

# Διερεύνηση ορίων εφαρμογής τεχνικής Strain Gauges για μετρήσεις διάβρωσης οπλισμών σκυροδέματος

Γ. Μπατής Καθηγητής

*Ε.Μ.Π. Τμήμα Χημικών Μηχανικών, Τομέας Επιστήμης και Τεχνικής των Υλικών*

Α. Ρούτουλας Αναπληρωτής Καθηγητής

*ΤΕΙ ΠΕΙΡΑΙΑ, Τμήμα Φυσικής Χημείας και Τεχνολογίας Υλικών*

Π. Πανταζοπούλου

*Ε.Μ.Π. Τμήμα Χημικών Μηχανικών, Τομέας Επιστήμης και Τεχνικής των Υλικών*

*Λέξεις κλειδιά:* Strain Gauges, διάβρωση οπλισμού, μέτρηση ρυθμού διάβρωσης, αναστολές διάβρωσης

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ:** Η εφαρμοζόμενη τεχνική με αισθητήρια Strain Gauge, που τοποθετούνται στο εσωτερικό των δοκιμίων, βασίζεται στην καταγραφή των τάσεων διόγκωσης που εμφανίζονται στην επιφάνεια των οπλισμών που διαβρώνονται. Η εξέταση της συμπεριφοράς των δοκιμίων στην παρούσα εργασία γίνεται υπό συνθήκες ανοδικής φόρτισης 1000-2500 mV και έτσι επιτυγχάνεται γρήγορη απεικόνιση της πορείας διάβρωσης των οπλισμών. Επιπλέον, εξετάζεται ένας αριθμός εφαρμογών, που επιλέχθηκαν για να προσδιορίσουν τους παράγοντες που επηρεάζουν τη διάβρωση. Η αποτελεσματικότητα των αναστολέων διάβρωσης, η προστασία που προσφέρεται από τη χρήση ορυκτών προσθέτων, η επίδραση του χρόνου συντήρησης σκυροδέματος και η αντίσταση στη διάβρωση διαφόρων τύπων χάλυβα, μπορούν να προσδιοριστούν εύκολα και γρήγορα με την τεχνική των SG. Η συσχέτιση του ρυθμού διάβρωσης που υπολογίστηκε από την τεχνική των SG και αυτού που προέκυψε από την απώλεια μάζας οπλισμών, σε όλες τις περιπτώσεις των εφαρμογών, ήταν ικανοποιητική. Επιπρόσθετα, η μέθοδος SG χρησιμοποιήθηκε για τη μέτρηση της διόγκωσης δοκιμίων κονιάματος οπλισμένων με ενισχυμένα με ίνες πολυμερή.

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η τεχνική των SG χρησιμοποιήθηκε για να ερευνηθεί η διάβρωση των οπλισμών, που βρίσκονται τοποθετημένοι σε σκυρόδεμα, για ένα μεγάλο αριθμό διαφορετικών συνθηκών.

Κατά τη χρονική εξέλιξη της διάβρωσης παρατηρείται ο σχηματισμός προϊόντων όπως  $Fe_3O_4$ ,  $Fe_2O_3$  και  $FeO(OH)$ , τα οποία έχοντας μεγαλύτερο μοριακό όγκο από το σίδηρο δημιουργούν τάσεις διόγκωσης στην περιοχή των οπλισμών μέσα στο σκυρόδεμα. Οι αισθητήρες SG, που έχουν τοποθετηθεί στα δείγματα κονιάματος / σκυροδέματος κατά την κατασκευή καταγράφουν τις τάσεις διόγκωσης.

Η ανάπτυξη των προϊόντων διάβρωσης των οπλισμών στο σκυρόδεμα είναι ένα αργό φαινόμενο. Προκειμένου να μελετηθεί πειραματικά η διάβρωση απαιτούνται επιταχυνόμενες μέθοδοι. Μια δόκιμη μέθοδος, ιδιαίτερα σε περιβάλλον χλωριόντων, είναι η ανοδική φόρτιση, η οποία μπορεί να επιταχύνει σημαντικά την εξέλιξη της διάβρωσης. Η μέθοδος αυτή συνεργάζεται αποτελεσματικά με τη μέθοδο μέτρησης της διόγκωσης με SG (Batis & Routoulas 1999).

Καθώς η αποτελεσματικότητα της προστασίας στο σκυρόδεμα εξαρτάται από ένα μεγάλο αριθμό παραμέτρων, άμεσα συνδεδεμένων με το σκυρόδεμα, το τσιμέντο, το χάλυβα και το

διαβρωτικό περιβάλλον, η τεχνική των SG επιτρέπει τη μελέτη της επίδρασης των παραμέτρων αυτών στη διάβρωση. Επιπλέον δίνει τη δυνατότητα της μέτρησης του χρονικού διαστήματος πριν την έναρξη της διάβρωσης και όταν αυτή αρχίσει, της μέτρησης της ταχύτητάς της επιτόπου. Ακόμη μπορεί να προσδιοριστεί η προστατευτική επίδραση διαφόρων τύπων τσιμέντου και προσθήκης αναστολέων διάβρωσης (Kouloumbi και Συνεργάτες 1995).

