

# Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΤΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΣΤΗΝ ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΟΥ ΣΙΔΗΡΟΟΠΛΙΣΜΟΥ B500C

Χάρης Αλκ. Αποστολόπουλος

*Μέλος ΔΕΠ, τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών, Πανεπιστήμιο Πατρών*

*Λέξεις κλειδιά: Διάβρωση αλατονέφωσης, σιδηροοπλισμός B500c, υποβάθμιση μηχανικών ιδιοτήτων*

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ :** Για την εξέταση της επίδρασης της γεωμετρίας της διατομής του σιδηροοπλισμού B500c και του βαθμού διάβρωσής του στην μηχανική του συμπεριφορά, πραγματοποιήθηκε πειραματική μελέτη σε ράβδους διαμέτρου 8, 12, 16 and 18 mm οι οποίες διαβρώθηκαν σε θάλαμο αλατονέφωσης για 10, 20, 30, 45, 60, 90 και 120 ημέρες και στην συνέχεια δοκιμάστηκαν σε εφελκυσμό. Από τις μετρήσεις, καταγράφηκε σημαντική διαφοροποίηση του ποσοστού μαρτενσίτη στο μη διαβρωμένο υλικό από διατομή σε διατομή και βαθμιαία πτώση του λόγω διάβρωσης. Όμοια καταγράφηκε διαφοροποίηση των μηχανικών ιδιοτήτων εφελκυσμού στο μη διαβρωμένο υλικό από διατομή σε διατομή και αντίστοιχα γενική πτώση των μηχανικών ιδιοτήτων με τον βαθμό διάβρωσής του.

## 1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ:

Η διάβρωση του χάλυβα οπλισμού σκυροδέματος εμφανίζεται να είναι η κυριότερη αιτία υποβάθμισης των κατασκευών και να συνιστά ένα σοβαρό πρόβλημα για την ασφάλεια εν γένει και για την οικονομία σεισμογόνων περιοχών. Τα υψηλά επίπεδα του pH (12.5 – 13) στο σκυρόδεμα δημιουργώντας ένα λεπτό παθητικό στρώμα οξειδίων στην επιφάνεια των ράβδων σιδηροοπλισμού του παρέχουν προστασία. Όμως η ευστάθεια της αλκαλικής κατάστασης και η προστασία ανατρέπονται όταν οι τιμές pH του περιβάλλοντος του σκυροδέματος παρουσιάσουν πτώση ιδιαίτερα κάτω από 11 [1-2] και ο ρυθμός διάβρωσης αυξάνει όταν το pH πέσει στην τιμή 9. Η συχνά παρατηρούμενη διάβρωση του σιδηροοπλισμού στο σκυρόδεμα, προκαλείται είτε λόγω διάχυσης χλωριόντων στο σκυρόδεμα, είτε λόγω ενανθράκωσης του σκυροδέματος η και σε συνδυασμό με ρηγμάτωση της επικάλυψης του σιδηροοπλισμού. Οι μηχανισμοί που

δρουν και διαλύουν χημικά το λεπτό στρώμα προστασίας του σιδηροοπλισμού προκαλώντας την έναρξη της τοπικής διάβρωσης γενικώς είναι γνωστοί [3-4]. Τα αποτελέσματα της διάβρωσης συνοδεύονται κυρίως απο φαινόμενα όπως: η αύξηση του όγκου του υλικού λόγω των οξειδίων, η μείωση της ενεργού διατομής, η πρόκληση εγκοπών, η τοπική συγκέντρωση τάσεων, η μείωση της ολκιμότητάς του, η απώλεια της συνάφειας σιδηροοπλισμού – σκυροδέματος [5-6] και η πτώση των μηχανικών ιδιοτήτων [7-14] οι οποίες μετά απο κάποιο χρόνο μπορεί να υποβαθμιστούν σε τέτοιο βαθμό, ώστε να τίθενται κάτω από τις ελάχιστες απαιτήσεις που θέτουν οι προδιαγραφές. Η μείωση μάλιστα της ολκιμότητας του σιδηροοπλισμού παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον διότι σχετίζεται άμεσα με την μηχανική επίδοση του υλικού και εν τέλει με την αντισεισμική ασφάλεια των κατασκευών [15-16]. Ενώ όμως η δομική ακεραιότητα των κατασκευών πέραν της μηχανικής επίδοσης του χάλυβα κατοχυρώνεται και απο κανόνες αντισεισμικού σχεδιασμού εν τούτοις δεν λαμβάνεται υπ' όψιν η διαφοροποίηση των τιμών των μηχανικών ιδιοτήτων σε σχέση με το μέγεθος της διατομής του σιδηροοπλισμού, ούτε ο ρυθμός μείωσης των ιδιοτήτων του σε σχέση με το βαθμό διάβρωσής του. Η ανάγκη προβλέψιμης και αξιόπιστης μηχανικής επίδοσης του σιδηρού οπλισμού σκυροδέματος σε βάθος χρόνου, πρέπει να αποτελεί στόχο και σταθερή επιδίωξη. Για τον λόγο αυτό, στην παρούσα εργασία εξετάστηκε και μελετήθηκε πειραματικά η επίδραση τόσο του βαθμού διάβρωσης όσον και του μεγέθους της διατομής του σιδηροοπλισμού B500c στις μηχανικές ιδιότητες εφελκυσμού. Προς τούτο ελέγχθηκαν δείγματα ράβδων χάλυβα διαμέτρου 8mm, 12mm, 16mm και 18 mm (Φ8, Φ12, Φ16, Φ18) Ελληνικής βιομηχανικής παραγωγής.

