές ανάπτυξης εφελκυστικών και διατμητικών δυνάμεων. Προς αυτή την ενίσχυση, χαλύβδινοι ράβδοι εισάγονται στη "μήτρα" του σκυροδέματος παράγοντας το σύνθετο υλικό που είναι γνωστό ως οπλισμένο σκυρόδεμα.

Βασική προϋπόθεση για την ικανοποιητική λειτουργία και τη μηχανική απόδοση του οπλισμένου σκυροδέματος αποτελεί η συνεργασία των δύο υλικών του, μέσω του μηχανισμού συνάφειας μεταξύ τους. Είναι γνωστό σήμερα, ότι η αξιοπιστία του δεσμού συνάφειας μεταξύ χάλυβα και σκυροδέματος καθορίζεται από τη χημική πρόσφυση και την τριβή στη διεπιφάνεια των δύο υλικών και στην περίπτωση χρήσης νευροχαλύβων, κυρίως, από τη μηχανική αλληλοεμπλοκή μεταξύ των νευρώσεων (ribs) του χάλυβα και του περιβάλλοντος σκυροδέματος. Ο μηχανισμός της συνάφειας εκφράζει με όρους δύναμης (ή τάσης) συνάφειας και σχετικής μετακίνησης (ολίσθησης) τη συνεργασία των δύο υλικών

επηρεάζοντας τη συνολική εντατική απόκριση μελών οπλισμένου σκυροδέματος και την παραμορφωσιακή και στροφική επάρκειά τους.

2.2. Χάλυβας Οπλισμού Σκυροδέματος

Όπως είναι γνωστό, ο χάλυβας οπλισμού εισάγεται υπό μορφή ράβδων κυκλικής διατομής (διαφορετικών διαμέτρων) εντός του σκυροδέματος με βασικό ρόλο να παραλάβει τα εφελκυστικά, κυρίως, φορτία. Η ποσότητα του χαλύβδινου οπλισμού, οι 26 μηχανικές του ιδιότητες και η αντίστασή του σε περιβαλλοντικές δράσεις έχουν καθοριστική συμβολή στη συνολική δομική συμπεριφορά στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος.

Γι' αυτό το λόγο, τα τελευταία 50 έτη η τεχνολογία του χάλυβα εξελίσσεται διαρκώς με στόχο την βελτιστοποίησή του, ώστε να ικανοποιούνται οι απαιτήσεις που προκύπτουν από το σχεδιασμό και την ανάλυση κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος. Ιδιαίτερα δε, σε περιοχές με έντονη σεισμική δραστηριότητα, προκύπτουν αυξημένες απαιτήσεις, καθώς ο χαλύβδινος οπλισμός καλείται να απορροφήσει μεγάλο μέρος της σεισμικής ενέργειας, που εισάγεται στις κατασκευές, έχοντας καθοριστικό ρόλο στη δυναμική απόκρισή τους [2-5]. Οι παλαιότερα παραγόμενοι μονοφασικοί χάλυβες οπλισμού έχουν αντικατασταθεί από το 2006 με τους διφασικούς (Tempcore), οι οποίοι λόγω της μαρτενσιτικής δομής τους, σχηματισμένης στον εξωτερικό δακτύλιο της διατομής, παρουσιάζουν βελτιωμένη μηχανική συμπεριφορά. Η ολκιμότητα των χαλύβδινων ράβδων οπλισμού και η αντοχή τους σε διαρροή, αποτελούν απολύτως απαραίτητα κριτήρια για την συνολική πλάστιμη (όλκιμη) συμπεριφορά των κατασκευών.

Επιπλέον, σημαντική καινοτομία που σημειώθηκε με την πάροδο των ετών στην παραγωγή χαλύβων οπλισμού είναι η ανάπτυξη των νευρώσεων (ribs) στην επιφάνειά τους έναντι των παλαιότερων λείων χαλύβων. Η αλλαγή αυτή στη γεωμετρία των ράβδων οπλισμού (ύψος και απόσταση νευρώσεων, μορφολογία, κλπ.) ευεργέτησε το δεσμό συνάφειας μεταξύ χάλυβα και σκυροδέματος, μέσω της μηχανικής αλληλοεμπλοκής μεταξύ των νευρώσεων του χάλυβα και των προβολίσκων σκυροδέματος μεταξύ των αυλακώσεων των ράβδων, αυξάνοντας σημαντικά την μέγιστη δύναμη συνάφειας μεταξύ των υλικών και τη σχετική μεταξύ τους ολίσθηση. Στην Ελλάδα, ο Κανονισμός Τεχνολογίας Χαλύβων Οπλισμού Σκυροδέματος (ΚΤΧ) 2008 καθορίζει τις ελάχιστες απαιτήσεις που πρέπει να πληροί ο χάλυβας οπλισμού για τεχνικά έργα από σκυρόδεμα

2.3. Μηχανικές Ιδιότητες του χάλυβα οπλισμού

Όπως είναι γνωστό, η ανάπτυξη εφελκυστικών εντάσεων σε περιοχές του σκυροδέματος υπαγορεύει τη χρήση χαλύβδινου οπλισμού για την ασφαλή ανάληψη των εξωτερικών φορτίσεων. Η ικανότητα των κατασκευών να παραμορφώνονται πέραν του ελαστικού ορίου χωρίς την αντίστοιχη μείωση της φέρουσας ικανότητάς τους, οφείλεται στην ολκιμότητα του χάλυβα, γεγονός που αναδεικνύει τη σημαντικότητα της μηχανικής συμπεριφοράς των υλικών στη συνολική απόκριση των κατασκευών. Υπό αυτό το πρίσμα, και προκειμένου να παράγονται αξιόπιστοι χάλυβες, έχουν θεσπιστεί κανονιστικά κείμενα που καθορίζουν τις ελάχιστες απαιτήσεις που πρέπει να ικανοποιούν οι χάλυβες οπλισμού σκυροδέματος. Πιο συγκεκριμένα, ο Ευρωκώδικας 2 [2-9] ορίζει τρεις κατηγορίες ολκιμότητας των χαλύβων (Α,Β,С), ήτοι χαμηλής, μέσης και υψηλής ολκιμότητας, αντίστοιχα. Επιπρόσθετα όσον αφορά σε σεισμογόνες περιοχές όπως η Ελλάδα, ο Ευρωκώδικας 8 [2-10], που αφορά στον αντισεισμικό σχεδιασμό κατασκευών, όπως και ο ελληνικός Κανονισμός Τεχνολογίας Χαλύβων Οπλισμού Σκυροδέματος ΚΤΧ 2008 [2-8], επιβάλλουν την αποκλειστική χρήση χάλυβα κατηγορίας C, θέτοντας κατώτατα όρια για τις μηχανικές ιδιότητες του χάλυβα, όπως είναι το όριο της τάσης διαρροής (f_y), το όριο της αντοχής (f_t), έμμεσα από το λόγο ενδοτράχυνσης f_t/f_y , και το όριο της ικανότητας συνολικής παραμόρφωσης στο μέγιστο φορτίο (ϵ_u), όπως παρουσιάζονται στον ακόλουθο Πίνακα 2.1.

Πίνακας 2.1. Όρια μηχανικών ιδιοτήτων χαλύβων οπλισμού σκυροδέματος σε εφελκυσμό.

Κατηγορία ολκιμότητας	A	B	C
Όριο διαρροής, f_y (MPa)	400 έως 600		
Λόγος ενδοτράχυνσης f_t/f_y	≥ 1.05	≥ 1.05	$1.15 \leq f_t/f_y \leq 1.35$
Συνολική ανηγμένη παραμόρφωση στο μέγιστο φορτίο, ϵ_u (%)	≥ 2.5	≥ 5.0	≥ 7.5

Οι ανωτέρω μηχανικές ιδιότητες του χάλυβα οπλισμού εξαγόμενες από δοκιμή εφελκυσμού (μονοτονική ψευδοστατική φόρτιση) είναι βαρύνουσας σημασίας για το σχεδιασμό κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος, καθώς η ανάλυσή τους στην πλειονότητα στηρίζεται σε αναλύσεις που θεωρούν στατικά επιβαλλόμενες φορτίσεις.

Παρότι όμως, η μονοτονική μηχανική συμπεριφορά του χάλυβα οπλισμού σε εφελκυσμό είναι γνωστή και διαπιστευμένη από κάθε χώρα, αρκετά περιορισμένες πληροφορίες παρέχονται για το χαρακτηρισμό της συμπεριφοράς του υπό εναλλασσόμενες δυναμικές (σεισμικές) φορτίσεις. Οι συνθήκες φόρτισης που προκαλούνται λόγω έντονων σεισμικών δράσεων, προσομοιάζουν στην ολιγοκυκλική κόπωση, χαρακτηριστικό της οποίας είναι η επιβολή υψηλών τιμών τάσεων και παραμορφώσεων [2-11].

Η μηχανική συμπεριφορά του χάλυβα οπλισμού υπό ολιγοκυκλική φόρτιση, στην πραγματικότητα δεν έχει καθοριστεί έως σήμερα επαρκώς και για αυτό το λόγο δεν ορίζεται σαφώς στα διεθνή κανονιστικά κείμενα. Σχετικά με την ποσοτικοποίηση της σεισμικής επιρροής στις χαλύβδινες ράβδους οπλισμού, μόνο η Ισπανία [2-12] και η Πορτογαλία [2-13] αναφέρονται στα εθνικά τους πρότυπα στον τρόπο εκτέλεσης δοκιμών ολιγοκυκλικής κόπωσης. Ωστόσο, οι παράμετροι εκτέλεσης των εν λόγω δοκιμών, όπως το εύρος παραμόρφωσης, η συχνότητα, το ελεύθερο μήκος των δοκιμών και ο αριθμός των κύκλων φόρτισης δεν έχουν προκύψει βάσει σχετικών επιστημονικών μελετών.

Αρκετές έρευνες έχουν διεξαχθεί προς διερεύνηση της υποβάθμισης της μηχανικής συμπεριφοράς των ράβδων χάλυβα οπλισμού υπό συνθήκες ολιγοκυκλικής κόπωσης [2-14], [2-15], [2-16], [2-17], [2-18], [2-19], [2-20]. Έχει φανεί ότι το ιστορικό φόρτισης των ράβδων που υπόκεινται σε κοπωτικά φορτία επηρεάζει σημαντικά την απόδοσή τους, διαφοροποιώντας τη μηχανική τους απόκριση, σε όρους τάσεων - παραμορφώσεων (σ - ϵ), έναντι αυτής υπό μονοτονική φόρτιση. Σε κάθε κύκλο φόρτισης συσσωρεύεται πρόσθετη βλάβη και καταναλώνονται μεγάλα ποσά ενεργειακών αποθεμάτων του υλικού με απόρροια τη μείωση της διάρκειας ζωής του. Ωστόσο, έως σήμερα, οι σύγχρονοι κανονισμοί παραβλέπουν τη συσσωρευμένη βλάβη του χάλυβα (λόγω του ιστορικού φόρτισης) χωρίς να εισάγεται στους συντελεστές ολκιμότητάς του και κατ' επέκταση στους συντελεστές πλαστιμότητας των κατασκευών, θεωρώντας ως αποκλειστικό δείκτη της βλάβης την τιμή της μέγιστης αναπτυσσόμενης παραμόρφωσης. Ως εκ τούτου, η αντιμετώπιση κάθε σεισμικής διέγερσης, ως ένα μεμονωμένο συμβάν, παραβλέποντας το ιστορικό φόρτισης, απέχει από την πραγματικότητα. Επιπρόσθετα, ο ρυθμός επιβολής των κοπωτικών φορτίων και τα επιβαλλόμενα εύρη παραμόρφωσης έχουν μεγάλη επιρροή στην προκαλούμενη πτώση της αντοχής και ολκιμότητας. Τέλος, έρευνες διαφόρων μελετητών [2-21] [2-22] [2-23] [2-24], έδειξαν ότι σε περίπτωση επιβολής ισχυρών θλιπτικών φορτίων εμφανίζονται φαινόμενα ανελαστικού λυγισμού των ράβδων, τα οποία έχουν ισχυρή επίδραση στην περαιτέρω βλάβη λόγω κόπωσης του υλικού.

2.4. Μοντέλα πρόβλεψης της διάρκειας ζωής σε κόπωση του χάλυβα

Στην περίπτωση ανάπτυξης δυναμικών φαινομένων, η μηχανική συμπεριφορά των υλικών μίας κατασκευής είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με την αντοχή τους σε κόπωση. Ως κόπωση ορίζεται από τον αμερικάνικο οργανισμό ASTM (American Society for Testing and Material) η διαδικασία των προοδευτικών τοπικών μόνιμων δομικών μεταβολών, που συμβαίνουν στα υλικά, όταν υποβάλλονται σε συνθήκες μεταβαλλόμενων τάσεων και παραμορφώσεων σε ένα ή περισσότερα σημεία και που μπορούν να οδηγήσουν σε ρωγμές ή πλήρη θραύση, ύστερα από έναν επαρκή αριθμό μεταβολών του φορτίου [2-25].

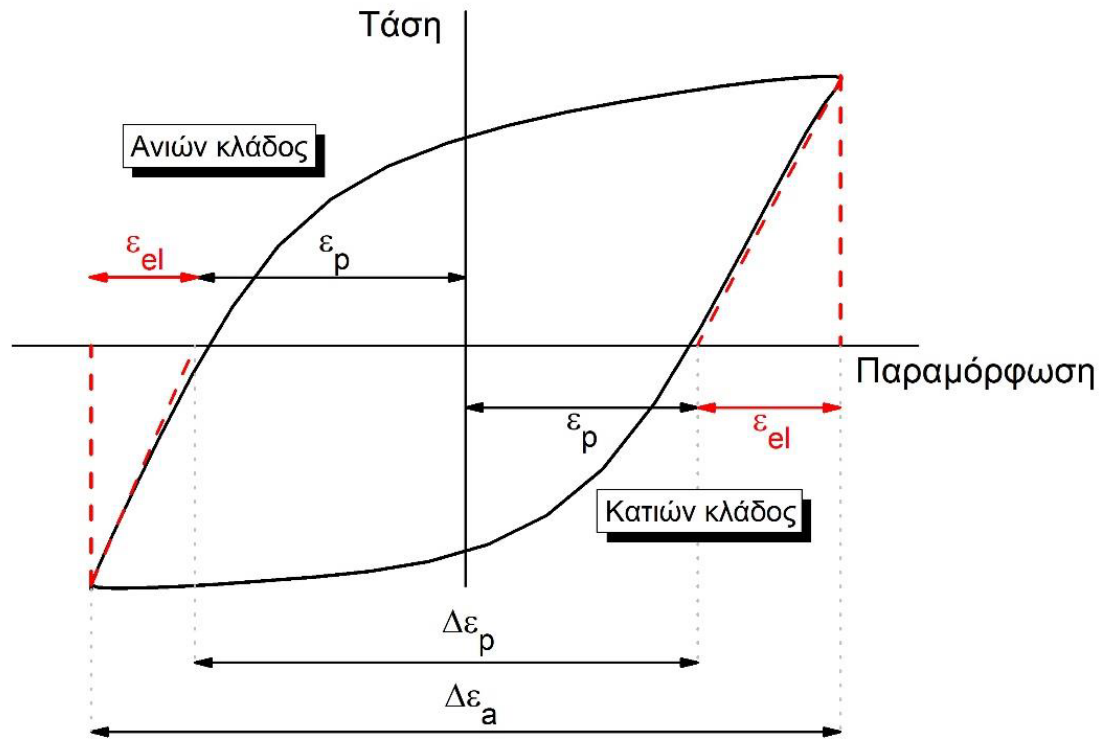
Όπως παρουσιάστηκε στην προηγούμενη ενότητα, το εύρος των επιβαλλόμενων τάσεων ή παραμορφώσεων, ο ρυθμός επιβολής τους και το ιστορικό φόρτισης έχουν ιδιαίτερη σημασία στην προοδευτική συσσώρευση βλάβης των υλικών και στην τελική διάρκεια ζωής τους. Πειραματικές μελέτες με αντικείμενο την πρόβλεψη της μηχανικής απόκρισης του χάλυβα οπλισμού υπό συνθήκες κόπωσης έχουν διεξαχθεί από πληθώρα ερευνητών εδώ και δεκαετίες [2-26], [2-27], [2-28], [2-29], [2-30], [2-31], [2-32], [2-33], με στόχο την εκτίμηση της συσσώρευσης της βλάβης και την πρόβλεψη της διάρκειας ζωής του. Αρχικά, προτάθηκε από τον Palmgren [2-27] η παραδοχή της γραμμικής συσσώρευσης βλάβης, η οποία αναπτύχθηκε και έγινε ευρέως γνωστή στη συνέχεια από τον Miner [2-28]. Η παραδοχή αυτή θεωρεί μία συγκεκριμένη τιμή της βλάβης του υλικού (D) για κάθε κύκλο ή αριθμό κύκλων φόρτισης (n) υπό δεδομένο εύρος εναλλασσόμενων τάσεων, η οποία ισούται με τον λόγο του αριθμού των κύκλων φόρτισης (n) προς τη συνολική διάρκεια ζωής σε κόπωση σε αυτό το εύρος N_f , όπως εκφράζεται από την Εξίσωση 2.1. Βασικό μειονέκτημα του γραμμικού κανόνα του Miner είναι ότι δε λαμβάνεται υπόψη η επιρροή του ιστορικού φόρτισης στη βλάβη οδηγώντας ενδεχομένως σε σημαντικές αποκλίσεις από τα πειραματικά αποτελέσματα [2-29]. Για την απαλοιφή αυτών των σφαλμάτων, μη γραμμικά μοντέλα έχουν αναπτυχθεί, όπως των Richart και Newmark [2-30] που αποτελεί τη βάση των σύγχρονων μοντέλων συσσώρευσης της βλάβης κόπωσης των υλικών.

$$D = \frac{n}{N_f} \quad (2.1)$$

Σε όλα τα ανωτέρω μοντέλα συσσώρευσης της βλάβης κόπωσης των υλικών, απαραίτητη προϋπόθεση αποτελεί η γνώση της συνολικής διάρκειας ζωής των υλικών υπό δεδομένο επιβαλλόμενο εύρος τάσεων ή παραμορφώσεων. Οι Manson [2-31] και Coffin [2-32] πρότειναν ένα εκθετικό μοντέλο, το οποίο συσχετίζει το πλάτος των πλαστικών παραμορφώσεων με τη διάρκεια ζωής του χάλυβα οπλισμού έναντι κόπωσης, το οποίο παρουσιάζεται από την ακόλουθη εξίσωση 2.2.

$$\varepsilon_p = \frac{\varepsilon_{p,\max} - \varepsilon_{p,\min}}{2} = \varepsilon'_f (2N_f)^c \quad (2.2)$$

όπου ε_p είναι το πλάτος της πλαστικής παραμόρφωσης, $\varepsilon_{p,\max}$ και $\varepsilon_{p,\min}$ είναι η μέγιστη και ελάχιστη πλαστική παραμόρφωση σε έναν κύκλο φόρτισης, ε'_f είναι μια εμπειρική σταθερά γνωστή ως συντελεστής ολκιμότητας λόγω κόπωσης, N_f είναι ο αριθμός των κύκλων φόρτισης έως την αστοχία και c είναι μια εκθετική εμπειρική σταθερά με σύνηθες εύρος τιμών από -0.5 έως -0.7. Στο



Σχήμα 2.4 (α) Ελαστικό και Πλαστικό μέρους του ολικού πλάτους παραμόρφωσης σε μεμονωμένο βρόγχο υστέρησης.