Στην περίπτωση χρησιμοποίηση οπλισμών με ενισχυμένα με ίνες πολυμερή (FRP's) η διάβρωσή τους είναι αμελητέα, αλλά η διόγκωσή τους λόγω της αλκαλικότητας του περιβάλλοντος μπορεί να μελετηθεί με την τεχνική των SG.

## ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΠΟΥ ΜΕΛΕΤΗΘΗΚΑΝ

1. Παρουσία αναστολέων διάβρωσης
  - 1.1.  $\text{Ca}(\text{NO}_2)_2$  (SGD)
  - 1.2. Αμινοαλκοόλες (SGA)
  - 1.3. Αλκανολαμίνες (SGM)
2. Τρόποι εφαρμογής αναστολέων
  - 2.1. Ψεκασμός (SGA')
  - 2.2. Πρόσθετο στο κονίαμα (SGA)
3. Παρουσία Ορυκτών Προσθέτων στο κονίαμα
  - 3.1. Προσθήκη Φαρίνας Ηλεκτροφίλτρων (SGC)
  - 3.2. Προσθήκη Ιπτάμενης Τέφρας (SGF)
4. Παρασκευή και συντήρηση κονιάματος
  - 4.1. Χρόνος συντήρησης 7, 14, 28 ημερών (SGO, SG14O, SG28O)
  - 4.2. Έτοιμο επισκευαστικό κονίαμα με αναστολέα διάβρωσης (SGRM)
5. Τύπος δομικού χάλυβα οπλισμού (σύμφωνα με ELOT 971/94).
  - 5.1. S220 (SGO)
  - 5.2. S500s Tempcore (SGT)
  - 5.3. S500s Βαναδιούχος (SGV)
6. Διόγκωση πλαστικών οπλισμών FRP

## ΥΛΙΚΑ

Η χημική σύσταση των OPC (κανονικό τσιμέντο αναφοράς Πόρτλαντ), ΦΗΦ (φαρίνα ηλεκτροφίλτρων), ΙΤ (ιπτάμενη τέφρα) και χάλυβα, που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή των οπλισμένων δοκιμίων, φαίνονται στους πίνακες 1 και 2. Η ΦΗΦ είναι παραπροϊόν της παραγωγής τσιμέντου χαμηλών αλκαλίων και περιέχει κυρίως  $\text{CaCO}_3$  και κατατάσσεται στα ασβεστολιθικά πρόσθετα.

Το έτοιμο επισκευαστικό κονίαμα που χρησιμοποιείται περιέχει ειδική σύνθεση τσιμέντου, η οποία αποτελείται από ενισχυμένη με ίνες σκόνη και υγρή ρητίνη (διασπορά νερού με ειδικά μη τοξικά πολυμερή) και περιέχει αναστολείς διάβρωσης τύπου VCI (Volatile Corrosion Inhibitors).

Για την κατασκευή του σκυροδέματος χρησιμοποιήθηκαν πόσιμο νερό από το δίκτυο της περιοχής Αθήνας, πρότυπη άμμος (BS 4550: part 6), καθώς επίσης και αναστολείς διάβρωσης. Χρησιμοποιήθηκαν τρεις τύποι αναστολέων διάβρωσης: Ο αναστολέας – D βασίζεται στο  $\text{Ca}(\text{NO}_2)_2$  και περιγράφεται ως ανοδικός αναστολέας, ο οποίος ενεργεί στη δόμηση παθητικού στρώματος προστασίας. Ο αναστολέας – Α βασίζεται σε μερικώς εξουδετερωμένες αμινοαλκοόλες (AMA) και είναι αναστολέας προσρόφησης. Το AMA αλληλεπιδρά με το χάλυβα σχηματίζοντας

με φυσική ρόφηση επίστρωμα, το οποίο προστατεύει το ανοδικό και καθοδικό τμήμα του οπλισμού. Ο αναστολέας – Μ βασίζεται στη δράση των αλκανολαμινών, που επιδρούν με φυσική ρόφηση σχηματίζοντας προστατευτικό επίστρωμα.

Οι ενισχυμένες με σύνθετες ίνες ράβδοι οπλισμού που χρησιμοποιούνται παράγονται από πολυεστερική ρητίνη και ίνες γυαλιού, με την διαδικασία εξόλκευσης, και έχουν διατομή 10×10 mm και μήκος 100 mm.