## 2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ -ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

### 2.1 Δοκιμές διάβρωσης

Για τις ανάγκες της πειραματικής μελέτης χρησιμοποιήθηκαν ράβδοι χάλυβα B500c, διαμέτρων 8, 12,16 και 18 mm. Τα δείγματα εφελκυσμού διαμορφώθηκαν με συνολικό μήκος 436, 488, 544 και 572mm ήτοι με καθαρό μήκος 316, 368, 424, 452 mm μεταξύ των αρπαγών για τις διατομές (Φ8, Φ12, Φ16, Φ18) και επιπλέον μήκος 60 mm σε κάθε άκρο. Οι δοκιμές της επιταχυμένης εργαστηριακής διάβρωσης πραγματοποιήθηκαν σε θάλαμο αλατονέφωσης, σύμφωνα με την προδιαγραφή ASTM B117. Τα

δοκίμια πριν τοποθετηθούν στον θάλαμο αλατονέφωσης μετρήθηκαν και ζυγίστηκαν με ακρίβεια 0.01g. Το διάλυμα άλατος (NaCl) που τοποθετήθηκε στη δεξαμενή, αποτελείτο από αποσταγμένο νερό με περιεκτικότητα 50gr χλωριούχου νατρίου ανά κιλό νερού. Τα δοκίμια διαβρώθηκαν για 10, 20, 30, 45, 60, 90 και 120 ημέρες και σε κάθε χρόνο διάβρωσης αντιστοιχούσαν 6 δοκίμια. Μετά από κάθε διακεκριμένο χρόνο διάβρωσης τα δοκίμια καθαρίστηκαν, ζυγίστηκαν και υπολογίστηκε η απώλεια μάζας σύμφωνα με την προδιαγραφή ASTM G1-90. Στην συνέχεια πραγματοποιήθηκαν δοκιμές εφελκυσμού σύμφωνα με την προδιαγραφή ISO 15630-1, σε θερμοκρασία 24°C, με ρυθμό επιμήκυνσης 2 mm/min. Η (φέρουσα) πραγματική διατομή των δοκιμίων υπολογίστηκε σύμφωνα με την προδιαγραφή DIN 488 με τη σχέση:

$$A_s = \frac{1.274 \cdot G}{l} \quad (1)$$

όπου το G είναι το βάρος του δοκιμίου σε gr, l είναι το μήκος του δοκιμίου σε mm και  $A_s$  το εμβαδόν της διατομής σε  $cm^2$ .

Συνολικά πραγματοποιήθηκαν 192 μηχανικές δοκιμές εφελκυσμού, 6 ανά διάμετρο και ανά επίπεδο διάβρωσης των δοκιμίων. Από τις μηχανικές δοκιμές αποτιμήθηκαν οι ιδιότητες: ονομαστικό και πραγματικό όριο διαρροής  $R_p$  [MPa], ονομαστικό και πραγματικό όριο θραύσης  $R_m$  [MPa], ομοιόμορφη παραμόρφωση  $A_{gt}$  [%] και ειδικό έργο παραμόρφωσης U [N/mm<sup>2</sup>]. Το ειδικό έργο παραμόρφωσης υπολογίστηκε ως το εμβαδό που ευρίσκεται κάτω από την καμπύλη τάσης – παραμόρφωσης, όπου η τάση υπολογίστηκε με βάση την πραγματική διατομή των ράβδων.