Το μοντέλο Coffin – Manson χαρακτηρίζεται ως το πιο ευρείας αποδοχής μοντέλο αναφορικά με την πρόβλεψη της διάρκειας ζωής των μεταλλικών υλικών, όπως ο χάλυβας οπλισμού, ενώ ακολούθησαν και πολλές παραλλαγές αυτού με την πάροδο των ετών. Πιο συγκεκριμένα, οι Koh και Stephens [2-33] ανέπτυξαν μια παραλλαγή της εξίσωσης Coffin – Manson, στην οποία συσχετίζουν το συνολικό πλάτος των παραμορφώσεων ϵ_a , ήτοι πλαστικό και ελαστικό, με τη διάρκεια ζωής $2N_f$, όπως φαίνεται στην παρακάτω εξίσωση 2.3.

$$\epsilon_a = \frac{\epsilon_{\max} - \epsilon_{\min}}{2} = \epsilon_f (2N_f)^\alpha \quad (2.3)$$

όπου $\epsilon_{a,\max}$ και $\epsilon_{a,\min}$ είναι η μέγιστη και ελάχιστη αξονική παραμόρφωση, ϵ_f είναι μια εμπειρική σταθερά γνωστή ως συντελεστής ολκιμότητας λόγω κόπωσης και α μια εκθετική εμπειρική σταθερά. Αξίζει να σημειωθεί, πως για μικρά εύρη παραμορφώσεων οι καμπύλες συνολικής παραμόρφωσης – διάρκειας ζωής προσεγγίζουν αυτές της ελαστικής παραμόρφωσης ενώ για μεγάλα εύρη παραμορφώσεων αυτές προσεγγίζουν της πλαστικής παραμόρφωσης, αντίστοιχα

2.5. Πρόβλεψη υστερητικών βρόγχων χάλυβα υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση

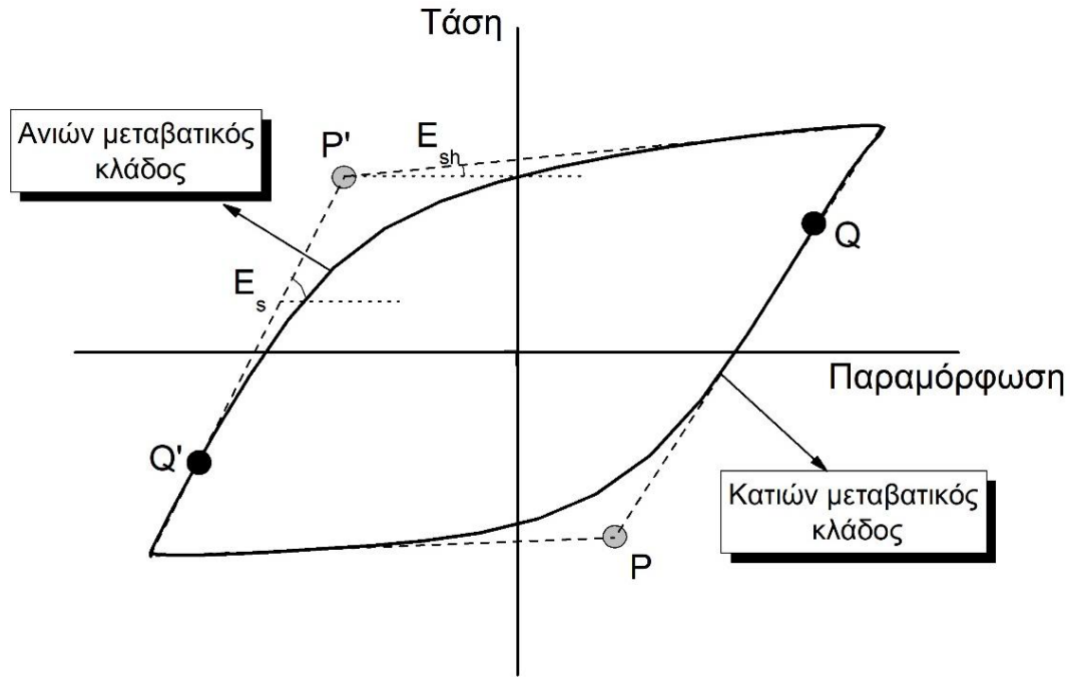
Η μελέτη της σεισμικής απόκρισης μελών οπλισμένου σκυροδέματος αποτελεί αντικείμενο βαρύνουσας σημασίας για τον καθορισμό της δομικής επάρκειάς τους και τελεί έως σήμερα υπό διερεύνηση. Λόγω των σεισμικών δράσεων, τα μέλη οπλισμένου σκυροδέματος και κατ' επέκταση τα υλικά τους (χάλυβας και σκυρόδεμα) υποβάλλονται σε ανακυκλιζόμενες φορτίσεις. Ως εκ τούτου, η γνώση της μηχανικής συμπεριφοράς του χάλυβα υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση συνιστά απαραίτητη προϋπόθεση για την ανάπτυξη και εξαγωγή αξιόπιστων μοντέλων πρόβλεψης της συνολικής απόκρισης μελών οπλισμένου σκυροδέματος.

Πολλές εργασίες της τρέχουσας βιβλιογραφίας προσέγγισαν προβλήματα που σχετίζονται με την αριθμητική μοντελοποίηση των ράβδων χάλυβα οπλισμού υπό κυκλικές δράσεις [2-34], [2-35], [2-36], [2-37], [2-38], [2-39], [2-40] παρέχοντας χρήσιμες πληροφορίες για τη μοντελοποίηση της μηχανικής συμπεριφοράς του χάλυβα οπλισμού υπό ολιγοκυκλική φόρτιση (σεισμικά φορτία).

Η επικρατούσα μέθοδος προς ανάλυση της μη – γραμμικής συμπεριφοράς του χάλυβα οπλισμού υπό σεισμικές φορτίσεις ακολουθεί το μοντέλο των Giuffre – Menegotto – Pinto, το οποίο αρχικά προτάθηκε από τους Giuffre και Pinto [2-39] και εφαρμόστηκε αργότερα από τους Menegotto και Pinto [2-38]. Στο προσομοίωμα αυτό, περιγράφεται η ανακυκλιζόμενη συμπεριφορά του χάλυβα οπλισμού μέσω των σχέσεων τάσεων – παραμορφώσεων, χωρίς να λαμβάνεται υπόψη το φαινόμενο Bauschinger. Η επιρροή αυτού συμπεριλήφθηκε, μετέπειτα, στην τροποποίηση του μοντέλου από τους Filippou et al. [2-40], η οποία υιοθετείται ευρέως σήμερα.

Το τροποποιημένο υστερητικό μοντέλο Menegotto - Pinto αναπαριστά ένα βρόγχο υστέρησης, ο οποίος συνίσταται από τους δύο μεταβατικούς κλάδους, φόρτισης και αποφόρτισης του χάλυβα, που ορίζονται εντός περιβαλλουσών καμπυλών, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.2. Οι περιβάλλουσες καμπύλες αντλούνται από τη μηχανική απόκριση του χάλυβα υπό μονοτονική φόρτιση (σε εφελκυσμό και θλίψη) και αποτελούν ανώτατα (και κατώτατα) όρια, στα οποία περικλείονται οι μεταβατικές καμπύλες, για τον καθορισμό των βρόγχων υστέρησης του χάλυβα υπό εναλλασσόμενη φόρτιση. Για τον ορισμό των περιβαλλουσών λαμβάνεται υπόψη το απλοποιημένο διγραμμικό μοντέλο τάσεων - παραμορφώσεων του χάλυβα, με τον αρχικό γραμμικά ελαστικό κλάδο, κλίσης E_s , και τον ανελαστικό κλάδο της κράτυνσης με κλίση E_{sh} .

Ο κατιών κλάδος του υστερητικού βρόγχου συνίσταται από ένα γραμμικό κλάδο αποφόρτισης, που ακολουθεί την κλίση E_s του αρχικού γραμμικά ελαστικού κλάδου της μονοτονικής φόρτισης έως το σημείο Q (ϵ_Q , f_Q), που σηματοδοτεί την αρχή του καμπύλου μεταβατικού κλάδου. Αντίστοιχα, ορίζεται και ο ανιών κλάδος της επαναφόρτισης του υλικού, με το σημείο Q' (ϵ'_Q , f'_Q) να είναι το τέλος του γραμμικού κλάδου, κλίσης E_s , και η έναρξη του καμπύλου μεταβατικού κλάδου.



Σχήμα 2.4 (β) Μοντέλο Menegotto - Pinto για την αναπαράσταση του βρόγχου υστέρησης τροποποιημένο κατά Filippou

Οι μεταβατικοί κλάδοι του υστερητικού μοντέλου αντιπροσωπεύουν τη σχέση τάσεων (f_s) και παραμορφώσεων (ε_s) του χάλυβα υπό εναλλασσόμενες φορτίσεις και περιγράφονται αναλυτικά από την ακόλουθη εξίσωση 2.4:

$$f_s = b\varepsilon_s + \frac{(1-b)\varepsilon_s}{(1+\varepsilon_s^R)^{1/R}} \quad (2.4)$$

όπου R είναι η ακτίνα της καμπύλης του μεταβατικού κλάδου στο σημείο P της θεωρητικής διαρροής ("γόνατο" - τομή των δύο περιβαλλουσών καμπυλών) και b είναι ο λόγος της δυσκαμψίας κράτυνσης E_{sh} προς την αρχική ελαστική δυσκαμψία E_s , ήτοι

$$b = \frac{E_{sh}}{E_s}$$

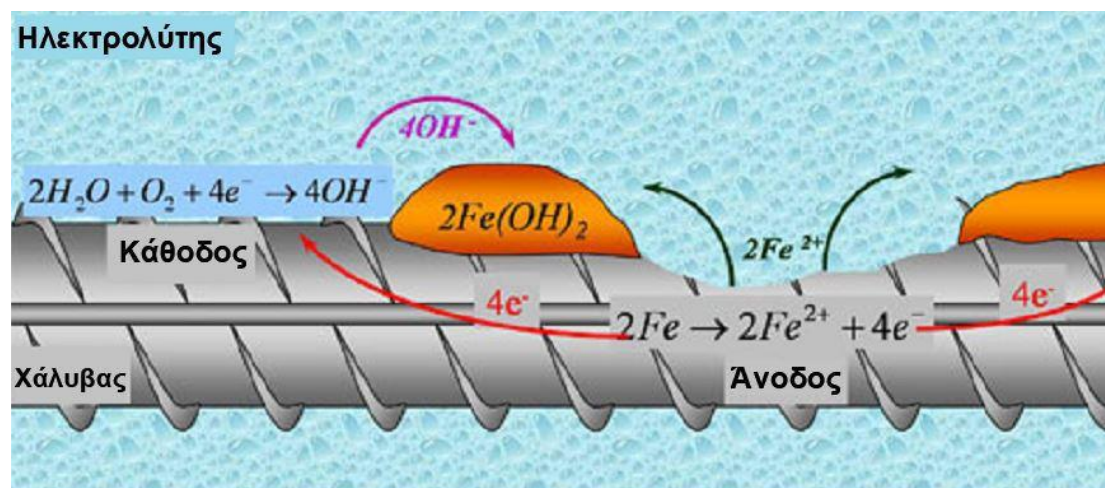
Επιπλέον, οι ακόλουθοι όροι της εξίσωσης 2.4 ορίζονται στο τροποποιημένο μοντέλο Filippou κ.α. [2-40] ως:

$$\varepsilon' = \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_Q}{\varepsilon_P - \varepsilon_Q} \quad \text{και} \quad f' = \frac{f_s - f_Q}{f_P - f_Q}$$

2.6. Μηχανισμός διάβρωσης χάλυβα σπλισμού λόγω χλωριόντων

Η διάβρωση του χάλυβα σπλισμού εξαιτίας της δράσης χλωριόντων είναι μία σύνθετη ηλεκτροχημική διεργασία, κατά την οποία λαμβάνει χώρα μεταφορά ηλεκτρονίων (φορτίου) από μία ανοδική περιοχή σε μία καθοδική περιοχή. Απαραίτητη προϋπόθεση για την ανάπτυξη του ηλεκτροχημικού φαινομένου και τη ροή του ηλεκτρικού ρεύματος είναι η παρουσία νερού και οξυγόνου, που δρουν ως ηλεκτρολύτης, δηλαδή ως μέσο μεταφοράς των ηλεκτρονίων από την ανοδική περιοχή, από όπου αποβάλλονται ηλεκτρόνια (απώλεια υλικού), σε μία καθοδική περιοχή, όπου προσλαμβάνονται τα ηλεκτρόνια.

Οι ηλεκτροχημικές αντιδράσεις, οι οποίες πραγματοποιούνται κατά τη διαδικασία της διάβρωσης παρουσιάζονται ακολούθως και απεικονίζονται στην Εικόνα 3.2.



Εικόνα 2.6.(α) : Μηχανισμός ηλεκτροχημικής διάβρωσης

Κατά την ανοδική διάλυση του σιδήρου (οξειδωση), τα άτομα του σιδήρου μετατρέπονται σε ιόντα, αποδίδοντας ηλεκτρόνια.

Η ανοδική αντίδραση αποβολής ηλεκτρονίων: $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^-$

Από τη στιγμή που απελευθερώνονται τα ηλεκτρόνια στην ανοδική αντίδραση, επιβάλλεται μια καθοδική αντίδραση ώστε να εξασφαλιστεί η ηλεκτρική ουδετερότητα της επιφάνειας του χάλυβα. Η καθοδική αντίδραση καταναλώνει νερό και οξυγόνο.