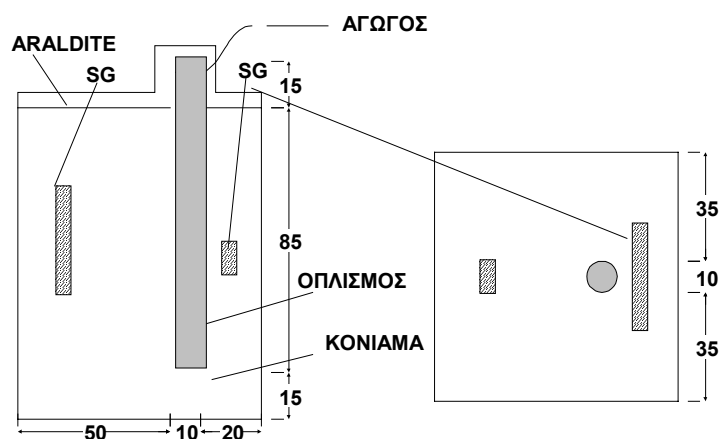
Πίνακας 1. Χημική Σύσταση Υλικών (%)

	ΟΡC	ΦΗΦ	ΙΤ
SiO <sub>2</sub>	20,67	13,68	37,02
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,99	4,36	16,80
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,18	2,30	6,61
CaO	63,60	42,59	27,21
MgO	2,73	1,23	3,24
K <sub>2</sub> O	0,37	0,79	1,25
Na <sub>2</sub> O	0,29	0,28	0,49
SO <sub>3</sub>	2,44	0,10	5,41
LOI	1,52	--	2,74
IR (ISO)	0,21	--	27,93
CaO (f)	2,41	--	7,62

Πίνακας 2. Χημική Σύσταση Χαλύβων (%)

ΕΙΔΟΣ ΧΑΛΥΒΑ	C	Mn	S	P	Si	Ni	Cr	Cu	V	Mo
S220	0,340	0,850	0,018	0,090	0,170	0,090	0,090	0,520	0,000	0,022
S500s Βαναδιούχος	0,190	1,390	0,031	0,019	0,260	0,080	0,080	0,250	0,079	0,026
S500s Tempcore	0,160	0,770	0,019	0,019	0,190	0,140	0,220	0,260	0,000	0,054

Τα δοκίμια κονιάματος είχαν πρισματική μορφή με διαστάσεις 80×80×100 mm.



Εικόνα 1. Διαστάσεις δοκιμίων με SG

Οι οπλισμοί (διαμέτρου 12 mm) που είχαν καταργασθεί σε τόρνο με τελική διάμετρο 10 mm και προετοιμασθεί σύμφωνα με το πρότυπο ISO/DIS 8407.3, τοποθετήθηκαν στο κονίαμα σε βάθος 15 mm. Συνεπώς η επιφάνεια του οπλισμού, που είναι ενεργή στη διάβρωση, είναι ίση με 27,5 cm<sup>2</sup>. Τα δοκίμια κονιάματος παρέμειναν στο θάλαμο συντήρησης (20°C, 100% υγρασία) για 24 ώρες και κατόπιν εμβαπτίστηκαν σε νερό βρύσης 20°C για 7 ημέρες. Ένας χάλκινος αγωγός συνδέθηκε σε κάθε χαλύβδινο οπλισμό και τα δοκίμια καλύφθηκαν τοπικά με εποξική κόλλα Araldite, για να προστατευθεί η σύνδεση του χάλυβα με τον χάλκινο αγωγό από την οξείδωση, όπως φαίνεται στην Εικόνα 1. Στη συνέχεια εμβαπτίστηκαν μερικώς σε διάλυμα NaCl 3,5% κ.β., 50 mm από τη βάση τους. Οι συνθέσεις των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν και οι κωδικές ονομασίες των δοκιμίων, σχετίζονται με τις παραμέτρους της διάβρωσης και δίδονται στον Πίνακα 3.

Πίνακας 3. Κατηγορίες Δοκιμίων - Σύσταση (κ.β.)

Κωδική Ονομασία	Τσιμέντο	Άμμος	Νερό	Αναστ.- A	Αναστ.- D	Αναστ.- M	Παρατηρήσεις
SGO	1	3	0.50	-	-	-	-
SGT	1	3	0.50	-	-	-	Χάλυβας Tempcore
SGV	1	3	0.50	-	-	-	Χάλυβας Βαναδιούχος
SGD	1	3	0.47	-	0.03	-	-
SGA	1	3	0.47	0.03	-	-	-
SGA'	1	3	0.50	-	-	-	Αναστολέας Ψεκασμού
SGM	1	3	0.49	-	-	0.01	-
SGRM	-	-	-	-	-	-	Έτοιμο Επισκευαστικό Κονίαμα
SGC	1	2.94	0.5	-	-	-	Προσθήκη 6% ΦΗΦ
SGF	0.85	3	0.5	-	-	-	Προσθήκη 15% IT