## 2.2 Απώλεια μάζας

Προκειμένου να εκτιμηθεί η επίδραση της διάβρωσης στην απώλεια μάζας, πραγματοποιήθηκε σειρά 192 εργαστηριακών δοκιμών αλατονέφωσης στις διατομές διαμέτρων 8, 12, 16 και 18 mm του σιδηροοπλισμού B500c. Πραγματοποιήθηκαν επίσης 42μετρήσεις (6 δοκίμια σε κάθε χρόνο διάβρωσης πλέον 6 δοκιμίων αναφοράς) και στην διατομή διαμέτρου 10 mm. Από τα αποτελέσματα των μετρήσεων του πίνακα 1, φαίνεται ότι η απώλεια μάζας για ίδιους χρόνους διάβρωσης βαίνει μειούμενη με αύξηση του μεγέθους της διατομής.

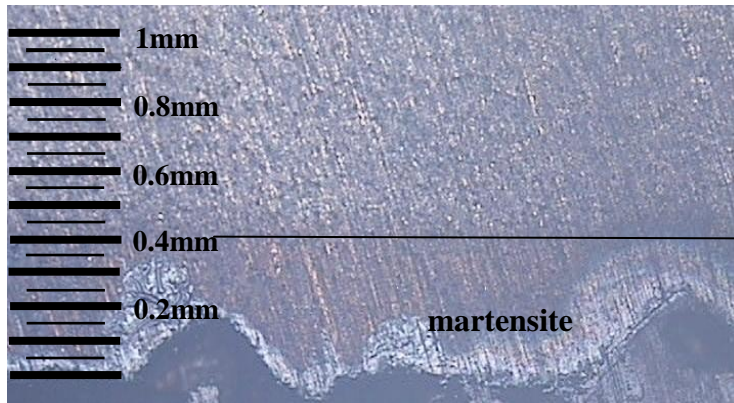
Πίνακας 1: Ποσοστιαία απώλεια μάζας δοκιμίων B500c λόγω επιταχυμένης διάβρωσης αλατονέφωσης

Χρόνος σε ημέρες	Διάμετρος δοκιμίου [mm]				
	8	10	12	16	18
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10	1.33	1.00	0.92	0.94	0.67
20	2.67	2.19	1.77	0.99	1.21
30	3.03	2.90	2.40	2.71	1.76
45	5.15	4.28	4.01	4.77	2.01
60	6.55	5.97	5.50	5.77	3.16
90	9.89	8.52	8.93	5.14	3.95
120	13.55	11.50	11.66	7.83	5.08

Με δεδομένο ότι η διάβρωση του σιδηροοπλισμού αρχίζει από την εξωτερική του επιφάνεια, ενδιαφέρον παρουσιάζει η ποσοστιαία μεταβολή της επιφάνειας του ανθεκτικού μαρτενσιτικού υλικού. Προς τούτο, αφού πραγματοποιήθηκαν τομές σε ικανό αριθμό διαβρωμένων και μη διαβρωμένων, τα δείγματα λειάνθηκαν και εμβαπτίστηκαν σε διάλυμα Nital που έχει την ιδιότητα να χρωματίζει την μαρτενσιτική στοιβάδα σε σχέση με την υπόλοιπη διατομή (1.5 – 5 ml πυκνού νιτρικού οξέος σε 100 ml αιθυλικής αλκοόλης) όπως δείχνεται στις εικόνες 1 και 2. Στην συνέχεια μέσω φωτογράφισης και με λογισμικό επεξεργασίας εικόνας προσδιορίστηκε το ποσοστό του μαρτενσίτη