Η καθοδική αντίδραση : $2\text{e}^- + \text{H}_2\text{O} + \frac{1}{2} \text{O}_2 \rightarrow 2\text{OH}^-$

Οι παραπάνω χημικές εξισώσεις συνιστούν τις βασικές αντιδράσεις στα πρώτα στάδια της διάβρωσης, ενώ όσο η διάβρωση εξελίσσεται, ακολουθούν αντιδράσεις ενυδάτωσης, οι οποίες έχουν ως αποτέλεσμα το σχηματισμό ένυδρου οξειδίου του σιδήρου (στρώμα σκωρίας στην επιφάνεια του χάλυβα)

$\text{Fe}^{2+} + 2\text{OH}^- \rightarrow \text{Fe(OH)}_2$

όπου Fe(OH)_2 είναι το υδροξείδιο του σιδήρου (ferrous hydroxide),

$4\text{Fe(OH)}_2 + \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 4\text{Fe(OH)}_3$

$2\text{Fe(OH)}_3 \rightarrow \text{Fe}_2\text{O}_3\text{H}_2\text{O} + 2\text{H}_2\text{O}$

Βιβλιογραφία

- [2-1] Θ. Τριανταφύλλου, Δομικά Υλικά, 5η έκδοση, Πάτρα, 2002.
- [2-2] Α. Δρακακάκη, Μελέτη της επίδρασης της βλάβης διάβρωσης στη μηχανική συμπεριφορά του χάλυβα οπλισμού σκυροδέματος, Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών, Διδακτορική Διατριβή, 2018,
- Κ/Φ/Κουλούρης, Μελέτη των συνεπειών της διάβρωσης (παράκτιου περιβάλλοντος) στην σεισμική απόκριση του χάλυβα και στο δεσμό συνάφειας χάλυβα-σκυροδέματος, Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών, Διδακτορική Διατριβή, 2021
- [2-3] Π. Ι. Γιαννόπουλος, «Συνάφεια ράβδων οπλισμού στο σκυρόδεμα,» σε 15ο Συνέδριο Σκυροδέματος, ΤΕΕ, ΕΤΕΚ, Αλεξανδρούπολη, 2006.
- [2-4] Σ. Ταστάνη, Συνάφεια συμβατικών και νέων τύπων οπλισμού σκυροδέματος, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, Διδακτορική Διατριβή, 2006.
- [2-5] Μαυροειδής, Π., 2005. Χάλυβες Οπλισμένου Σκυροδέματος, εκδ. Παπασωτηρίου, Αθήνα.
- [2-6] Μ. Παπαδόπουλος, Μηχανική συμπεριφορά διαβρωμένων χαλύβων οπλισμού σκυροδέματος, Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών, Διδακτορική Διατριβή, 2007.
- [2-7] ACI 408R-03, Bond and Development of Straight Reinforcing Bars in Tension, ACI, Farmington Hills, MI, USA, 2012.
- [2-8] ΚΤΧ 2008, «ΝΕΟΣ ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΧΑΛΥΒΩΝ ΟΠΛΙΣΜΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ,» σε ΦΕΚ 1416/Β/17-07-2008 και ΦΕΚ 2113/Β/13-10-2008, Αθήνα.
- [2-9] EN-1992-1-1, Eurocode 2—Design of Concrete Structures. Part 1—1: General Rules and Rules for Buildings, Comité Européen de Normalisation (CEN), Brussels, Belgium (2008)
- [2-10] EN 1998-1:2005, Eurocode 8: Design of Structures for Earthquake Resistance - Part 1: General Rules, Seismic Actions and Rules for Buildings, CEN - European Committee for Standardization (2005)
- [2-11] Sheng, G.M. and Gong, S.H. (1997), "Investigation of low cycle fatigue behavior of building structural steels under earthquake loading", Acta Metallurgica Sinica (English Letters), Vol. 10 No. 1, pp. 51-55.
- [2-12] UNE (2000), "Norma Española experimental barras corrugadas de acero soldable con características especiales de ductilidad para armaduras de hormigón armado", UNE 36065 EX 2000, Madrid.
- [2-13] LNEC Varões de ac (2008), "A400 NR de ductilidade especial para armaduras de betão armado características, ensaios e marcação", AO, LNEC E455-2008.
- [2-14] Mander, J. B. and Panthaki, F. D. (1994) Low-cycle fatigue behavior of reinforcing steel. ASCE J. Mater. Civ. Eng. 6, 453–468.
- [2-15] Kunnath, S.K., Heo, Y.A. and Mohle, J.F. (2009), "Nonlinear uniaxial material model for reinforcing steel bars", Journal of Structural Engineering, Vol. 135 No. 4, pp. 335-343
- [2-16] Apostolopoulos, C. and Pasialis, V.P. (2009), "Effects of corrosion and ribs on low cycle fatigue behavior of reinforcing steel bars S400", Journal of Materials Engineering and Performance, Vol. 19 No. 3, pp. 385-394.
- [2-17] HAWILEH, R.A., ABDALLA, J.A., OUDAH, F. and ABDELRAHMAN, K. (2010), Low-cycle fatigue life behaviour of BS 460B and BS B500B steel reinforcing bars. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 33: 397-407. <https://doi.org/10.1111/j.1460-2695.2010.01452.x>
- [2-18] Bakkar, M.A., Saha, R. & Das, D. Low Cycle Fatigue Performance and Failure Analysis of Reinforcing Bar. Met. Mater. Int. (2020). <https://doi.org/10.1007/s12540-020-00839-x>.
- [2-19] Pengcheng Guo, Lihe Qian, Jiangying Meng, Fucheng Zhang, Laifeng Li, Low-cycle fatigue behavior of a high manganese austenitic twin-induced plasticity steel, Materials

Science and Engineering: A, Volume 584, 2013, Pages 133-142, ISSN 0921-5093, <https://doi.org/10.1016/j.msea.2013.07.020>.

[2-20] C.A. Apostolopoulos and D. Michalopoulos, "Effect of corrosion on mass loss, and high and low cycle fatigue of reinforcing steel", *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 15, no. 6, pp. 742–749, 2006.

[2-21] Kashani, M.M., Barmi, A.K. and Malinova, V.S. (2015), "Influence of inelastic buckling on low-cycle fatigue degradation of reinforcing bars", *Construction and Building Materials*, Vol. 94, pp. 644-655

[2-22] Apostolopoulos, C. and Pasialis, V.P. (2009), "Effects of corrosion and ribs on low cycle fatigue behavior of reinforcing steel bars S400", *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 19 No. 3, pp. 385-394.

[2-23] Christopher R. Urmson, John B. Mander, Local Buckling Analysis of Longitudinal Reinforcing Bars, *Journal Article*, 2012, *Journal of Structural Engineering*, 62-71, 138, 1, 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000414 [doi]

[2-24] Bae, S., Miesses, A.M. & Bayrak, O. 2005. Inelastic Buckling of Reinforcing Bars. *Journal of Structural Engineering* 131(2): 314–321.

[2-25] ASTM E606-04: Standard Practice for Strain-Controlled Fatigue Testing

[2-26] Tilly, G. P. (1979) Fatigue of steel reinforcement bars in concrete: a review. *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.* 2, 251–268.

[2-27] Palmgren, A. (1924) Durability of ball bearings. *ZVDI* 68, 339–341.

[2-28] Miner, M. A. (1945) Cumulative damage in fatigue. *J. Appl. Mech.* 12 Transaction of the ASME 67, A159–A164

[2-29] Σ. Παντελάκης, Κ. Τσερπές. «Μηχανική Συμπεριφορά Υλικών», Εκδόσεις Τζιόλα, 2016.

[2-30] Richart, F. E. and N. M. Newmark. "An Hypothesis for the Determination of Cumulative Damage in Fatigue." (1975).

[2-31] Manson, S. S. (1953) Behavior of materials under conditions of thermal stress. *Heat Transfer Symp.*, University of Michigan Engineering Research Institute, Ann Arbor, MI, pp. 9–75.

[2-32] Coffin, L. F., Jr. (1954) A study of the effects of cyclic thermal stresses on a ductile metal. *Trans. Am. Soc. Mech. Eng.*, New York, N.Y. 76, 931–950.

[2-33] Koh, S. K. and Stephens, R. I. (1991) Mean stress effects on low cycle fatigue for a high strength steel. *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.* 14, 413–428.

[2-34] Dodd, L. and J. I. Restrepo-Posada. "Model For Predicting Cyclic Behavior Of Reinforcing Steel." *Journal of Structural Engineering-ASCE* 121 (1995): 433-445.

[2-35] Leonardo M. Massone, Daniel Moroder, Buckling modeling of reinforcing bars with imperfections, *Engineering Structures*, Volume 31, Issue 3, 2009, Pages 758-767, ISSN 0141-0296. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2008.11.019>.

[2-36] Augusto Gomes, Júlio Appleton, Nonlinear cyclic stress-strain relationship of reinforcing bars including buckling, *Engineering Structures*, Volume 19, Issue 10, 1997, Pages 822-826, ISSN 0141-0296, [https://doi.org/10.1016/S0141-0296\(97\)00166-1](https://doi.org/10.1016/S0141-0296(97)00166-1).

[2-37] Monti, G. and C. Nuti. "Nonlinear Cyclic Behavior of Reinforcing Bars Including Buckling." *Journal of Structural Engineering-asce* 118 (1992): 3268-3284.

[2-38] Menegotto, M., and Pinto, P.E. (1973). Method of analysis of cyclically loaded RC plane frames including changes in geometry and non-elastic behavior of elements under normal force and bending. *Preliminary Report IABSE*, vol 13.

[2-39] Giuffrè A., Pinto P.E. (1970) Il comportamento del cemento armato per sollecitazioni cicliche di forte intensità, *Giornale del Genio Civile*

[2-40] Filippou F.C., Popov, E.P., and Bertero, V.V. (1983). "Effects of Bond Deterioration on Hysteretic Behavior of Reinforced Concrete Joints". Report EERC 83-19, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley.

[2-41] Μ. Φαρδής, Μαθήματα Οπλισμένου Σκυροδέματος Μέρος ΙΙΙ, Πάτρα, 2012.

- [2-42] fib: Bond and anchorage of embedded reinforcement: Background to the fib Model Code 2010. fib Bulletin fib, Lausanne, May 2014 170pp. ISBN 978-2-88394-112-0
- [2-43] Rehm G. (1961). Über die Grundlagen des Verbundes zwischen Stahl und Beton. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, No. 1381, pp. 59 (C & CALibrary Translation No. 134, 1968. (translated as Basic principle of the bond between steel and concrete, Cement and Concrete Association)
- [2-44] T. Ichinose, Y. Kanayama, Y. Inoue, J.E. Bolander, Size effect on bond strength of deformed bars, *Construction and Building Materials*, Volume 18, Issue 7, 2004, Pages 549-558, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2004.03.014>.
- [2-45] S. L. McCabe and S. J. Pantazopoulou, "Evaluation of Bond Performance in Reinforced Concrete Structures", ACI Special Publication Volume 180: Bond and Development of Reinforcement, dedicated to Prof. P. Gergely, (Ed.: ACI Committee 408 - Bond and Development of Reinforcement), 1998
- [2-46] Şener S., Bažant Z., and Becq-Giraudon E. (1999). Size effect on failure of bond splices of steel bars in concrete beams. *ASCE Journal of Structural Engineering*, Vol. 125, No. 6, pp. 653- 660.
- [2-47] Darwin D., Tholen M., Idun E., and Zuo J. (1996a). Splice strength of high relative rib area reinforcing bars. *ACI Structural Journal*, Vol. 93, No. 1, pp. 95-107.
- [2-48] Ferguson P.M. (1977). Small bar spacing or cover – A bond problem for the designer. *ACI Journal*, Vol. 74, No. 39, pp. 435-439.
- [2-49] Harajli, M. H., Hamad, B. S., and Rteil, A. A. (2004). "Effect of Confinement on Bond Strength between Steel Bars and Concrete." *ACI Structural Journal*, V. 101, No. 5, pp. 595 603.
- [2-50] U. Diederichs and U. Schneider Bond strength at high temperatures *Magazine of Concrete Research* 1981 33:115, 75-84
- [2-51] Al-Sulaimani GJ, Kaleemullah M, Basunbul IA, et al. Influence of Corrosion and Cracking on Bond Behavior and Strength of Reinforced Concrete Members, *ACI Struct J*. 1990; 87(2): 220–231p.
- [2-52] Cabrera JG, Ghoddoussi P. The Effect of Reinforcement Corrosion on the Strength of the Steel/Concrete Bond, *International Conference on Bond in Concrete*, 2001, 11–24p.
- [2-53] Almusallam AA. Effect of Degree of Corrosion on the Properties of Reinforcing Steel Bars. *Constr Build Mater*. 2001; 15(8): 361–368p.
- [2-54] Edwards, A.D. and Yannopoulos, P.J., 1978 Local bond stress-slip relationships under repeated loading. *Magazine of Concrete Research*, London, England, Vol.30, No.103, 62-72.
- [2-55] Ahmad Rteil, Khaled Soudki, Timothy Topper, Mechanics of bond under repeated loading, *Construction and Building Materials*, Volume 25, Issue 6, 2011, Pages 2822-2827, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.12.053>.
- [2-56] Tepfers R. (1979). Cracking of concrete cover along anchored deformed reinforcing bars. *Magazine of Concrete Research*, Vol. 31, No. 106, pp. 3 12.

3. Πειραματική Διαδικασία

Στην συγκεκριμένη πειραματική διαδικασία για τις ανάγκες προσομοίωσης τυπικών υποστυλωμάτων υφιστάμενων (παλαιών) κατασκευών με τοποθέτηση συνδετήρων ανά 240mm

θα χρησιμοποιήσουμε δοκίμια χάλυβα B500c πραγματοποιώντας τα εξής βήματα:

- Κοπή δοκιμίων χάλυβα ελεύθερου μήκους $L_f = 240\text{mm}$
- Εγκιβωτισμός αυτών σε σκυρόδεμα τύπου 20/25
- Επιβολή επιταχυνόμενης διάβρωσης μέσω επιβολής ηλεκτρικού ρεύματος – ηλεκτροχημική διάβρωση
- Εξαγωγή δοκιμίων χάλυβα από το σκυρόδεμα έπειτα από η επίπεδα διάβρωσης
- Επιβολή ανακυκλιζόμενων (δυναμικών) φορτίσεων στο εργαστήριο

3.1. Πρόγραμμα Πειραματικής Μελέτης

Η παρούσα πειραματική μελέτη διακρίνεται σε τρεις κύριες φάσεις: τη φάση παραγωγής - σκυροδέτησης - συντήρησης των δοκιμίων Ο/Σ, τη φάση διάβρωσης ενός μέρους του συνόλου αυτών των δοκιμίων, μέσω εργαστηριακής επιταχυνόμενης μεθόδου και τέλος, τη φάση εξέτασης της αντοχής του χαλύβδινου οπλισμού διενεργώντας μηχανικές δοκιμές κόπωσης στα διαβρωμένα και μη διαβρωμένα δοκίμια οπλισμένου σκυροδέματος.

Για τις ανάγκες της πειραματικής μελέτης παρασκευάστηκαν συνολικά 29 πρισματικά δοκίμια οπλισμένου σκυροδέματος, διατομής $100 \times 100 \text{ mm}^2$ και μήκους 240 mm. Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν ήταν σκυρόδεμα κατηγορίας C20/25 και χάλυβας οπλισμού B500c. Μία ευθύγραμμη ράβδος χάλυβα, ονομαστικής διαμέτρου 16 mm και μήκους 350 mm, εγκιβωτίστηκε κατάλληλα και έκκεντρα στη διατομή σε μήκος 240 mm.

3.2. Παραγωγή Δοκιμίων Ο/Σ

3.2.1. Χάλυβας Οπλισμού

Ο χάλυβας οπλισμού που χρησιμοποιήθηκε συνολικά στην πειραματική μελέτη μας, ήταν ο διφασικός τύπος χάλυβα Tempcore B500c, ο οποίος είναι ο ευρέως διαδεδομένος τύπος σε ολόκληρη την Ευρώπη την τελευταία εικοσαετία, ικανοποιώντας τις μηχανικές απαιτήσεις του UNI EN 1992-1-1:2005 παράλληλα με το χαμηλό του κόστος. Έχουν παραχθεί από την Χαλυβουργία Θεσσαλίας και φέρουν το χαρακτηριστικό λογότυπο ΕΧΘ. Παρότι οι υψηλές μηχανικές ιδιότητες καθιστούν ελκυστική τη χρήση του, ωστόσο η αντίσταση του σε διάβρωση παρουσιάζεται χαμηλότερη έναντι των παλαιότερων μονοφασικών χαλύβων, όπως S400 και S220. Με βάση το γεγονός αυτό, η παρούσα μελέτη καθίσταται σημαντική για την αποτίμηση της μηχανικής απόδοσης και της ανθεκτικότητας των στοιχείων Ο/Σ σε βάθος χρόνου.

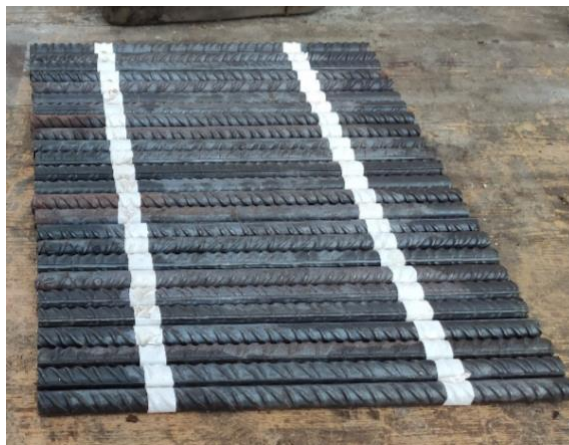
Η χημική σύσταση του Tempcore χάλυβα B500c παρουσιάζεται στον ακόλουθο Πίνακα.