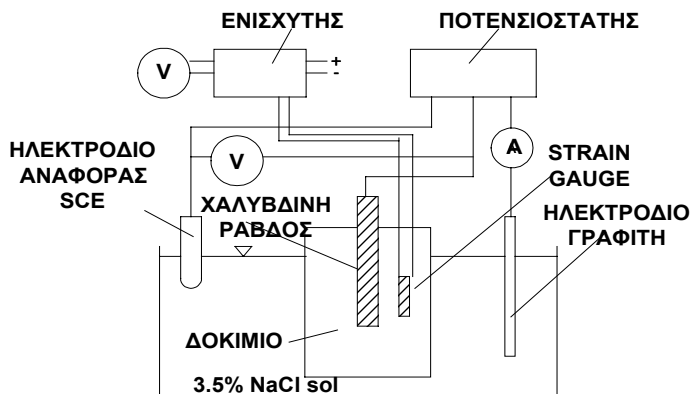
GFRP	1	3	0.50	-	-	-	Οπλισμός GFRP
GFRPL	1	3	0.50	-	-	-	Οπλισμός GFRP Εκτεθειμένος σε Ακτινοβολία
GFRP200	1	3	0.50	-	-	-	Οπλισμός GFRP Θέρμανση 200 °C
GFRP300	1	3	0.50	-	-	-	Οπλισμός GFRP Θέρμανση 300 °C

## ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Η τεχνική των SG βασίζεται στην εμφάνιση τάσεων, που προκαλούνται από τα προϊόντα διάβρωσης του χάλυβα και οι οποίες παρατηρούνται με την τοποθέτηση στα δείγματα κονιάματος επιμηκυνσιομέτρων τύπου SG. Παράγοντες που επιδρούν στη μέτρηση, όπως η συρρίκνωση του σκυροδέματος, η αλλαγή θερμοκρασίας κ.α. εξισορροπήθηκαν όπως περιγράφεται σε προηγούμενη εργασία (Routoulas & Batis 1999).

Οι αισθητήρες, που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση του ρυθμού διάβρωσης του ενισχυμένου χάλυβα, είναι SG τύπου KM-30-120 της KYOWA. Δύο SG έχουν βυθισθεί στο δοκίμιο κονιάματος κατά την κατασκευή. Η σχετική τους θέση και η απόσταση μεταξύ τους φαίνονται στην Εικόνα 1. Το ένα από αυτά (οριζόντια τοποθετημένο) χρησιμοποιήθηκε για τα αποτελέσματα των μετρήσεων της διάβρωσης και το άλλο (κάθετα τοποθετημένο) για εξισορρόπηση της θερμοκρασίας και των άλλων παραμέτρων που επηρεάζουν τη μέτρηση.

Η διάταξη του πειράματος περιλαμβάνει ποτενσιόμετρο (E.G.&G. P.A.R. Model 173) για την εφαρμογή της ανοδικής φόρτισης, κύκλωμα γέφυρας - ενισχυτή των SG και ένα κοινό πολύμετρο για τις μετρήσεις των SG, όπως φαίνεται στο σχηματικό διάγραμμα της Εικόνας 2.



Εικόνα 2. Σχηματικό διάγραμμα εργαστηριακής διάταξης ελέγχου διάβρωσης με SG

Η ανοδική φόρτιση εφαρμόζεται στο δοκίμιο με το ποτενσιόμετρο συνδεδεμένο με τον οπλισμό, με βοηθητικό ηλεκτρόδιο γραφίτη διαστάσεων 80×100×20 mm και ηλεκτρόδιο αναφοράς καλομέλανα (SCE). Το βοηθητικό ηλεκτρόδιο γραφίτη τοποθετείται απέναντι από τον οπλισμό ώστε να επιτυγχάνεται η γρηγορότερη ανταπόκριση στις μετρήσεις.

Η επιτάχυνση της διάβρωσης στα δοκίμια, που έχουν μερικώς βυθισθεί σε διάλυμα NaCl 3,5% κ.β., επιτεύχθηκε με την εφαρμογή 1000 mV σταθερού ανοδικού δυναμικού για πέντε ημέρες. Καθώς η διάβρωση δείχνει να επιβραδύνεται, εφαρμόζονται υψηλότερες τιμές σταθερού ανοδικού δυναμικού, 1500 mV και 2000 mV. Η διάρκεια του πειράματος εξαρτάται από την αντίσταση του δοκιμίου στη διάβρωση και τερματίζεται με τη ρηγμάτωση του κονιάματος που προκαλείται από τη διάβρωση του οπλισμού.