Εικόνα 1. Εγκάρσια διατομή του σιδηροοπλισμού μετά την εμβάπτιση σε Nital

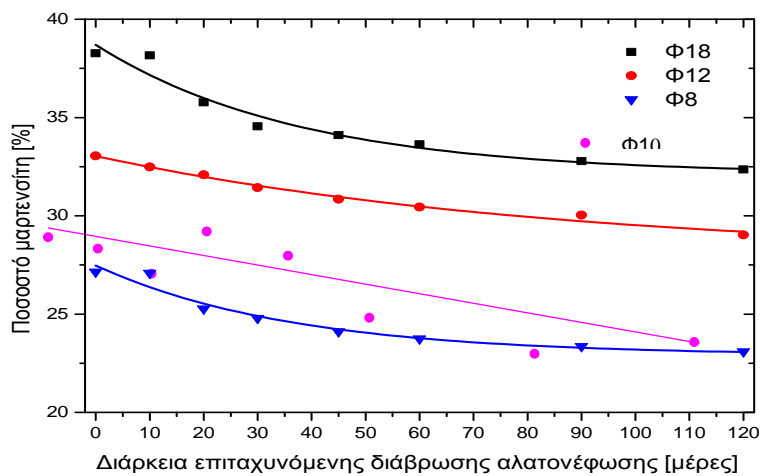




Εικόνα 2. Επιμήκης απομειωμένη διατομή, διαβρωμένου δοκιμίου 90 ημερών

Η ποσοστιαία μεταβολή της μαρτενσιτικής στρώσης υπολογίστηκε από την σχέση 2 και δείχνεται στο διάγραμμα 1

$$\text{Martensite \%} = \frac{\text{ολική επιφ.} - \text{εσωτερική επιφ.}}{\text{ολική επιφάνεια}} \cdot 100 \quad (2)$$



Διάγραμμα 1. Ποσοστιαία μεταβολή του μαρτενσίτη στις διατομές διαμέτρου 8, 10, 12 και 18 mm, για διάφορα επίπεδα διάβρωσης.

Στο διάγραμμα 1, παρατηρείται υψηλότερο ποσοστό μαρτενσίτη στις μεγάλες διατομές το οποίο μειώνεται εκθετικά με αύξηση του επιπέδου διάβρωσης. Η εκθετική εξίσωση είναι της μορφής:

$$y = y_0 + A \cdot e^{-(x/t)} \quad (3)$$

οι σταθερές  $y_0$ ,  $A$ , και  $t$  δείχνονται στον πίνακα 2

Πίνακας 2: Σταθερές της εκθετικής εξίσωσης για κάθε διατομή

Σταθερές	Ποσοστό μαρτενσίτη [%] Φ8	Ποσοστό μαρτενσίτη [%] Φ10	Ποσοστό μαρτενσίτη [%] Φ12	Ποσοστό μαρτενσίτη [%] Φ18
$y_0$	22.84467	-3133.6868	29.30056	32.29097
$A$	4.61957	3165.1900	3.87796	6.58644
$t$	37.18443	50759.647	51.27738	34.55036

### 2.3. Αποτελέσματα μηχανικών δοκιμών

Τα αποτελέσματα των μηχανικών δοκιμών εφελκυσμού για όλες τις διατομές και τα επίπεδα διάβρωσης που εξετάστηκαν, απεικονίζονται στα Διαγράμματα 2,3,4,5,6,7. Στις πιο κάτω τρισδιάστατες γραφικές παραστάσεις, παρουσιάζεται η μεταβολή των μηχανικών ιδιοτήτων συναρτήσει του χρόνου διάβρωσης και του μεγέθους της διατομής. Η απεικόνιση των πειραματικών αποτελεσμάτων του ονομαστικού και του πραγματικού ορίου διαρροής, του ονομαστικού και του πραγματικού ορίου θραύσης, του ορίου της ομοιόμορφης παραμόρφωσης προσεγγίστηκαν από μη γραμμικές εξισώσεις Taylor Series Polynomials και η μηχανική ιδιότητα του ειδικού έργου παραμόρφωσης από Extreme Value. Οι σταθερές των μη γραμμικών εξισώσεων παρουσιάζονται στον πίνακα 3.

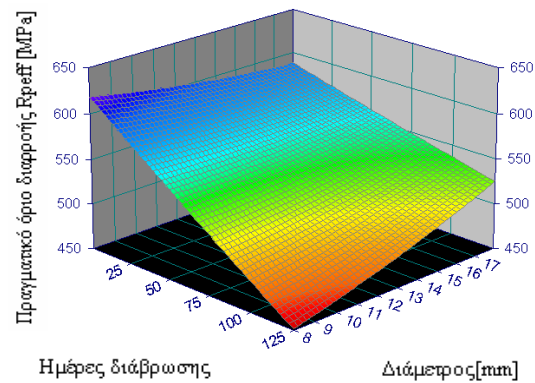
- Taylor Series Polynomial:  $z = a + b * x + c * y + d * x^2 + e * y^2 + fxy$
- Non-linear Extreme Value Function

$$z = a + b * e^{-e^{-\frac{x-c}{d} - \frac{x-c}{d} + 1}} + e * e^{-e^{-\frac{y-f}{g} - \frac{y-f}{g} + 1}} + h * e^{-e^{-\frac{x-c}{d} - \frac{x-c}{d} + 1}} * e^{-e^{-\frac{y-f}{g} - \frac{y-f}{g} + 1}}$$