C %	S %	P %	Cu %	N %	Ceq %
0.24	0.055	0.055	0.85	0.013	0.52

Χημική σύσταση του χάλυβα οπλισμού σκυροδέματος B500c

Για τους σκοπούς της πειραματικής μελέτης, χρησιμοποιήθηκαν ευθύγραμμες ράβδοι οπλισμού με νευρώσεις, ονομαστικής διαμέτρου 16 mm και συνολικού μήκους 350 mm. Παράλληλα, με στόχο τη μελέτη των συνεπειών της διάβρωσης του χάλυβα επί μήκους ίσου προς 240 mm (δηλαδή το μήκος ράβδου που εγκιβωτίστηκε στο σκυρόδεμα), η υπόλοιπη επιφάνεια εκατέρωθεν αυτού του ελεύθερου προς διάβρωση μήκους επικαλύφθηκε με κερί, ώστε να προστατευθεί.

Στις παρακάτω εικόνες απεικονίζονται ευθύγραμμες ράβδοι οπλισμού $\varnothing 16$, πριν και ύστερα από τη διαδικασία επικάλυψής τους με κερί.



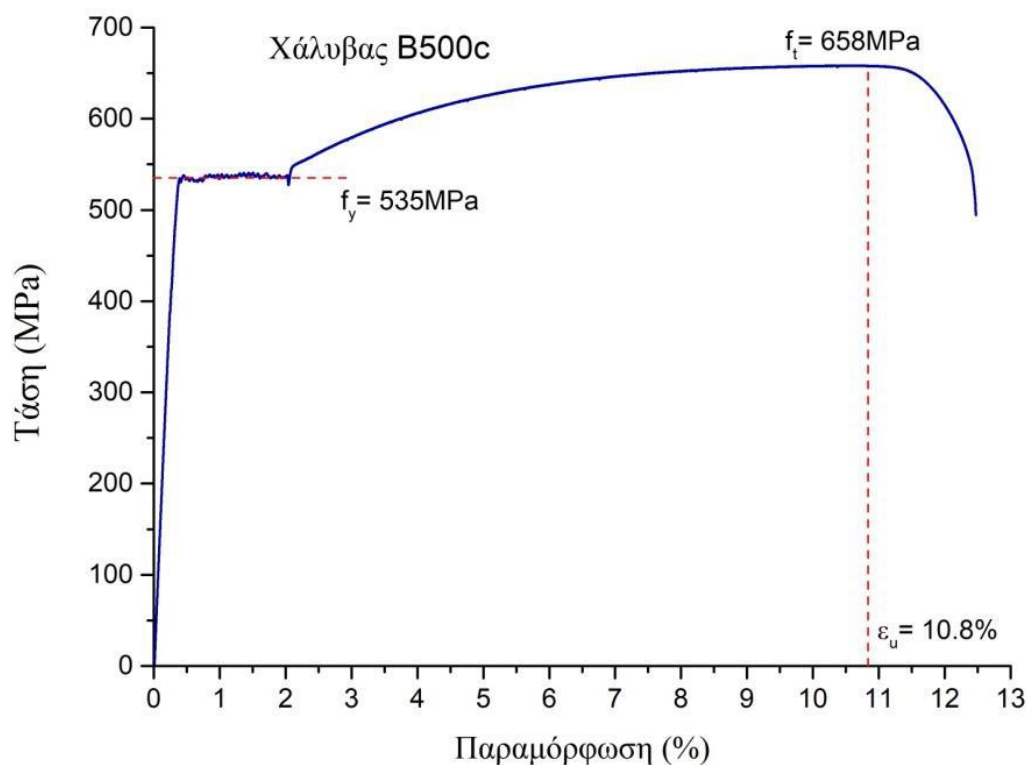
Εικόνα 3.2.1.(α)



Εικόνα 3.2.1.(β)

Εικόνες 3.2.1.(α) & 3.2.1.(β): Ράβδοι χάλυβα οπλισμού B500c, διαμέτρου 16 mm, πριν τον εγκιβωτισμό τους – Διαδικασία Κερώματος

Παράλληλα, εξετάστηκαν οι μηχανικές ιδιότητες του χάλυβα οπλισμού B500c, διενεργώντας προκαταρκτικά δοκιμές εφελκυσμού σε χαλύβδινες ράβδους σε σερβοϋδραυλική μηχανή MTS ικανότητας φορτίου 250 kN. Τα αποτελέσματα όλων των δοκιμών επαλήθευσαν την ποιότητα του υλικού, το οποίο πληρούσε όλες τις απαιτήσεις του Κ.Τ.Χ. 2008, καταγράφοντας αντοχή σε διαρροή (f_y) άνω των 500 MPa, λόγο κράτυνσης (f_t/f_y) εντός των επιτρεπόμενων ορίων (μεγαλύτερο από 1.15 και μικρότερο από 1.35) και, τέλος, συνολική ανηγμένη παραμόρφωση στο μέγιστο φορτίο (ϵ_u) μεγαλύτερη από 7.5%. Ένα τυπικό διάγραμμα τάσης - παραμόρφωσης χαλύβδινης ράβδου $\varnothing 16$ παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 3.2.1. (α) : Τυπικό διάγραμμα τάσης - παραμόρφωσης των χαλύβδινων ράβδων B500c, ονομαστικής διαμέτρου 16 mm.

3.2.2. Σκυρόδεμα (20/25)

Σημαντική παράμετρος της παρούσας μελέτης της επάρκειας δομικών στοιχείων παλαιών κατασκευών αποτελεί η κατηγορία σκυροδέματος. Για το λόγο αυτό επιλέχθηκε σκυρόδεμα κατηγορίας C20/25., διότι συνιστά αντιπροσωπευτική κατηγορία σκυροδέματος της πλειονότητας των παλαιότερων κατασκευών στις περιοχές της Μεσογείου (Ελλάδα, Ιταλία και Τουρκία). Ο σχεδιασμός των κατασκευών αυτών έχει πραγματοποιηθεί σε προγενέστερο χρόνο της δημοσίευσης των οδηγιών EN206 περί της χρήσης σκυροδέματος κατηγορίας C25/30 ή C30/37 καθώς και της επιλογής πάχους ελάχιστης επικάλυψης σκυροδέματος 45 mm σε παράκτιες περιοχές (κατηγορία έκθεσης διαβρωτικού περιβάλλοντος XS1).

Το σκυρόδεμα C20/25 της παρούσας μελέτης πληρούσε τις απαιτήσεις σε τσιμέντο τύπου Portland, λόγο νερού/τσιμέντο (N/T) ίσο με 0,55 και μέγιστο κόκκο αδρανών 20mm και η σύνθεσή του παρουσιάζεται στον ακόλουθο Πίνακα.

Αδρανή	Τσιμέντο	Νερό
Άμμος	Χαλίκι	Γαρμπίλι

Πίνακας 3.2.2 (α): Σύνθεση μίγματος σκυροδέματος σε kg/m³, κατηγορίας C20/25



Εικόνα 3.2.2.(α)



Εικόνα 3.2.2.(β)



Εικόνα 3.2.2.(γ)

Εικόνες 3.2.2. (α), (β) & (γ) από δοκίμια ελέγχου σκυροδέματος τύπου 20/25

3.2.3. Συντήρηση Δοκιμίων

Πριν τη διαδικασία της σκυροδέτησης των δοκιμίων Ο/Σ προηγήθηκε κατάλληλη προετοιμασία του χαλύβδινου ράβδου οπλισμού, η οποία περιλάμβανε την κοπή των χαλύβδινων ράβδων σε συνολικό μήκος 350 mm, τον προσεκτικό καθαρισμό αυτών μέσω μαλακής μηχανικής βούρτσας, την απαραίτητη κωδικοποίησή τους για λόγους ταυτοποίησής τους και τη μέτρηση της αρχικής τους μάζας, ώστε να καταστεί δυνατή η αποτίμηση της απώλειας μάζας μετά τη διάβρωση και το πέρας της πειραματικής διαδικασίας. Ακολουθώντας, όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη ενότητα, με σκοπό να διαβρωθεί ένα συγκεκριμένο τμήμα, μήκους $L_{emb} = 240 \text{ mm}$, που αντιστοιχεί στο μήκος των αγκύρωσης των ράβδων στο σκυρόδεμα, πραγματοποιήθηκε κατάλληλη προστασία του υπόλοιπου τμήματος των ράβδων με κεριά εκατέρωθεν του ελεύθερου προς διάβρωση τμήματος.

Το αρχικό στάδιο της προετοιμασίας του οπλισμού ακολούθησε η κατάλληλη τοποθέτηση και προσαρμογή του οπλισμού στις ξύλινες μήτρες, που κατασκευάστηκαν για τις ανάγκες της παρούσας πειραματικής μελέτης. Ο κύριος σιδηροοπλισμός τοποθετήθηκε έκκεντρα της διατομής στο κάτω μέρος των μεταλλικών μητρών, διερχόμενος από δύο οπές κατάλληλα σχεδιασμένες, επιτυγχάνοντας το επιθυμητό πάχος επικάλυψης σκυροδέματος.



Εικόνα 3.2.3.(α) : Ξύλινη μήτρα και έκκεντρη τοποθέτηση δοκιμίου χάλυβα B500c πριν την σκυροδέτησή του



Εικόνα 3.2.3.(β) : Τοποθέτηση σκυροδετημένων δοκιμίων σε «δονητή» για ομοιόμορφη κατανομή του σκυροδέματος εντός της μήτρας

Σύμφωνα με τον Κανονισμό Τεχνολογίας Σκυροδέματος (ΚΤΣ 2016) η διαδικασία σκυροδέτησης περιελάμβανε τα ακόλουθα στάδια:

- Επάλειψη των μητρών σκυροδέματος με λεπτό στρώμα ορυκτέλαιου.
- Διάστρωση του σκυροδέματος μέσα στη μήτρα σε στρώσεις ίσου ύψους και συμπύκνωση σε τράπεζα δονήσεως.
- Μετά την ολοκλήρωση της συμπυκνώσεως η επιφάνεια του σκυροδέματος οριζοντιώθηκε με τη βοήθεια μυστρίου και αφαιρέθηκε προσεκτικά το πλεονάζον σκυρόδεμα

Τα σκυροδετημένα δοκίμια παρέμειναν στις μήτρες προστατευόμενα από κρούσεις, δονήσεις και ξήρανση για 3 ημέρες σε δωμάτιο συνεχούς διαβροχής σε θερμοκρασία 22°C. Η συντήρηση ξεκίνησε αμέσως μετά τη διάστρωση ώστε να αποφευχθούν ρηγματώσεις, π.χ. από συστολή πριν από την πήξη, από συστολή ξήρανσης, καθώς και από θερμοκρασιακές μεταβολές. Εν συνεχεία, οι μήτρες αφαιρέθηκαν με προσοχή και τα δοκίμια διατηρήθηκαν σε θερμοκρασία 20±2°C και σε ατμόσφαιρα σχετικής υγρασίας 95% σε υγρό θάλαμο για μια περίοδο 28 ημερών.



Εικόνα 3.2.3.(γ) : Διαδικασία τοποθέτησης ορυκτελαίου στον χαλύβδινο οπλισμό πριν την σκυροδέτησή του.

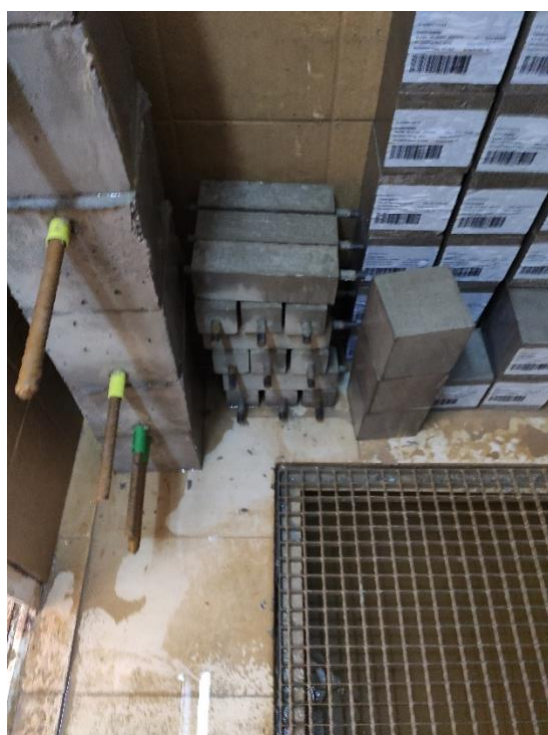


Εικόνα 3.2.3.(δ) : Διαδικασία τοποθέτησης σκυροδέματος στην ξύλινη μήτρα





Εικόνα 3.2.3.(ε) : Αφαίρεση δοκιμίων σπλισμένου σκυροδέματος από τις ξύλινες μήτρες



Εικόνα 3.2.3.(στ') : Τοποθέτηση και συντήρηση δοκιμών σε ειδικά σχεδιασμένο θάλαμο για 28 ημέρες

3.3. Επιταχυνόμενη Διάβρωση

3.3.1. Επιβολή Ηλεκτρικού Ρεύματος

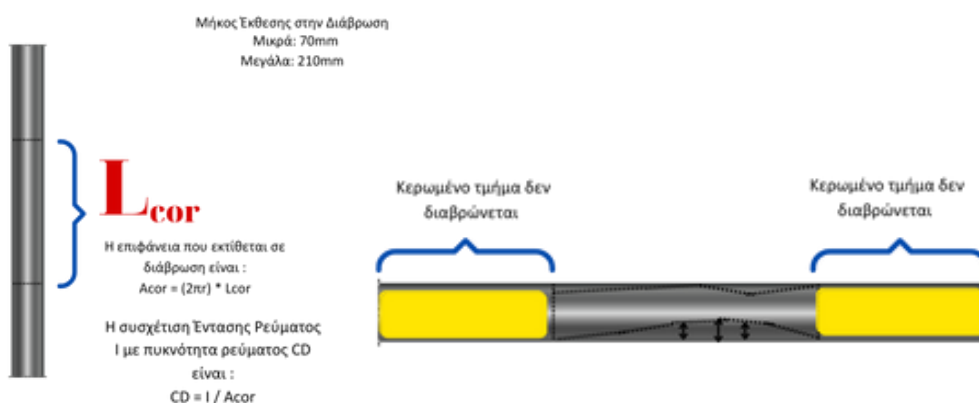
Δεδομένης της αργής εξέλιξης του διαβρωτικού φαινομένου στη φύση, με σκοπό τη διερεύνησή του και την εξαγωγή αποτελεσμάτων σε σύντομο χρονικό διάστημα, έχουν αναπτυχθεί εργαστηριακές επιταχυνόμενες μέθοδοι προσομοίωσης της διάβρωσης. Στην παρούσα μελέτη, με στόχο τη μελέτη της επίδρασης του διαφορετικού βαθμού διάβρωσης του σιδηροοπλισμού στη δύναμη συνάφειας, πραγματοποιήθηκαν πειράματα επιταχυνόμενης διάβρωσης στα δοκίμια οπλισμένου σκυροδέματος.

Η τεχνική της διάβρωσης μέσω επιβαλλόμενης πυκνότητας ρεύματος, συγκαταλέγεται στις πλέον γνωστές επιταχυνόμενες τεχνικές διάβρωσης. Στη συγκεκριμένη επιταχυνόμενη μέθοδο διάβρωσης, οι χαλύβδινες ράβδοι οπλισμού (προς διάβρωση) και ανοξείδωτες ράβδοι χάλυβα συνδέονται στο θετικό και τον αρνητικό πόλο, ενός τροφοδοτικού ρεύματος, και παράλληλα βυθίζονται σε διάλυμα χλωριούχου νατρίου (NaCl). Με αυτό τον τρόπο, μέσω παροχής ρεύματος από το τροφοδοτικό, αναπτύσσεται ένα κλειστό ηλεκτρικό κύκλωμα, στο οποίο οι χαλύβδινες ράβδοι 90 λειτουργούν ως άνοδος, οι ανοξείδωτες ράβδοι ως κάθοδος και το διάλυμα χλωριούχου νατρίου αποτελεί τον ηλεκτρολύτη, δηλαδή το μέσο σύνδεσης, που επιτρέπει τη ροή των ιόντων εντός του κυκλώματος. Μέσω του τροφοδοτικού επιβάλλεται σταθερή ποσότητα ρεύματος στις χαλύβδινες ράβδους (άνοδο του κυκλώματος), η οποία επιταχύνει το ρυθμό της ηλεκτροχημικής αντίδρασης της διάβρωσης. Βασικό πλεονέκτημα της συγκεκριμένης τεχνικής είναι η ικανότητα ελέγχου του ρυθμού διάβρωσης, μεταβάλλοντας κατάλληλα το μέγεθος του παρεχόμενου ρεύματος, επιτρέποντας έτσι την προσομοίωση διαφορετικών περιβαλλοντικών διαβρωτικών συνθηκών, όπου το δυναμικό ρεύματος, η συγκέντρωση του οξυγόνου και η θερμοκρασία ποικίλλουν.