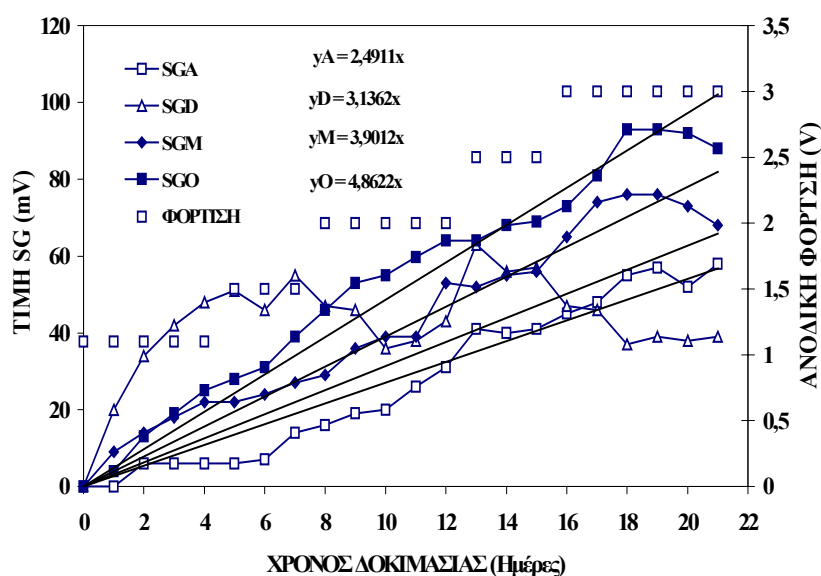
## ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΤΩΝ SG

Το δοκίμιο βυθίζεται σε διάλυμα NaCl 3,5% κ.β. και στη συνέχεια εφαρμόζεται ανοδική φόρτιση. Η τάση που εμφανίζεται σε κάθε SG μετράται και προσδιορίζονται οι αρχικές τιμές  $SGT_0$  και  $SG^*_0$  [μεταβολής του όγκου (T) και διάβρωσης (\*)]. Μετά την εφαρμογή του ανοδικού δυναμικού στα δοκίμια για δεδομένο χρόνο (t), η τάση που εμφανίζεται σε κάθε SG ( $SGT_t$ ,  $SG^*_t$ ) μετράται κατά ημερήσια διαστήματα, και απεικονίζεται ως προς χρόνο.

Η διαφορά ( $SGT_t - SG^*_t$ ) - ( $SGT_0 - SG^*_0$ ), αντιστοιχεί στην αντισταθμισμένη μέτρηση των SG, ενώ η μεταβολή του μήκους της αντίστασης των SG αντιστοιχεί στις τάσεις που αναπτύσσονται από το σχηματισμό των προϊόντων διάβρωσης στο εσωτερικό του δοκιμίου και προκύπτει από τις μετρήσεις των SG κατά τη διάρκεια του πειράματος (Colombo 1986).

## ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ

Οι τιμές τάσης των SG που λαμβάνονται με την τεχνική των SG για τα δοκίμια SGO και SGA, SGD και SGM, που περιέχουν αναστολείς διάβρωσης, παρουσιάζονται στο διάγραμμα της Εικόνας 3, σε συνάρτηση με το χρόνο.

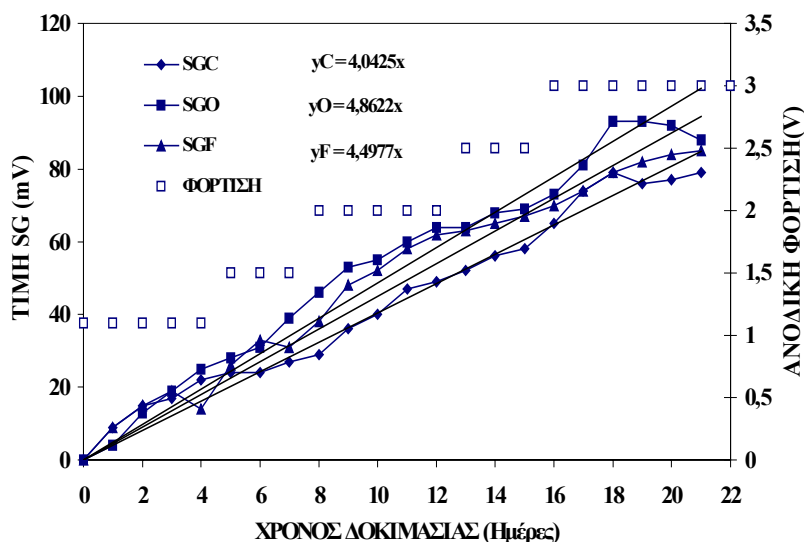


Εικόνα 3. Χρονική εξέλιξη τιμών SG για δοκίμια SGO, SGA, SGM και SGD.