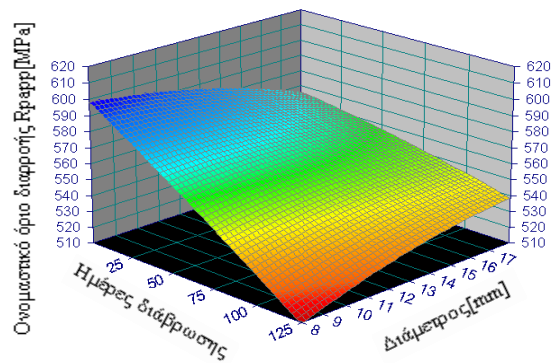
Στον Πίνακα 3 δίνονται οι σταθερές των συναρτήσεων που χρησιμοποιήθηκαν για την προσέγγιση των μηχανικών ιδιοτήτων

Πίνακας 3

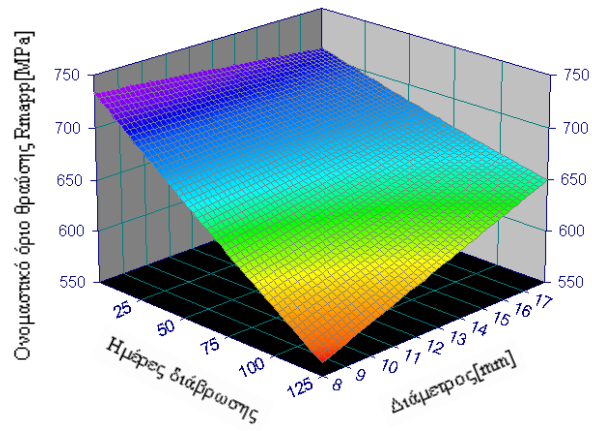
Σταθερές	Ποσοστό μαρτενσίτη [%] Φ8	Ποσοστό μαρτενσίτη [%] Φ10	Ποσοστό μαρτενσίτη [%] Φ12	Ποσοστό μαρτενσίτη [%] Φ18
y <sub>o</sub>	22.84467	-3133.6868	29.30056	32.29097
A	4.61957	3165.1900	3.87796	6.58644
t	37.18443	50759.647	51.27738	34.55036



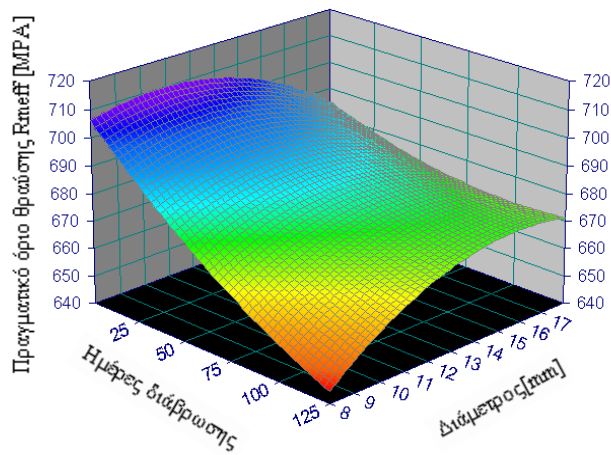
Διάγραμμα 2 : Μεταβολή του ονομαστικού ορίου διαρροής συναρτήσει του χρόνου διάβρωσης και του μεγέθους της διατομής (Taylor series Polynomial )



Διάγραμμα 3: Μεταβολή του πραγματικού ορίου διαρροής συναρτήσει του χρόνου διάβρωσης και του μεγέθους της διατομής (Taylor series Polynomial )