Για την επιτάχυνση του διαβρωτικού φαινομένου, και την πρόκληση διαφορετικού βαθμού διάβρωσης στις χαλύβδινες ράβδους, ποσοστιαίας απώλειας μάζας 1%, 2%, 4%, 6% και 8%, τα δοκίμια Ο/Σ παρέμειναν βυθισμένα στα κελιά ηλεκτροδιάβρωσης για διαφορετικούς χρόνους έκθεσης, επιβάλλοντας σταθερό ρεύμα 0.105 A. Η επιλογή της συγκεκριμένης ποσότητας ρεύματος 0.105 A στη διαμήκη χαλύβδινη ράβδο, με εκτεθειμένο προς διάβρωση μήκος 240 mm, αντιστοιχεί σε πυκνότητα ρεύματος περίπου ίση με 1 mA/cm².

Πυκνότητα Ρεύματος [mA/cm ²]	Ένταση Ρεύματος [A]
1	0.1056

$$I = CD * Acor = 1 * \frac{mA}{cm^2} * \pi * 1,6 * 21cm^2 = 0,105A$$



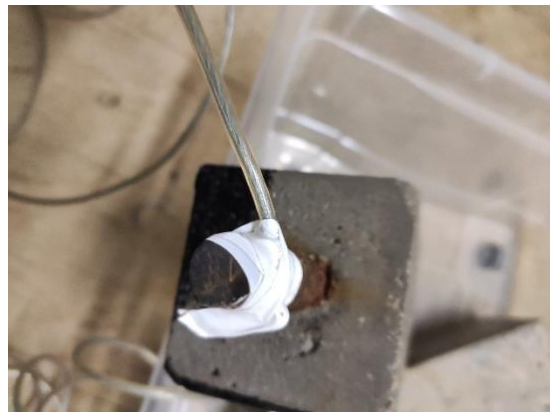
Σχετικά με τον καθορισμό του απαιτούμενου χρόνου έκθεσης των δοκιμών Ο/Σ στην ηλεκτροδιάβρωση, ώστε να προκληθεί ποσοστιαία απώλεια μάζας 1%, 2%, 4%, 6% και 8% στην κύρια χαλύβδινη ράβδο, διάφορες πειραματικές μελέτες έχουν αναδείξει την απόκλιση μεταξύ της θεωρητικής πρόβλεψης της απώλειας μάζας από τον ηλεκτροχημικό νόμο του Faraday και της πραγματικής απώλειας μάζας που προκύπτει από πειράματα επιταχυνόμενης ηλεκτροδιάβρωσης.

Να σημειωθεί εδώ ότι ενώ η μελέτη αφορά σε ελεύθερο μήκος δοκιμίου 240 mm για την συγκεκριμένη διαδικασία της διάβρωσης κερώσαμε μεγαλύτερο τμήμα του δοκιμίου αφήνοντας ελεύθερο μήκος προς ηλεκτροχημική διάβρωση 210mm. Ο λόγος είναι ότι θέλαμε να περιορίσουμε την το φαινόμενο της διάβρωσης μέσα στο επιθυμητό ελεύθερο μήκος και να αποφύγουμε τυχόν αστοχία του υλικού κοντά στις αρπάγες της μηχανής εφαρμογής ολιγοκυκλικής κόπωσης.

Τέλος, για τη διάβρωση των δοκιμών Ο/Σ χρησιμοποιήθηκε διάλυμα χλωριούχου νατρίου 5% β/β (βάρος διαλύτη κατά βάρος διαλύματος), διότι η συγκεκριμένη περιεκτικότητα αντιπροσωπεύει την περίπτωση των παράκτιων περιοχών στη λεκάνη της Μεσογείου, όπου το ζεστό κλίμα και η υψηλή αλατότητα του θαλασσινού νερού, επιφέρει έντονες διαβρωτικές δράσεις, σε αντίθεση με τις επικρατούσες συνθήκες σε χώρες της Βόρειας Ευρώπης.

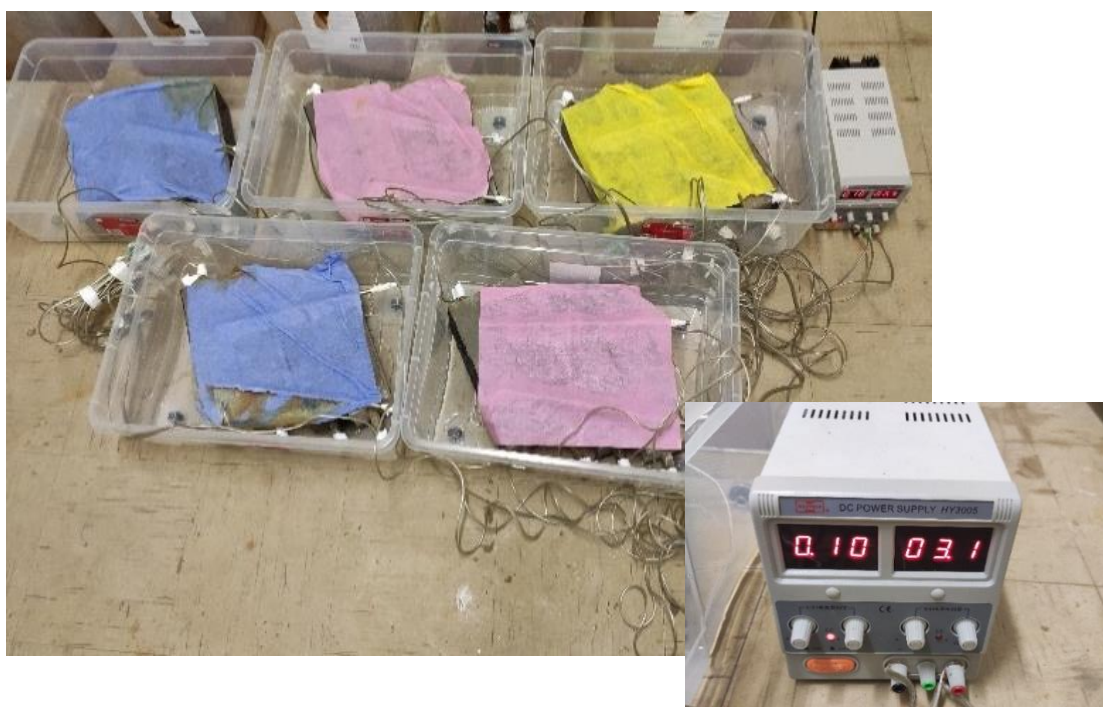


Εικόνα 3.3.2.(α) : Προετοιμασία Επιβολής Ηλεκτρικού Ρεύματος – Μόνωση Δοκιμών





Εικόνα 3.3.2.(β) : Προετοιμασία Επιβολής Ηλεκτρικού Ρεύματος - Συνδεσμολογία



Εικόνα 3.3.2.(γ) : Έναρξη διαδικασίας επιβολής Ηλεκτρικού Ρεύματος – Ηλεκτροχημική Διάβρωση

3.4. Εκτίμηση της βλάβης διάβρωσης των χαλύβδινων ράβδων

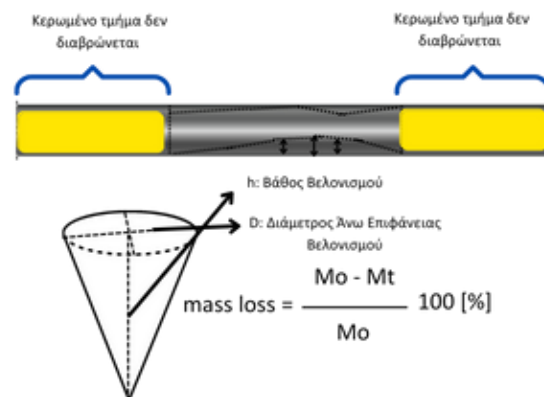
Ύστερα από την ολοκλήρωση των πειραμάτων επιταχυνόμενης διάβρωσης ακολούθησε αφαίρεση του χαλύβδινου οπλισμού εκ των δοκιμίων Ο/Σ ώστε να εκτιμηθεί η βλάβη διάβρωσης τους εκφρασμένη μέσω της απώλειας μάζας τους. Ο υπολογισμός της ποσοστιαίας απώλειας μάζας τους των ράβδων πραγματοποιήθηκε ύστερα από κατάλληλο καθαρισμό αυτών με τη χρήση μαλακής μηχανικής βούρτσας, σε πρώτο στάδιο, απομακρύνοντας όποια υπολείμματα σκυροδέματος και οξειδίων σιδήρου (προϊόντων της διάβρωσης) από την επιφάνειά τους.

Σε δεύτερο στάδιο με βάση τον Κ.Τ.Χ. 2008, όλα τα δοκίμια ζυγίστηκαν με ελάχιστη ακρίβεια 0.01 gr .

Με βάση την τελική μάζα, ύστερα από τη διάβρωση, και την αρχική μάζα, πριν τη διάβρωση, υπολογίστηκε η ποσοστιαία απώλεια μάζας εκάστης ράβδου χάλυβα ως ακολούθως:

$$n = \frac{M_{\text{αρχ.}} - M_{\text{τελ.}}}{M_{\text{αρχ.}}} * 100\%$$

η είναι η απώλεια μάζας της χαλύβδινης ράβδου λόγω διάβρωσης επί τοις εκατό και $M_{\text{αρχ}}$ και $M_{\text{τελ}}$ είναι οι τιμές της αρχικής και τελικής μάζας, αντίστοιχα.



Σχήμα 3.4.(α) : Ποσοστιαία Απώλεια Μάζας



Εικόνα 3.4.(α) : Αφαίρεση χαλύβδινου οπλισμού από το δοκίμιο Ο/Σ



Εικόνα 3.4.(β) : Καθαρισμός και ζύγισμα διαβρωμένου χαλύβδινου οπλισμού

Αριθμ. Δοκιμίου	Μήκος (cm)	Εκτεθειμένο Μήκος (cm)	Κερωμένο Μήκος (cm)	Λ1 (gr/cm)	Μάζα Αδιάβρωτου (κερωμένου) μήκους (gr)	Τελική (συνολική) Μάζα (gr)	Τελική (διαβρωμένη) Μάζα (gr)	Λ2 (gr/cm)	Ποσοστιαία Απώλεια Μάζας (%)
Steel 06	34,3	24	10,3	15,91	163,873	525,59	361,717	15,07154167	5,27
Steel 09	34	24	10	15,91	159,1	528,2	369,1	15,37916667	3,336476011
Steel 11	33,8	24	9,8	15,91	155,918	530,32	374,402	15,60008333	1,95
Steel 13	34	24	10	15,91	159,1	522,15	363,05	15,12708333	4,92
Steel 21	33,5	24	9,5	15,91	151,145	517,02	365,875	15,24479167	4,18
Steel 22	33,3	24	9,3	15,91	147,963	515,31	367,347	15,306125	3,795568825
Steel 24	33,3	24	9,3	15,91	147,963	516,3	368,337	15,347375	3,54
Steel 25	34,4	24	10,4	15,91	165,464	534,35	368,886	15,37025	3,39
Steel 34	33,9	24	9,9	15,91	157,509	518,02	360,511	15,02129167	5,59
Steel 36	33,5	24	9,5	15,91	151,145	523,6	372,455	15,51895833	2,46
Steel 37	33,4	24	9,4	15,91	149,554	516,4	366,846	15,28525	3,93

Πίνακας 3.4.(α) : Αποτελέσματα Ποσοστιαίας Απώλειας Μάζας

3.6. – Προσομοίωση της μηχανικής απόκρισης διαβρωμένου χάλυβα οπλισμού σε συνθήκες ολιγοκυκλικής κόπωσης

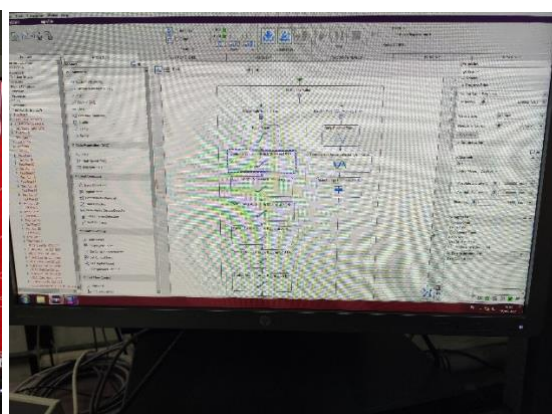
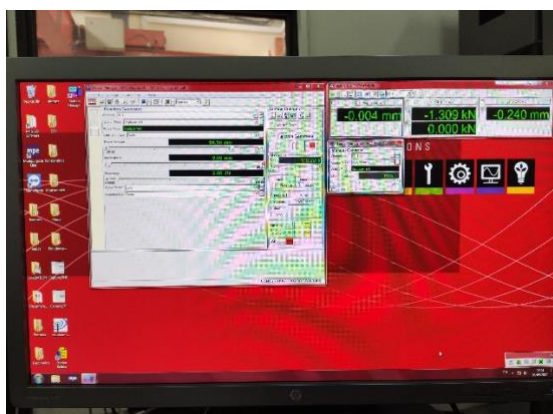
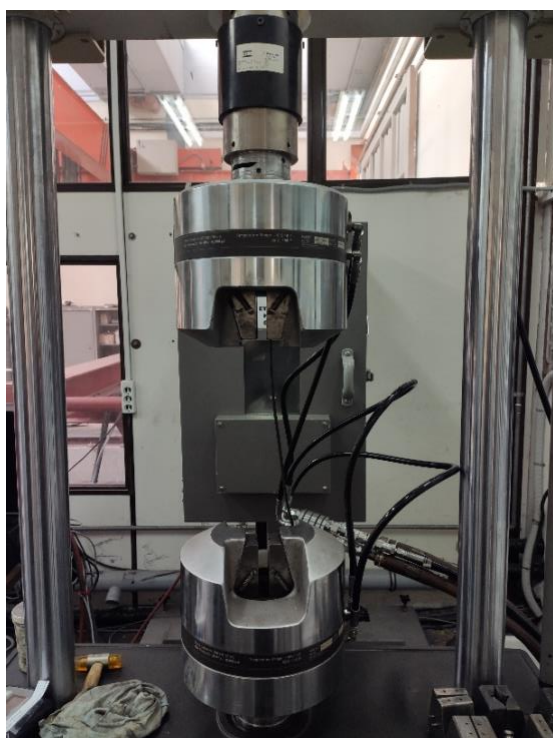
Όπως είναι γνωστό, η φιλοσοφία των σύγχρονων αντισεισμικών κανονισμών εκφράζεται μέσω του ικανοτικού σχεδιασμού με κατάλληλη διαστασιολόγηση στις περιοχές σχηματισμού πλαστικών αρθρώσεων, όπου και αναμένεται να εμφανιστούν ανελαστικές παραμορφώσεις. Λόγω της σεισμικής διέγερσης του εδάφους, τα μέλη των κατασκευών υποβάλλονται σε ανακυκλίσσεις μεγάλου εύρους παραμόρφωσης, καταπονώντας το χάλυβα οπλισμού σε συνθήκες ολιγοκυκλικής κόπωσης με αποτέλεσμα την υποβάθμιση της φέρουσας ικανότητάς του. Όπως έχει αναδειχθεί σε παλαιότερες εργασίες, σε στοιχεία Ο/Σ υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση, η πραγματική παραμόρφωση της ράβδου ακολουθεί το υστερητικό μοντέλο τάσεων – παραμορφώσεων του χάλυβα, το οποίο εξαιτίας του επιβαλλόμενου ιστορικού φόρτισης παρουσιάζει συσσώρευση βλάβης λόγω κόπωσης περιορίζοντας τη διάρκεια ζωής του υλικού.

Επιπρόσθετη βλάβη και υποβάθμιση της μηχανικής συμπεριφοράς του χάλυβα οπλισμού επιφέρει η διάβρωσή του, η οποία προκαλεί σημαντικά προβλήματα ανθεκτικότητας στις κατασκευές Ο/Σ. Συγκεκριμένα, η διάβρωση των χαλύβδινων ράβδων οδηγεί σε απώλεια της αρχικής διατομής τους προκαλώντας πτώση στις μηχανικές ιδιότητες (σε όρους αντοχής και, κυρίως παραμορφωσιμότητας). Παράλληλα, η εμφάνιση σημειακής βλάβης διάβρωσης με έντονους βελονισμούς προκαλεί υψηλές συγκεντρώσεις τάσεων, λόγω της τοπικής μείωσης της διατομής, οι οποίες μπορεί να αποφανθούν κρίσιμες για την περαιτέρω συσσώρευση βλάβης (δημιουργίας ρωγμής) σε περίπτωση κοπωτικών σεισμικών φορτίων.