Τα δοκίμια τα οποία δοκιμάστηκαν κάτω από παρόμοιες συνθήκες εφαρμοζόμενου ανοδικού δυναμικού ταξινομούνται με βάση τη διαβρωτική τους συμπεριφορά. Ο αρχικός χρόνος είναι η στιγμή της εφαρμογής του ανοδικού δυναμικού στο δοκίμιο. Σε όλες τις περιπτώσεις παρατηρήθηκε αύξηση των τιμών τάσης των SG, που σχετίζονται με τη διάβρωση. Παρατηρήθηκε επίσης μία καλή δυναμική απόκριση των τάσεων SG στις αυξήσεις του δυναμικού. Η κλίση της καμπύλης τάσεων των SG υποδεικνύει το μέσο ρυθμό διάβρωσης.

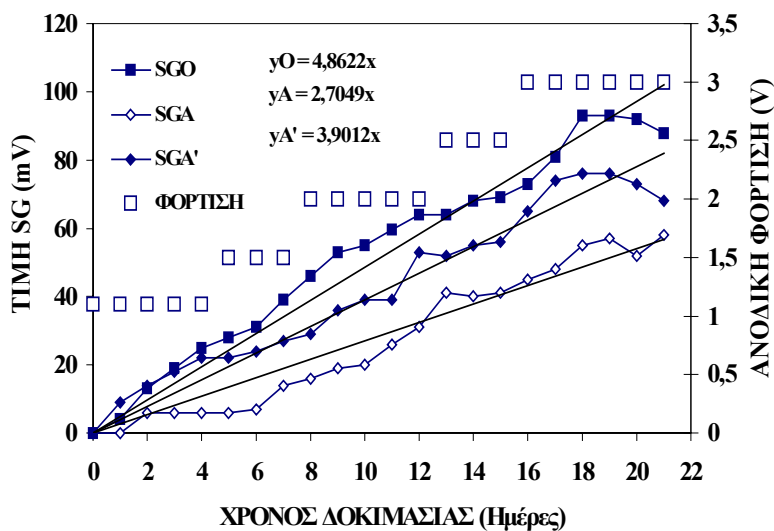
Τα δοκίμια που περιέχουν τον αναστολέα – Α παρουσιάζουν τη χαμηλότερη τάση διάβρωσης (κλίση 2.4911), συμπεριφορά η οποία κατά κάποιο τρόπο είναι καλύτερη από αυτή των δειγμάτων που περιέχουν τον αναστολέα – D (κλίση 3.1362). Τα δοκίμια που περιέχουν τον αναστολέα – Μ δείχνουν μικρότερη τάση διάβρωσης (κλίση 3.9012) από ότι το δοκίμιο αναφοράς (κλίση 4.8622) (Broomfield 1999).

Τα πειραματικά αποτελέσματα που αφορούν τα δοκίμια SGO και τα δοκίμια SGC και τα SGF, που περιέχουν πρόσθετα (φαρίνα ηλεκτροφίλτρων και ιπτάμενη τέφρα), παρουσιάζονται στο διάγραμμα της Εικόνας 4. Παρατηρείται ότι το μείγμα ιπτάμενης τέφρας δρα προστατευτικά έναντι της διάβρωσης, αλλά με μικρότερη αποτελεσματικότητα σε σύγκριση με τη φαρίνα ηλεκτροφίλτρων (Batis και Συνεργάτες 1996).



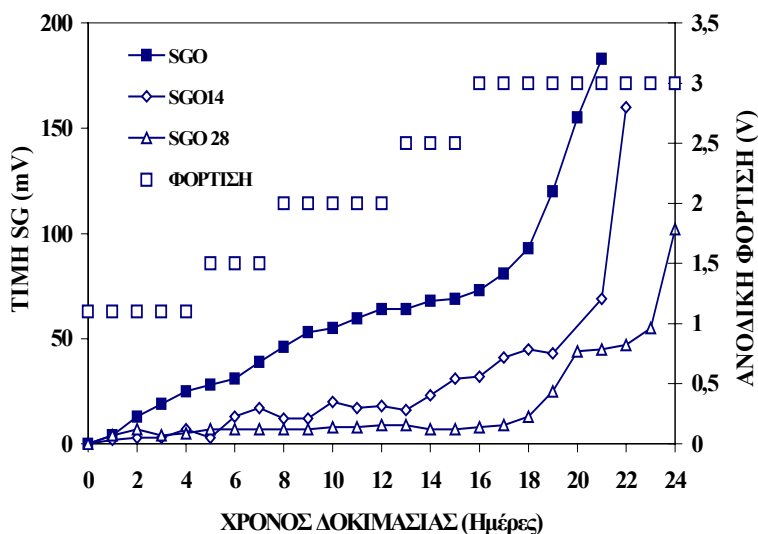
Εικόνα 4. Χρονική εξέλιξη τιμών SG για δοκίμια SGO, SGC και SGF.