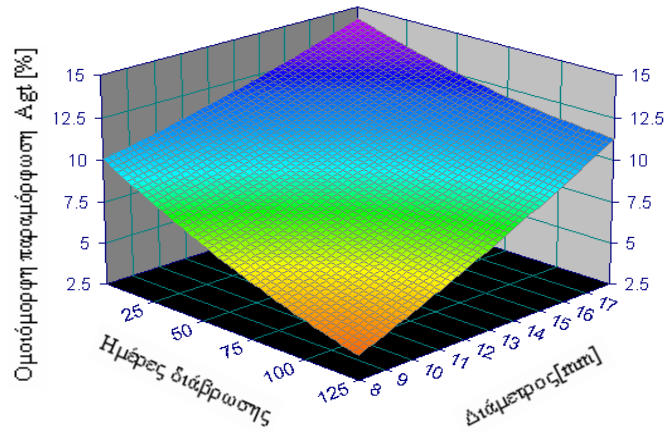


Διάγραμμα 4: Μεταβολή του ονομαστικού ορίου θραύση συναρτήσει του χρόνου διάβρωσης και του μεγέθους της διατομής (Taylor series Polynomial )

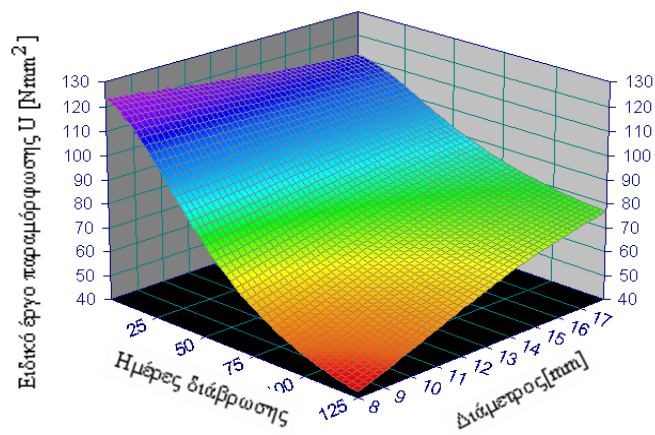


Διάγραμμα 5: Μεταβολή του πραγματικού ορίου θραύσης συναρτήσει του χρόνου διάβρωσης και του μεγέθους της διατομής (Taylor series Polynomial )





Διάγραμμα 6: Μεταβολή της ομοιόμορφης παραμόρφωσης με τον χρόνο διάβρωσης και το μέγεθος της διατομής (Taylor series Polynomial )



Διάγραμμα 7: Μεταβολή του ειδικού έργου παραμόρφωσης συναρτήσει του χρόνου διάβρωσης και του μεγέθους της διατομής (Non-linear Extreme Value Function)

### 3. ΣΥΖΗΤΗΣΗ:

Στον πίνακα 1, παρατηρείται ότι για ίδιους χρόνους παραμονής στο περιβάλλον αλατονέφωσης η απώλεια μάζας είναι αντιστρόφως ανάλογη του μεγέθους της ονομαστικής διαμέτρου των δοκιμίων. Το αποτέλεσμα αυτό είναι αναμενόμενο καθώς το βάθος προσβολής για ίδιους χρόνους, είναι σταθερό σε όλα τα μεγέθη διατομών, με συνέπεια η σταθερή μείωση της διαμέτρου να προκαλεί μικρότερη ποσοστιαία απώλεια του υλικού στις μεγάλες διαμέτρους.

Στο Διάγραμμα 1 παρατηρήθηκε μεγαλύτερο ποσοστό μαρτενσίτη στις μεγάλες διατομές και εκθετική μείωση με τον χρόνο διάβρωσης. Προκύπτει επίσης ότι: το ποσοστό μαρτενσίτη στο μη διαβρωμένο υλικό κατέχει επιφάνεια 38% επί της συνολικής για το Φ18, 32.5% επί της συνολικής για το Φ12, 30% επί της συνολικής για το Φ10 και 25% επί της συνολικής επιφάνειάς του για το Φ8. Μετά από έκθεση 120 ημερών σε περιβάλλον αλατονέφωσης η απομένουσα επιφάνεια μαρτενσίτη μειώνεται περίπου με τον ίδιο ρυθμό για όλες τις διατομές.