Δεδομένου ότι η μηχανική απόκριση του χάλυβα οπλισμού επηρεάζει τη συνολική απόδοση των στοιχείων Ο/Σ και τον τελικό μηχανισμό αστοχίας τους, πλήθος πειραματικών εργασιών έχει διεξαχθεί με αντικείμενο τη μελέτη της μηχανικής συμπεριφοράς των χαλύβδινων ράβδων υπό κοπωτικά φορτία. Διάφοροι ερευνητές, όπως οι Mander κ.α. and Kunnath κ.α. διερεύνησαν την υποβάθμιση της φέρουσας ικανότητας των χαλύβδινων ράβδων ενίσχυσης σε συνθήκες ολικοκυκλικής κόπωσης. Κύριο εύρημα όλων των αντίστοιχων πειραματικών μελετών είναι ότι οι ράβδοι που υποβάλλονται σε κυκλικές φορτίσεις κόπωσης παρουσιάζουν διαφορετική μηχανική συμπεριφορά, σε όρους τάσεων - παραμορφώσεων, σε σχέση με τη μονοτονική ψευδοστατική φόρτιση του εφελκυσμού. Ως εκ τούτου, γίνεται κατανοητό ότι το ιστορικό φόρτισης έχει ισχυρή επίδραση στη συσσώρευση βλάβης του υλικού με συνέπεια την πρόωρη απώλεια της φέρουσας ικανότητας και της ολκιμότητάς του. Επίσης, πολύ σημαντική επιρροή στη μηχανική απόκριση μελών Ο/Σ υπό ανακυκλιζόμενη ένταση έχει η εμφάνιση λυγισμικών φαινομένων των ράβδων και όχι η εξάντληση της παραμόρφωσής τους σε εφελκυσμό, ϵ_{su} , όπως έχει αναδειχθεί σε μελέτες των Apostolopoulos and Pasialis και Kashani κ.α. , καθώς η προκαλούμενη βλάβη λόγω ανελαστικού λυγισμού αποβαίνει κρίσιμη για την φέρουσα ικανότητα. Οι κύριες παράμετροι, που επηρεάζουν τα λυγισμικά φαινόμενα, είναι το ιστορικό φόρτισης και ο λόγος **λυγηρότητας L/d των χαλύβδινων ράβδων.**

Ως εκ τούτου, για το σχεδιασμό και τη σεισμική ανάλυση ενός στοιχείου οπλισμένου σκυροδέματος η πρόβλεψη της μηχανικής συμπεριφοράς των χαλύβδινων ράβδων υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση μέσω ενός κατάλληλου υστερητικού μοντέλου τάσεων - παραμορφώσεων κρίνεται αναγκαία.

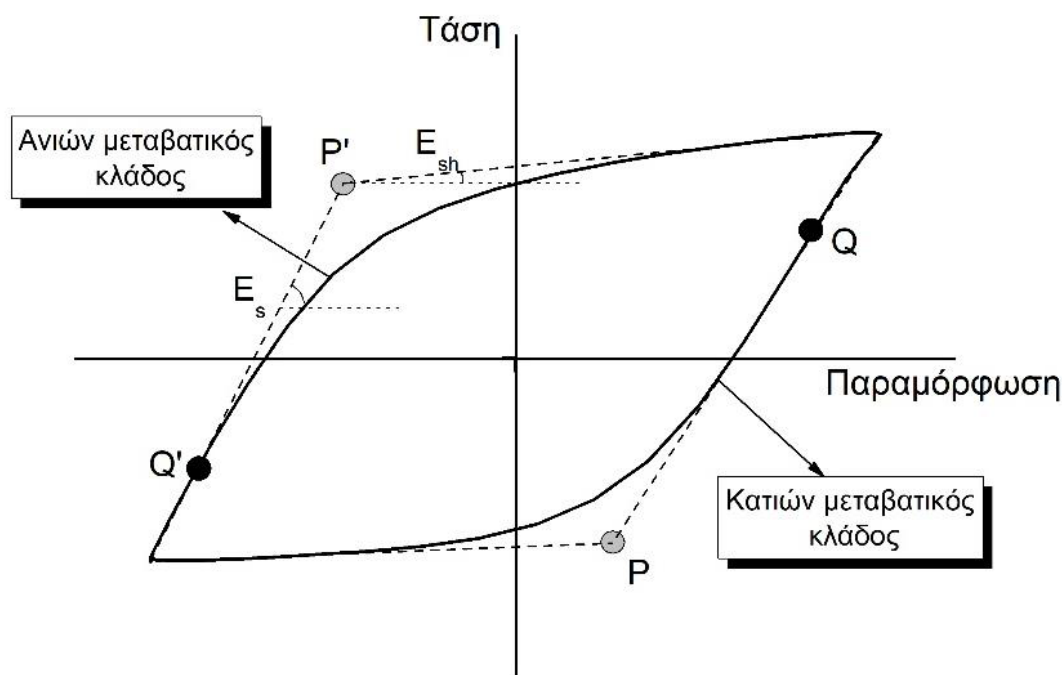
Έως και σήμερα, δεν υπάρχει επαρκής βιβλιογραφία σχετικά με την αλληλεπίδραση του διαβρωτικού παράγοντα και της ολικοκυκλικής κόπωσης στην υποβάθμιση της μηχανικής απόδοσης των χαλύβδινων ράβδων οπλισμού. Επομένως, με στόχο να καλυφθεί το κενό της υπάρχουσας βιβλιογραφίας, η παρούσα μελέτη είναι μία προσπάθεια πρόβλεψης της υποβαθμισμένης μηχανικής συμπεριφοράς των διαβρωμένων χαλύβδινων ράβδων που υπόκεινται σε σεισμικά φορτία, προσομοιώνοντάς τα με συνθήκες ολικοκυκλικής κόπωσης. Η πρόβλεψη του προσδόκιμου ζωής του σιδηροοπλισμού υφισταμένων κατασκευών (υπό διαβρωτικές συνθήκες) μπορεί να αποτελέσει σημαντική πληροφορία περί της αναμενόμενης σεισμικής τους απόκρισης. Για το σκοπό αυτό, με βάση τη συλλογή πειραματικών δεδομένων από παλαιότερες εργασίες των Apostolopoulos και Pasialis Apostolopoulos και Papadopoulos σε ράβδους χάλυβα, κατηγορίας S400 (BSt III) με νευρώσεις και λείους, διεξάχθηκε αναλυτική μελέτη πρόβλεψης της ανελαστικής συμπεριφοράς τάσεων - παραμορφώσεων των διαβρωμένων ράβδων υπό ολικοκυκλική κόπωση.



Εικόνες 3.5.(α): Προετοιμασία MTS για την διαδικασία προσομοίωσης δυναμικής φόρτισης του διαβρωμένου χαλύβδινου σπλισμού

3.7. Μοντελοποίηση των βρόγχων υστέρησης διαβρωμένου χάλυβα σπλισμού υπό ολιγοκυκλική κόπωση

Η επικρατούσα μέθοδος για την ανάλυση της μη γραμμικής συμπεριφοράς του χάλυβα σπλισμού υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση ακολουθεί το μοντέλο των Guiffre-Menegotto-Pinto



Σχήμα 3.6.(α): Αναπαράσταση υστερητικού βρόγχου σύμφωνα με το μοντέλο Menegotto-Pinto

Το συγκεκριμένο μοντέλο αναπαριστά τους βρόγχους υστέρησης των χαλύβδινων ράβδων υπό ανακυκλιζόμενη συμπεριφορά εκφρασμένους σε όρους τάσης – παραμόρφωσης. Με στόχο την πληρέστερη μελέτη της μηχανικής συμπεριφοράς του διαβρωμένου χάλυβα οπλισμού κατηγορίας B500c, υπό σεισμικά φορτία, στη συγκεκριμένη ενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της μελέτης των πειραματικών βρόγχων υστέρησης χάλυβα S400 σε συνθήκες ολιγοκυκλικής κόπωσης, πριν και μετά την πρόκληση βλάβης διάβρωσης.

Η επιλογή του μοντέλου αυτού έναντι του απλού διγραμμικού και του Menegotto-Pinto έγινε καθώς τόσο το διγραμμικό αλλά και το Menegotto-Pinto είναι πλήρως συμμετρικά στο κλάδο του εφελκυσμού και της θλίψης χωρίς να λαμβάνουν υπόψη φαινόμενα λυγισμού, ενώ παράλληλα δεν λαμβάνουν υπόψη το ιστορικό φόρτισης του χάλυβα και την βλάβη που έχει επέλθει σε αυτόν.

Η περιβάλλουσα του μοντέλου βασίστηκε σε πειραματικά αποτελέσματα που πραγματοποιήθηκαν σε χάλυβες Φ16 B500C. Ο χάλυβας υποβλήθηκε σε δυναμική καταπόνηση στη μηχανή MTS μηχανικών δοκιμών του εργαστηρίου Τεχνολογίας και Αντοχής Υλικών. Το ελεύθερο μήκος μεταξύ των αρπάγων τέθηκε ίσο με 240 mm όση δηλαδή και η απόσταση μεταξύ των συνδετήρων στον φορέα που μελετήθηκε ενώ οι φορτίσεις μέχρι την αστοχία έγιναν διαδοχικά ανά τρεις κύκλους για κάθε επιβαλλόμενη παραμόρφωση. Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται με κόκκινη γραμμή τα αποτελέσματα του πειράματος και με μπλε η μονοτονική καμπύλη. Συγκρίνοντας τις δύο διαφορετικές αποκρίσεις παρατηρούμε ότι η δυναμική σε σχέση με την ψευδοστατική εμφανίζει μείωση της κλίσης του ελαστικού κλάδου φόρτισης. Επιπλέον το ιστορικό φόρτισης επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό δυσμενώς την

απόκριση του υλικού, καθώς ενώ φτάνει την τιμή του ορίου διαρροής της μονοτονικής καμπύλης στη συνέχεια παρατηρείται προοδευτική υποβάθμιση της φέρουσας ικανότητας εξαιτίας της μείωσης των ενεργειακών αποθεμάτων του.

ΕΠΙΒΑΛΛΟΜΕΝΕΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΙΣ-ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΕΙΣ ΣΕ ΧΑΛΥΒΑ B500c																			
ε(%)	0,02	0,04	0,06	0,08	0,1	0,12	0,14	0,16	0,18	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1,5	2	2,5	3	3,5
Δl(mm)	0,048	0,096	0,144	0,192	0,240	0,288	0,336	0,384	0,432	0,480	0,96	1,44	1,92	2,4	3,6	4,8	6	7,2	8,4

Πίνακας 3.6.(α): Επιβαλλόμενες Παραμορφώσεις – Μετατόπισεις σε Χάλυβα B500c



Εικόνες 3.6.(α): Μηχανική δοκιμή κόπωσης σε δοκίμιο αναφοράς (μη διαβρωμένο)

4. Πειραματικά Αποτελέσματα και Ανάλυση

Αριθμ. Δοκιμίου	Μήκος (cm)	Εκτεθειμένο Μήκος (cm)	Κερωμένο Μήκος (cm)	Λ1 (gr/cm)	Μάζα Αδιάβρωτου (κερωμένου) μήκους (gr)	Τελική (συνολική) Μάζα (gr)	Τελική (διαβρωμένη) Μάζα (gr)	Λ2 (gr/cm)	Ποσοστιαία Απώλεια Μάζας (%)
Steel 06	34,3	24	10,3	15,91	163,873	525,59	361,717	15,07154167	5,27
Steel 09	34	24	10	15,91	159,1	528,2	369,1	15,37916667	3,336476011
Steel 11	33,8	24	9,8	15,91	155,918	530,32	374,402	15,60008333	1,95
Steel 13	34	24	10	15,91	159,1	522,15	363,05	15,12708333	4,92
Steel 21	33,5	24	9,5	15,91	151,145	517,02	365,875	15,24479167	4,18
Steel 22	33,3	24	9,3	15,91	147,963	515,31	367,347	15,306125	3,795568825
Steel 24	33,3	24	9,3	15,91	147,963	516,3	368,337	15,347375	3,54
Steel 25	34,4	24	10,4	15,91	165,464	534,35	368,886	15,37025	3,39
Steel 34	33,9	24	9,9	15,91	157,509	518,02	360,511	15,02129167	5,59
Steel 36	33,5	24	9,5	15,91	151,145	523,6	372,455	15,51895833	2,46
Steel 37	33,4	24	9,4	15,91	149,554	516,4	366,846	15,28525	3,93

Πίνακας 4.(α) : Αποτελέσματα Ποσοστιαίας Απώλειας Μάζας

Αριθμ. Δοκιμίου	Ποσοστιαία Απώλεια Μάζας (%)	d ₀ (Αρχική Ονομαστική Διάμετρος) (mm)	d _{red} (Μειωμένη Διάμετρος) (mm)	Corrosion damage	Αριθμός Κύκλων Φόρτισης N	Παραμόρφωση Αστοχίας (%)	Μέγιστη Τάση στον κύκλο αστοχίας (Mpa)	Μέγιστη καταγραφείσα εφελκυστική τάση (Mpa)	Μέγιστη καταγραφείσα θλιπτική τάση (Mpa)
Steel X1	0	16	16	Non-corroded	52	2,5	348,6	552,4	-441,4
Steel X2	0	16	16	Non-corroded	52	2,5	346,1	560,0	-444,9
Steel X3	0	16	16	Non-corroded	52	2,5	349,3	556,6	-447,6
Steel X4	0	16	16	Non-corroded	53	2,5	350,2	558,2	-449,3
Steel X5	0	16	16	Non-corroded	51	2,5	299,3	557,8	-455,7
Steel 11	1,95	16	15,84	Uniform corrosion	53	3	324,5	522,0	-437,8
Steel 36	2,46	16	15,80	Uniform corrosion	54	3	278,7	549,7	-451,2
Steel 9	3,34	16	15,73	Uniform corrosion	52	2,5	265,2	504,3	-414,4
Steel 25	3,39	16	15,73	Uniform corrosion	55	3	265,2	514,2	-408,1
Steel 24	3,54	16	15,71	Uniform corrosion	55	3	283,1	533,0	-414,4
Steel 22	3,8	16	15,69	Uniform corrosion	51	2,5	264,3	513,2	-444,9
Steel 37	3,93	16	15,68	Uniform corrosion	51	2,5	2,5	519,8	-414,4
Steel 21	4,18	16	15,66	Uniform corrosion	55	3	2,5	504,3	-402,7
Steel 13	4,92	16	15,60	Uniform corrosion	51	2,5	2,5	489,9	-411,7
Steel 6	5,27	16	15,57	Uniform corrosion	52	2,5	2,5	479,1	-394,6
Steel 34	5,59	16	15,55	Uniform corrosion	53	3	2,5	533,0	-412,6