Ο τρόπος της εφαρμογής των αναστολέων διάβρωσης είναι ένας σημαντικός παράγοντας προστασίας κατά της διάβρωσης. Οι αναστολείς που ψεκάζονται στην επιφάνεια του δοκιμίου δρουν μετά από κάποιο χρονικό διάστημα σε σύγκριση με τους αναστολείς που προστίθενται στη μάζα του κονιάματος κατά την κατασκευή. Τα αποτελέσματα των δοκιμίων SGA, SGA' και SGO όπως φαίνονται στο διάγραμμα της Εικόνας 5, επιβεβαιώνουν τη μικρότερη προστασία του χάλυβα στην περίπτωση ψεκασμού του αναστολέα SGA' σε σύγκριση με τον ενσωματωμένο αναστολέα SGA.



Εικόνα 5. Χρονική εξέλιξη τιμών SG για δοκίμια SGO, SGA και SGA'

Τα δοκίμια SGO, SGO14 και SGO28, που κατασκευάστηκαν με ίδιες εργαστηριακές συνθήκες αλλά με διαφορετικούς χρόνους συντήρησης, εμφανίζουν αντιστάσεις στη διάβρωση σύμφωνα με το διάγραμμα της Εικόνας 6.

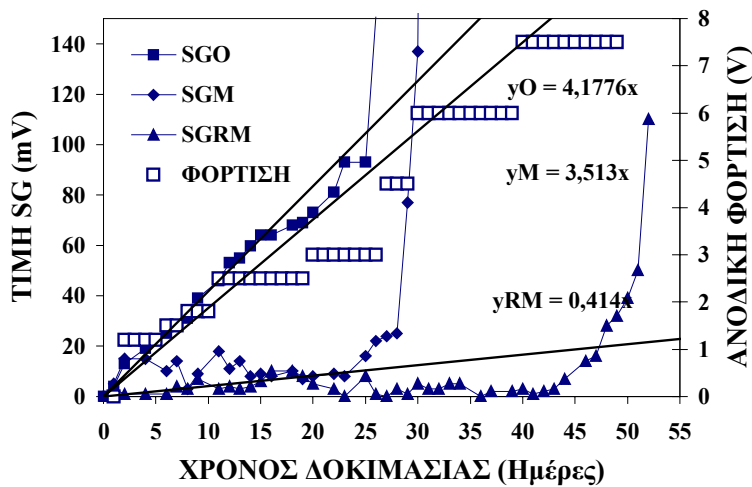


Εικόνα 6. Χρονική εξέλιξη τιμών SG για δοκίμια SGO, SGO14, SGO28

Είναι προφανές ότι τα αποτελέσματα επιβεβαιώνουν ότι ο χρόνος συντήρησης των 28 ημερών προστατεύει το χάλυβα έναντι της διάβρωσης αποτελεσματικότερα από αυτόν των 14 ημερών (Neville 1995).

Τα πειραματικά αποτελέσματα από την τεχνική των SG για τις κατηγορίες δοκιμίων SGO, SGM και SGRM παρουσιάζονται στο διάγραμμα της Εικόνας 7. Κατά την διάρκεια των πρώτων 20 ημερών εφαρμογής του ανοδικού δυναμικού, παρατηρείται ένας χαμηλός ρυθμός διαστολής του δοκιμίου SGO, ο οποίος καταλήγει σε μία ραγδαία διαστολή μετά από 25 ημέρες, εξαιτίας της ρηγμάτωσης του κονιάματος, που προκλήθηκε από τη διάβρωση του οπλισμού.

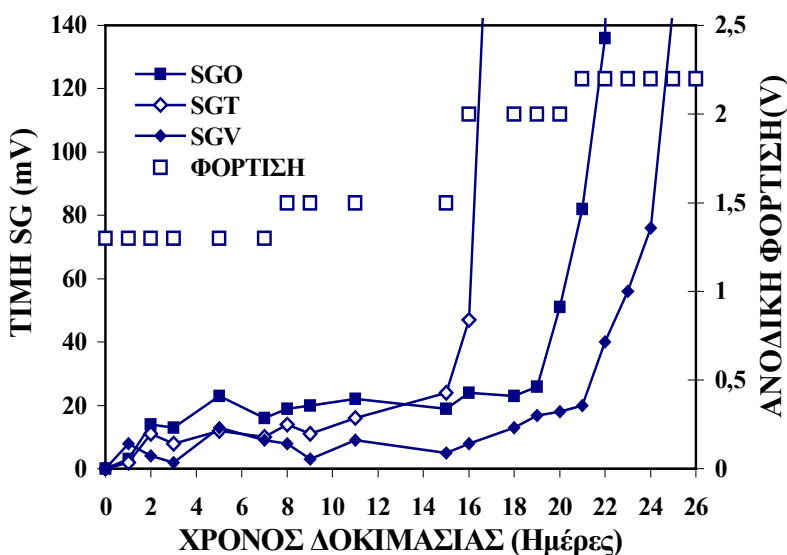




Εικόνα 7. Χρονική εξέλιξη τιμών SG για δοκίμια SGO, SGM και SGRM.