Απο τα Διαγράμματα 2,6,7 προκύπτει διαφοροποίηση των τιμών του ορίου διαρροής, του ορίου της ομοιόμορφης παραμόρφωσης και του ειδικού έργου παραμόρφωσης κατά 8% , 40 % και 19% μεταξύ των μη διαβρωμένων χαλύβων Φ8 και Φ18. Σήμερα, η διαφοροποιημένη μηχανική συμπεριφορά του χάλυβα οπλισμού σκυροδέματος B500c απο διατομή σε διατομή δεν λαμβάνεται υπόψη από τους κανονισμούς διαστασιολόγησης των δομικών στοιχείων των κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα (ΕΚΩΣ), ούτε από τις προδιαγραφές του υλικού (ΕΛΟΤ 1421). Τόσο από το διάγραμμα 7 της μεταβολής του ειδικού έργου παραμόρφωσης και από τα διαγράμματα 2 και 3 της μεταβολής του ορίου διαρροής που εν πολλοίς ορίζουν τον δείκτη ποιότητας του χάλυβα, φαίνεται ότι η μηχανική απόδοση του σιδηροοπλισμού τόσο στο μη διαβρωμένο όσο και στο διαβρωμένο δεν είναι σταθερή για κάθε διάμετρο. Το ζήτημα αυτό γίνεται πολύ πιο σύνθετο όταν συνυπάρξει και θέμα διάβρωσης, αφού από τα διαγράμματα 2 έως 7, προκύπτει έντονος ρυθμός πτώσης των μηχανικών ιδιοτήτων αντοχής και ολκιμότητας στις μικρές διαμέτρους και μικρότερος ρυθμός πτώσης των μηχανικών ιδιοτήτων των διατομών μεγαλύτερων διαμέτρων. Από την σύγκριση των αποτελεσμάτων φαίνεται ότι σε μία περιοχή διάβρωσης (20 ημέρες) οι τιμές του ειδικού

έργου παραμόρφωσης του χάλυβα διαφόρων διατομών φαίνεται να ταυτίζονται και στην συνέχεια να αποκλίνουν ιδιαίτερα. Αυτό έχει ως συνέπεια η μηχανική απόδοση [11] των διαφόρων διατομών σιδηροοπλισμού (Φ8, Φ12, Φ16, Φ18) να είναι ισοδύναμη μόνον μετά απο συγκεκριμένο βαθμό βλάβης λόγω διάβρωσης. Η πτώση των τιμών του ορίου διαρροής, της ομοιόμορφης παραμόρφωσης, του ειδικού έργου παραμόρφωσης μεταξύ του μη διαβρωμένου και του διαβρωμένου (120 ημέρες αλατονέφωση) χάλυβα καταγράφηκε για το Φ8 : 31% - 66% -73% και για το Φ18: 10% - 24% - 22% . Η παρατεταμένη έκθεση των κατασκευών απο οπλισμένο σκυρόδεμα σε διαβρωτικό περιβάλλον ενδεχομένως να αποβεί πρώτιστα επιβλαβής για τις μικρού μεγέθους διατομές σιδηροοπλισμού δευτερευόντως για τις μεγαλύτερες διατομές και πιθανόν καταστροφική για τις δομές και τον άνθρωπο. Ίσως πρέπει να εξεταστούν σοβαρά σκέψεις περί υιοθέτησης κανόνων παρακολούθησης της «υγείας» των κατασκευών στην διάρκεια της ζωής τους καθώς και σκέψεις περί ενός αυστηρότερου πλαισίου τεχνικής επίβλεψης στο στάδιο της ανέγερσης. Το φαινόμενο της διαφοροποίησης της μηχανικής απόδοσης απο διατομή σε διατομή και με βάση το επίπεδο διάβρωσης κατά την διάρκεια οριακών καταστάσεων φόρτισης μπορεί να είναι η αιτία απρόβλεπτης συμπεριφοράς με αρνητικές συνέπειες στην δομική ακεραιότητα μιας κατασκευής απο οπλισμένο σκυρόδεμα.

#### 4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ:

Στην εργασία αυτή μελετήθηκε η επίδραση του μεγέθους της διατομής και της διάβρωσης, στις μηχανικές ιδιότητες εφελκυσμού του χάλυβα οπλισμού σκυροδέματος κατηγορίας B500c. Τα συμπεράσματα που προέκυψαν από αυτή τη μελέτη είναι τα εξής:

- Οι μηχανικές ιδιότητες εξαρτώνται τόσο απο το μέγεθος της διατομής του σιδηροοπλισμού όσο και απο τον βαθμό διάβρωσής του.
- Ο ρυθμός μεταβολής των μηχανικών ιδιοτήτων του χάλυβα B500c κατά τη διάρκεια της επιταχυμένης διάβρωσης αλατονέφωσης δεν είναι σταθερός για κάθε διατομή. Η μεταβολή των μηχανικών ιδιοτήτων στις μεγαλύτερες διατομές είναι σχετικά ήπια σε αντίθεση με τις μικρότερες διατομές.