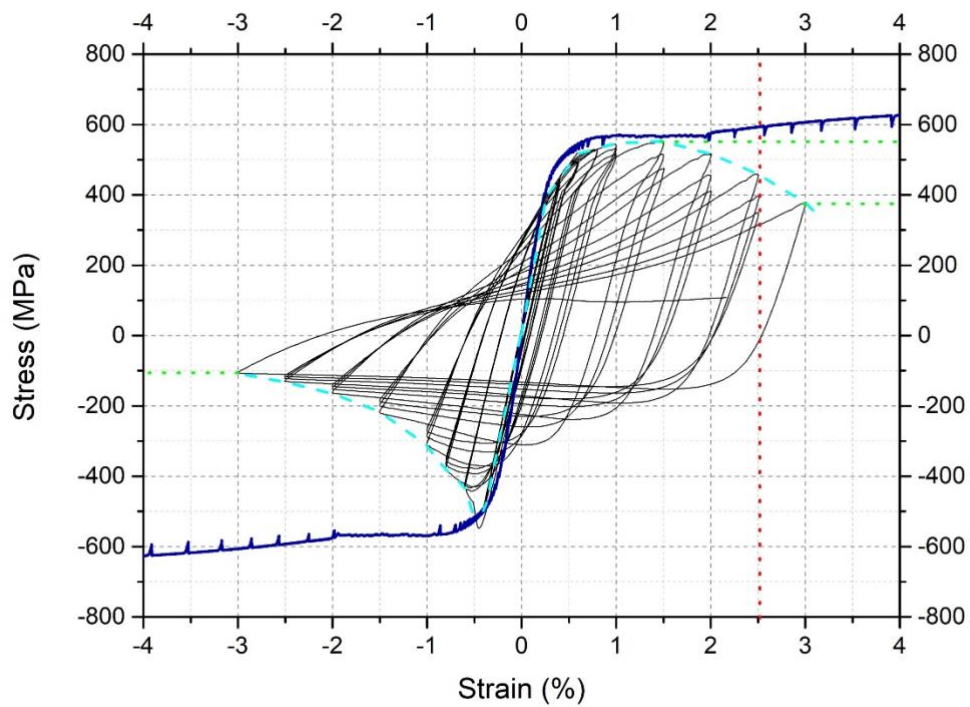
$$d_{red} = d_0 \sqrt{1 - n}$$

όπου

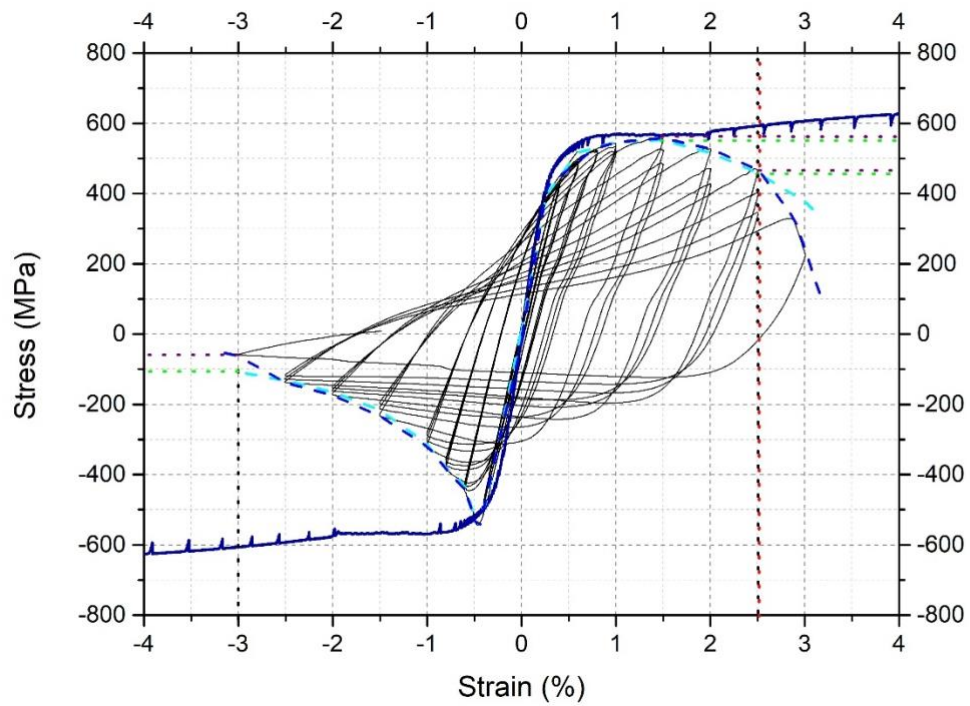
d_{red} : μειωμένη διάμετρος,

d_0 : αρχική ονομαστική διάμετρος (άρα $d_0 = 16mm$),

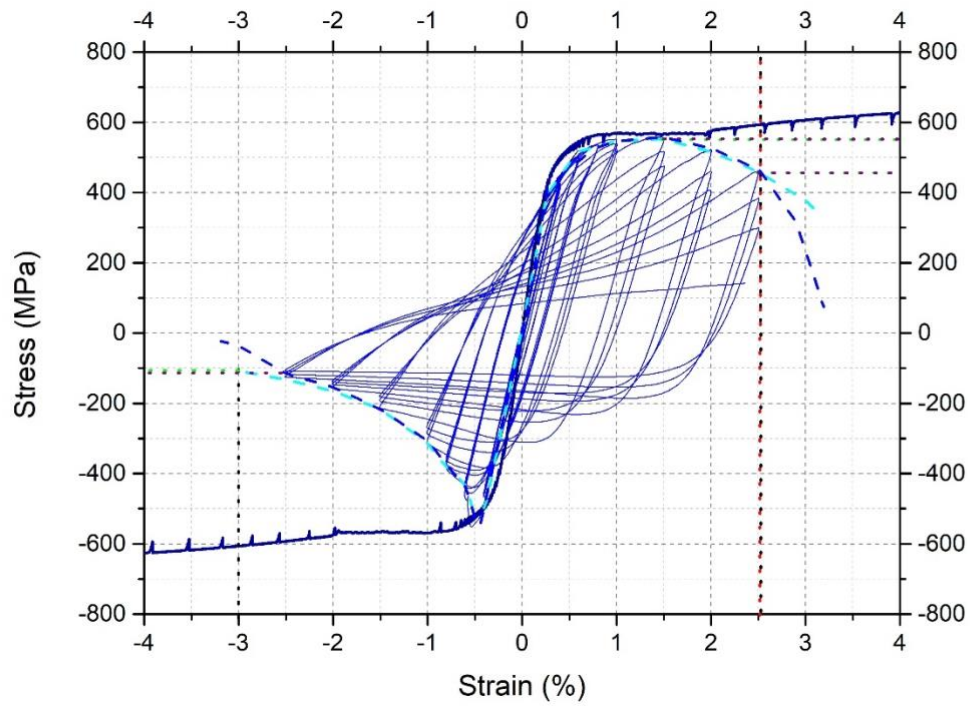
n = απώλεια μάζας



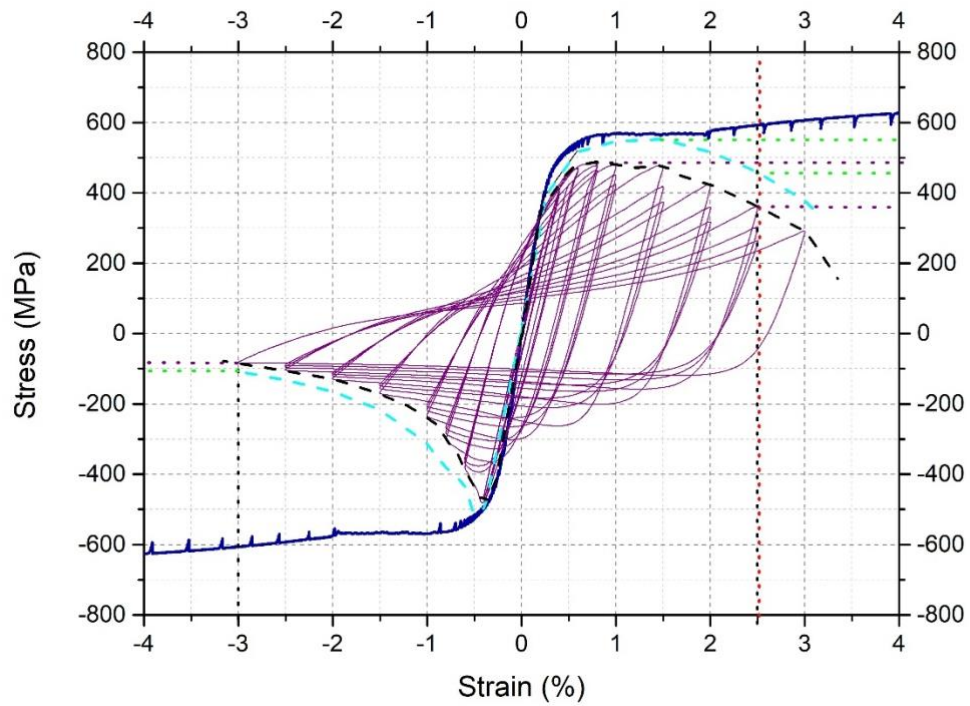
Γράφημα 4.(1) : Δοκίμιο αναφοράς Steel X1



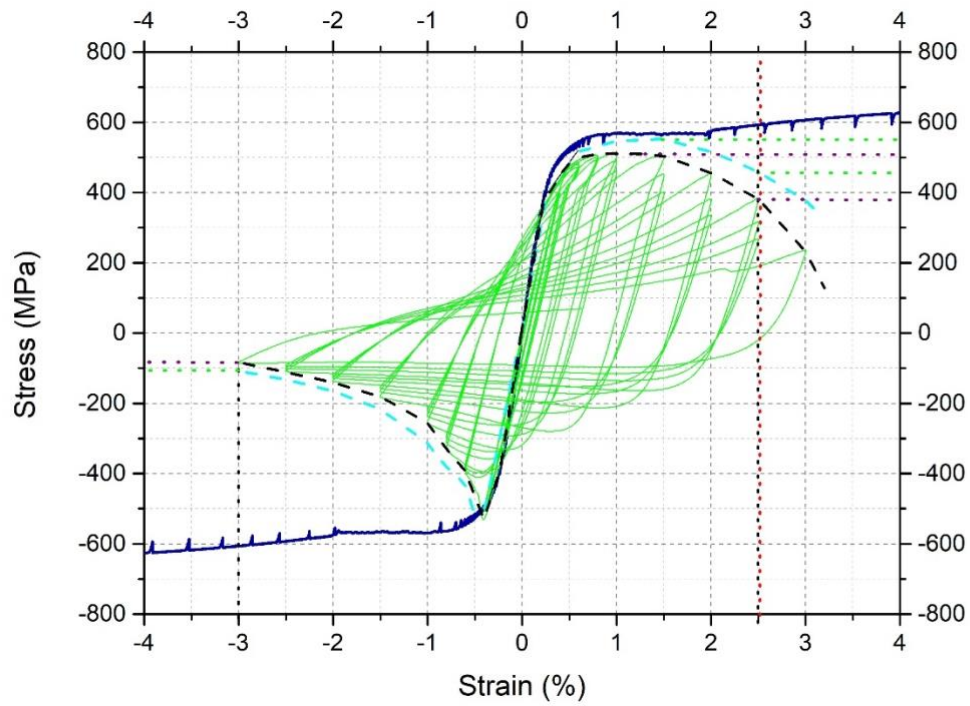
Γράφημα 4.(2) : Δοκίμιο αναφοράς Steel X2



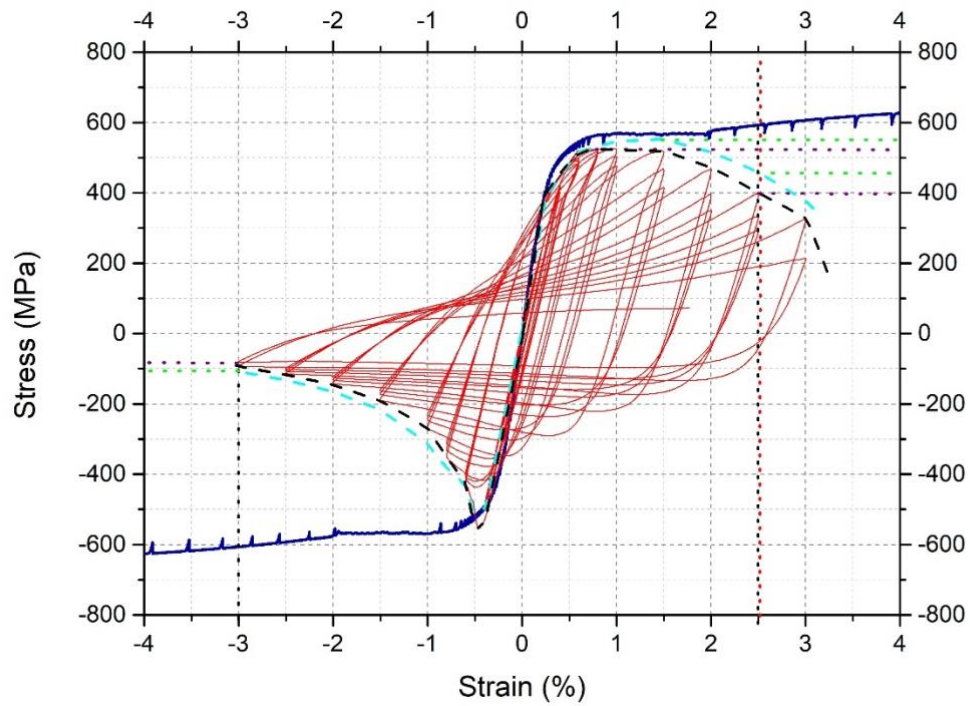
Γράφημα 4.(3) : Δοκίμιο αναφοράς Steel X3



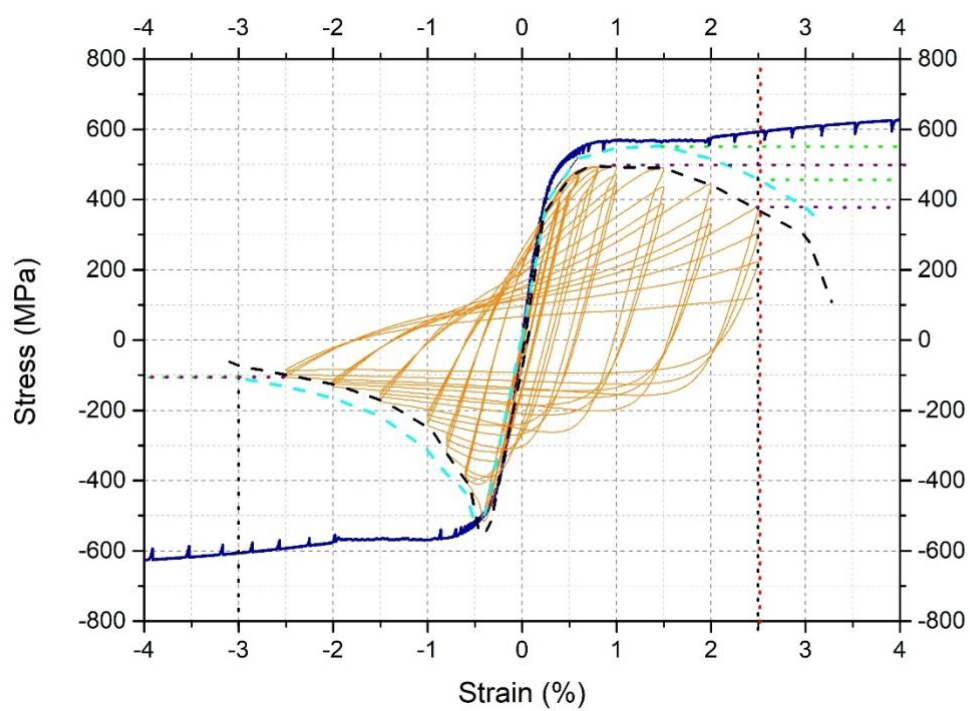
Γράφημα 4.(4) : Διαβρωμένο Δοκίμιο Steel 06



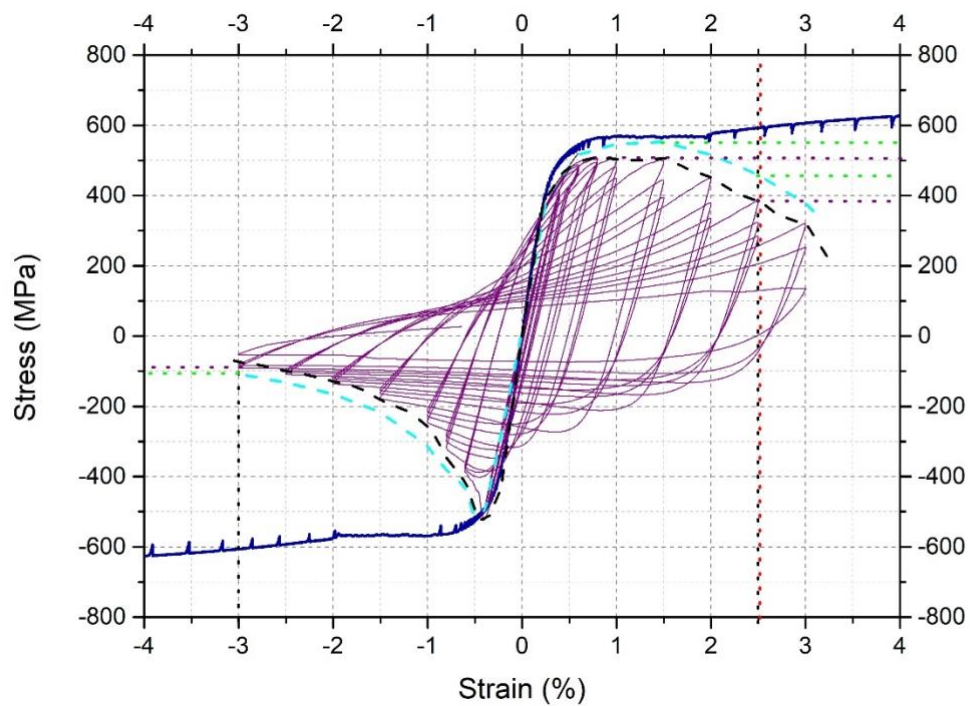
Γράφημα 4.(5) : Διαβρωμένο Δοκίμιο Steel 09



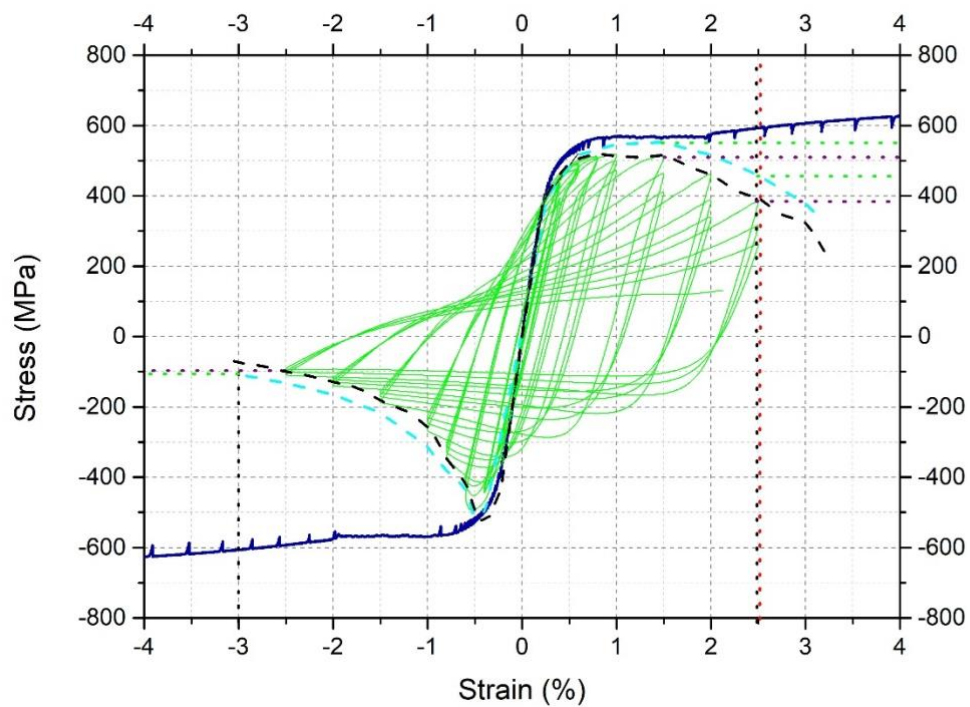
Γράφημα 4.(6) : Διαβρωμένο Δοκίμιο Steel 11