- Η διαφοροποίηση των μηχανικών ιδιοτήτων αντοχής και ολκιμότητας σε σχέση με το μέγεθος της διατομής και το βαθμό διάβρωσης του σιδηρού οπλισμού B500c, πρέπει να απασχολήσει την επιστημονική κοινότητα ώστε τα αποτελέσματα της παρούσης και άλλα στο μέλλον, να αποτελέσουν θέμα συζήτησης περί του σχεδιασμού των νέων κατασκευών και τον ανασχεδιασμό των υφισταμένων.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] JP. Broomfield, Corrosion of Steel in Concrete. London: E & FN Spon, 1997, p.22.
- [2] VG. Papadakis, Supplementary cementing materials in concrete – Activity, Durability and Planning. Danish Technological Institute concrete center, January 1999.
- [3] R. Capozucca, Damage to reinforcement concrete due to reinforcement corrosion, *Constr Build Mater.*, 1995, 9(5): 295-303.
- [4] MG. Alvarez, and JR. Galvele, The mechanisms of pitting of high purity iron in NaCl solutions, *Corrosion Science*, 1984, 24, p 27-48.
- [5] Glass GK, and Buenfeld NR., Chloride-induced corrosion of steel in concrete, *Prog. Struct. Eng. Material*, 2000, Vol 2 (No. 4), p 448-458
- [6] Congqi Fang, Karin Lundgren, Liuguo Chen, and Chaoying Zhu. Corrosion influence on bond in reinforced concrete, *Cem. concr. res*, 2004, 34(11),p 2159-2167
- [7] C. Apostolopoulos , D. Michalopoulos, « Effect of corrosion on mass loss, high and low cycle fatigue of reinforcing steel», *Journal of Materials Engineering and Performance*, V 15 (6), 2006, pp. 742-749.
- [8] C. Apostolopoulos, D. Michalopoulos, «The impact of chloride induced corrosion and low cycle fatigue on reinforcing steel», *Machine Building and Electrical Engineering*, ISSN 0025- 455X, Vol.5-6, 2006, p. 84-88.
- [9] C. Apostolopoulos , D. Michalopoulos, « Impact of corrosion on mass loss, fatigue and hardness of BSt500s steel», *Journal of Materials Engineering and Performance*, V 16 (1), 2007, pp. 63-67.
- [10] C. Apostolopoulos, «Mechanical Behavior of Corroded Reinforcing Steel Bars S500s tempcore under Low Cycle Fatigue», *Construction and Building Materials*, (accepted 14 July 2006), V21 November 2007, pp 1447-1456.
- [11] M.Papadopoulos, C. Apostolopoulos, N. Alexopoulos S. Pantelakis, «Effect of Salt Spray Corrosion Exposure on the Mechanical Performance of Different Technical Class Reinforcing Steel Bars», *Materials and Design*, accepted 20 July 2006, (in print).
- [12] C. Apostolopoulos, V. Papadakis, «Mechanical Behavior of Reinforcement Stirrups BSt 500, at corrosive Environment», *Journal of Materials Engineering and Performance*,(accepted 21 August 2006), V16 (2)2007, pp.236-241.
- [13] C. Apostolopoulos, D. Michalopoulos, «Mechanical properties of reinforcing steel and fatigue behaviour in corrosive environment», *Journal of Materials Engineering and Performance*, (accepted 23 August 2006), (DOI 10.1007/s11665-007-9083-6, 2007.
- [14] C.A. Apostolopoulos, M.P. Papadopoulos and Sp.G. Pantelakis, *Constr. Build. Mater.*, 2006, vol. 20, pp. 782-9.
- [15] FEMA-310, 1998, Handbook for the Seismic Evaluation of Buildings A *Prestandard*, prepared by the American Society of Civil Engineers for the Federal Emergency Management Agency, Washington, DC.
- [16] Hakuto Shigeru, Research report “Retrofitting of reinforced concrete moment Resisting Frames” supervised by Park, R and Tanaka, H. ISSN0110-3326, August 1995.