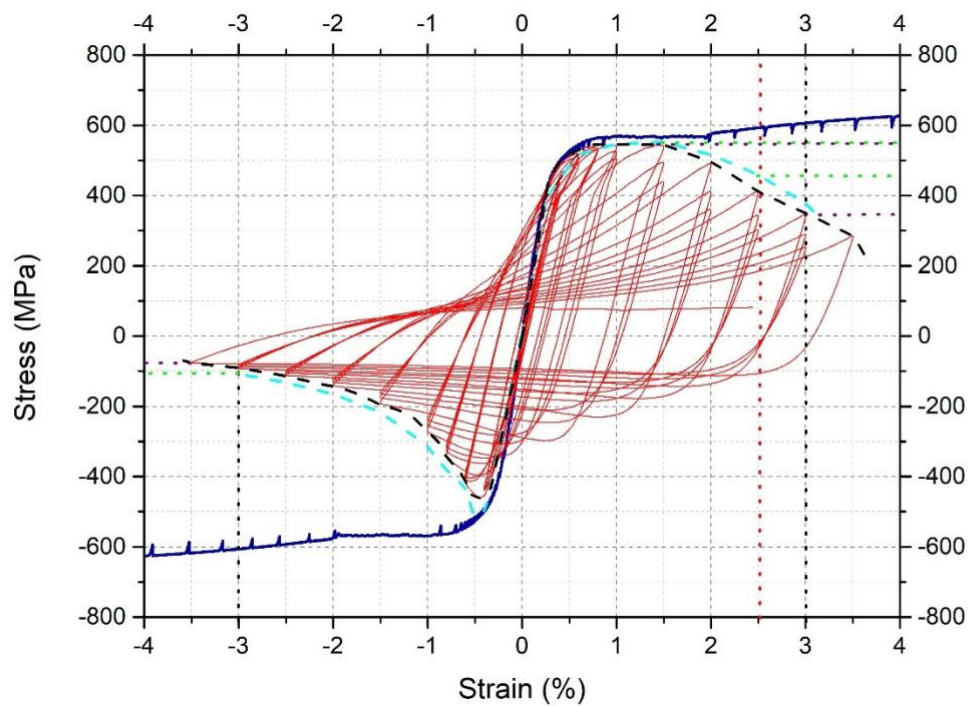
Γράφημα 4.(7) : Διαβρωμένο Δοκίμιο Steel 13



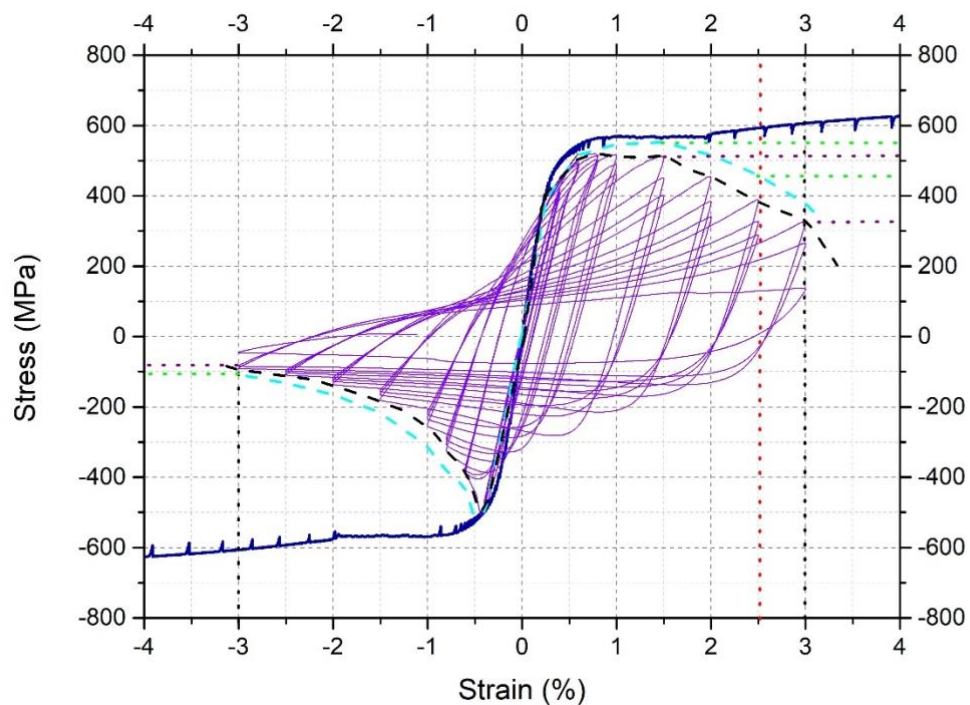
Γράφημα 4.(8) : Διαβρωμένο Δοκίμιο Steel 21



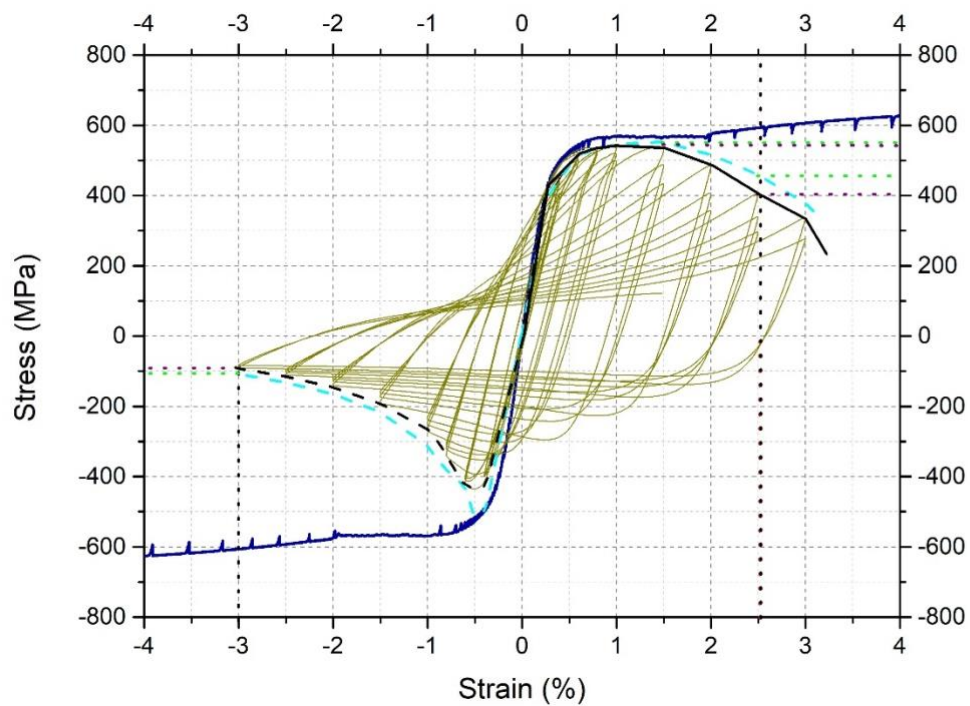
Γράφημα 4.(9) : Διαβρωμένο Δοκίμιο Steel 22



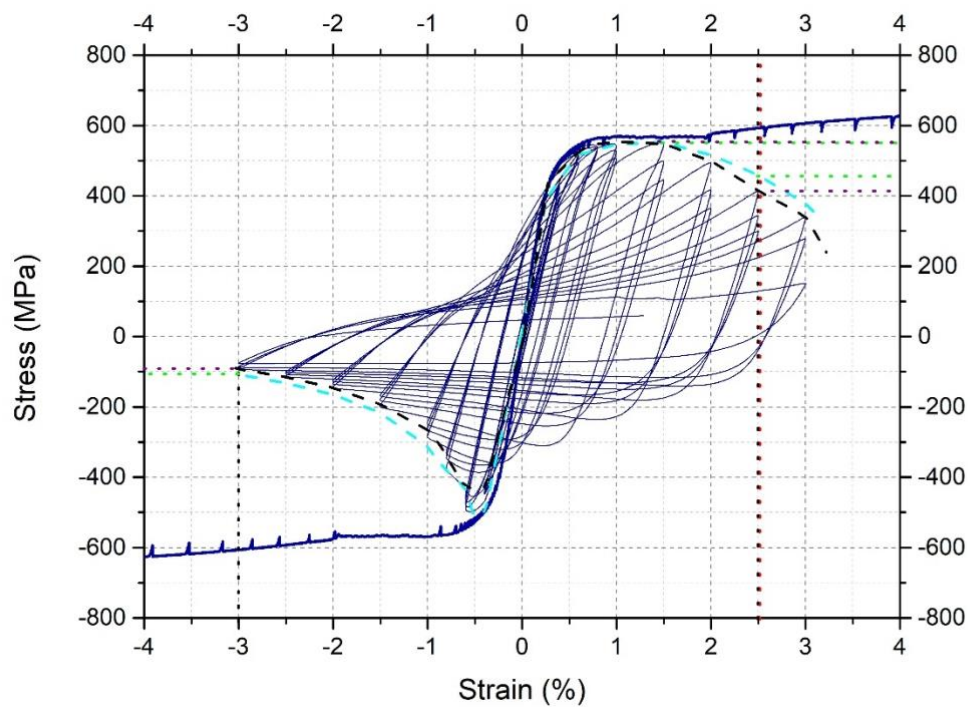
Γράφημα 4.(10) : Διαβρωμένο Δοκίμιο Steel 24



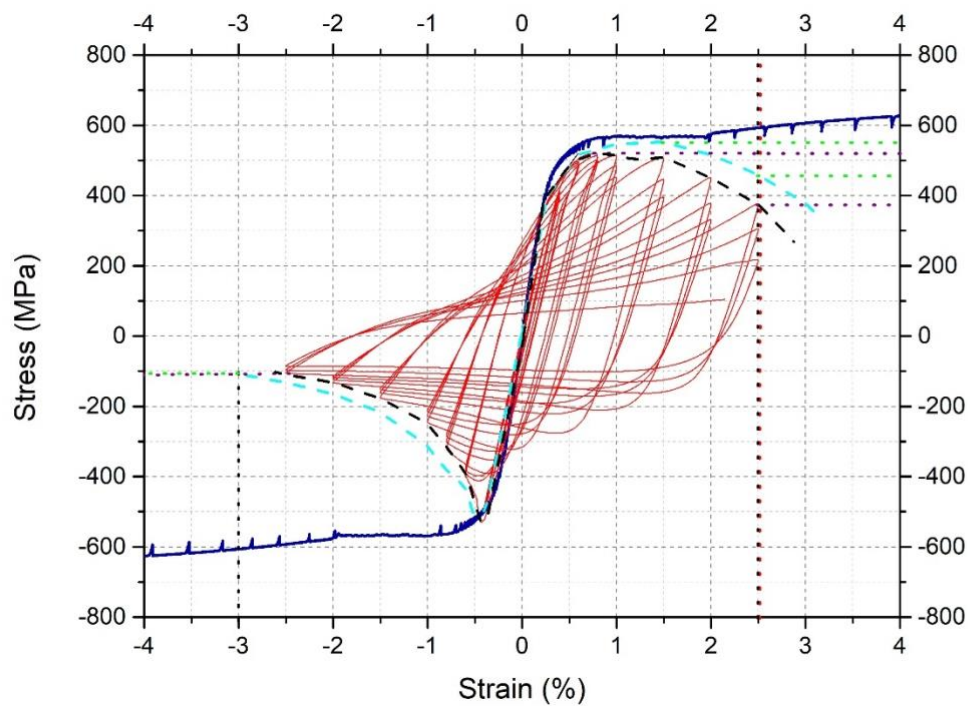
Γράφημα 4.(11) : Διαβρωμένο Δοκίμιο Steel 25



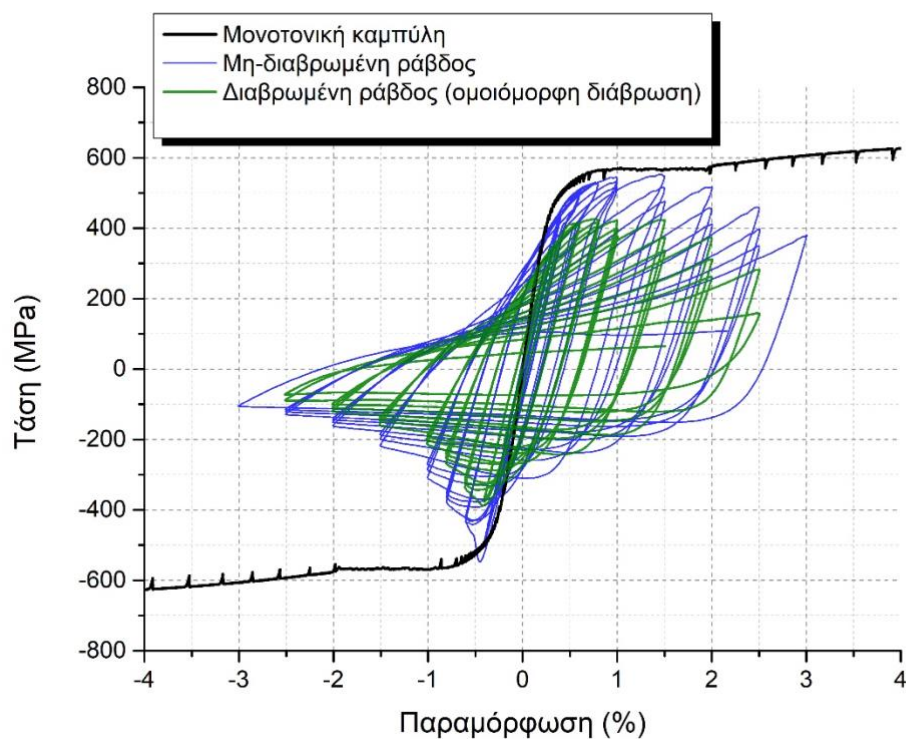
Γράφημα 4.(12) : Διαβρωμένο Δοκίμιο Steel 34



Γράφημα 4.(13) : Διαβρωμένο Δοκίμιο Steel 36



Γράφημα 4.(14) : Διαβρωμένο Δοκίμιο Steel 37



Γράφημα 4.(15) : Σύγκριση Μονοτονικής καμπύλης – Μη διαβρωμένης ράβδου – Ομοιόμορφα διαβρωμένη ράβδος

5. Συμπεράσματα

- Τα μηχανικά χαρακτηριστικά του χάλυβα υπό δυναμική καταπόνηση παρουσιάζουν απόκλιση από τα αντίστοιχα της μονοτονικής φόρτισης, η οποία λαμβάνεται αποκλειστικά υπόψη από τα ελληνικά και διεθνή τεχνικά κανονιστικά κείμενα.
- Το μέγεθος της ποσοστιαίας απώλειας μάζας παρότι αποτελεί έναν κοινά αποδεκτό δείκτη εκτίμησης της βλάβης διάβρωσης του χάλυβα, ωστόσο η έννοια αυτή υπολείπεται στο να αποδώσει επαρκώς το βαθμό της πραγματικής προκληθείσας βλάβης διάβρωσης του χάλυβα.
- Διαπιστώθηκε απόκλιση μεταξύ της διατομής που προκύπτει από την ομοιομορφισμένη μειωμένη διαμέτρο d_{red} σε σχέση με την πραγματική απομένουσα διατομή.
- Λόγω μεγάλου μήκους λυγισμού, η εμφάνιση λυγισμικών φαινομένων κυριαρχεί απόλυτα στη συσσώρευση βλάβης του χάλυβα υποβαθμίζοντας ραγδαία τη δυναμική του απόκριση.
- Από τα χαμηλά ακόμη ποσοστά διάβρωσης (μικρότερα από 6% ομοιόμορφης απώλειας μάζας) προέκυψε υποβαθμισμένη μηχανική συμπεριφορά του χάλυβα.



Εικόνα 5.(α) : Δοκίμιο Αναφοράς (μη-διαβρωμένο) Χ1





Εικόνα 5(β): Δοκίμιο με ομοιόμορφη διάβρωση Steel 06



Εικόνα 5(γ): Δοκίμιο με ομοιόμορφη διάβρωση Steel 09



Εικόνα 5(δ): Δοκίμιο με ομοιόμορφη διάβρωση Steel 11



Εικόνα 5(ε): Δοκίμιο με ομοιόμορφη διάβρωση Steel 13



Εικόνα 5(στ'): Δοκίμιο με ομοιόμορφη διάβρωση Steel 21



Εικόνα 5(η): Δοκίμια με ομοιόμορφη διάβρωση Steel 22-24-25