Ο χρόνος έναρξης της διάβρωσης όπως υποδεικνύεται από την αύξηση των τάσεων των SG για το δοκίμιο SGM είναι η 27<sup>η</sup> ημέρα. Παρόλα αυτά ρωγμές εντοπίστηκαν μετά από 30 ημέρες. Όσον αφορά στο δοκίμιο SGRM, η έναρξη της διάβρωσης σημειώθηκε μετά από 45 ημέρες και το δοκίμιο υπέστη ρηγματώση μετά από 50 ημέρες. Είναι φανερό ότι το ενισχυμένο με ίνες κονίαμα του δοκιμίου SGRM, που περιέχει και αναστολέα διάβρωσης, παρουσιάζει εξαιρετικά υψηλή προστασία στη διάβρωση. Το δοκίμιο SGM με την παρουσία μόνο αναστολέα διάβρωσης, παρουσιάζει αποδεκτή προστασία, υψηλότερη από το δοκίμιο αναφοράς SGO (Bjegovic 1997).

Τα δοκίμια SGO, SGT και SGV που είναι σπλισμένα με διάφορους τύπους χάλυβα και δοκιμάστηκαν με την τεχνική των SG εμφανίζουν αντιστάσεις στη διάβρωση σύμφωνα με το διάγραμμα της Εικόνας 8.

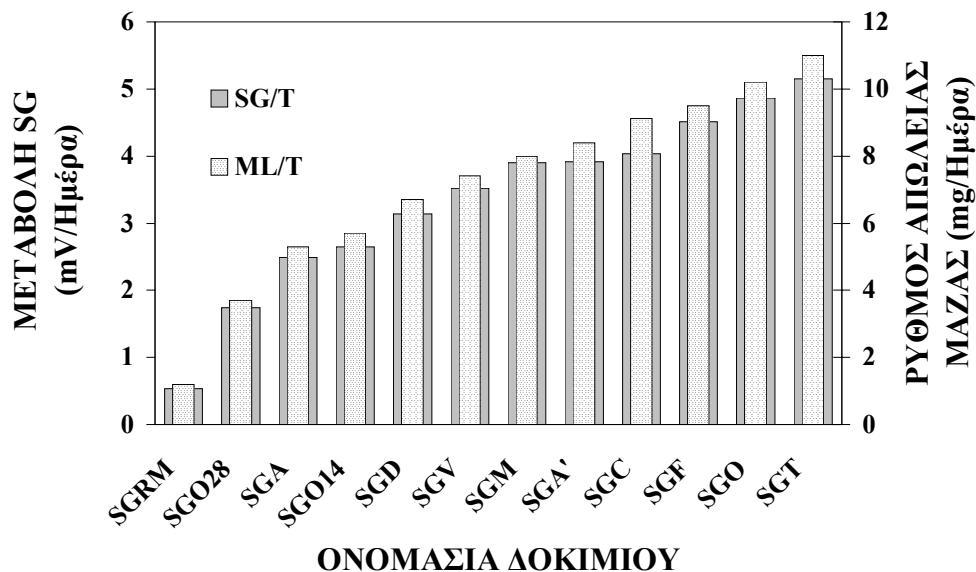


Εικόνα 8. Χρονική εξέλιξη τιμών SG για δοκίμια με σπλισμούς διαφόρων τύπων χάλυβα

Κατά την διάρκεια των πρώτων 18 ημερών εφαρμογής του ανοδικού δυναμικού, παρατηρείται ένας χαμηλός ρυθμός διαστολής του δοκιμίου SGO, ο οποίος καταλήγει σε μία ραγδαία διαστολή μετά από 22 ημέρες, εξαιτίας της ρηγματώσης του κονιάματος, που προκλήθηκε από τη διάβρωση του οπλισμού. Ο χρόνος έναρξης της διάβρωσης όπως υποδεικνύεται από την αύξηση των τιμών των SG για το δοκίμιο SGT είναι η 17<sup>η</sup> ημέρα. Παρόλα αυτά ρωγμές εντοπίστηκαν μετά από 19 ημέρες. Όσον αφορά στο δοκίμιο SGV, η έναρξη της διάβρωσης σημειώθηκε μετά από 22 ημέρες και το δοκίμιο υπέστη ρηγματώση μετά από 25 ημέρες. Η καλύτερη αντίσταση στη διάβρωση του βαναδιούχου χάλυβα S500s είναι εμφανής, σε σύγκριση με τον Tempcore και αποδίδεται στην καταλληλότερη μικρογραφική του μορφή. Ο χάλυβας S220 δείχνει καλύτερη συμπεριφορά στη διάβρωση από τον S500s Tempcore.

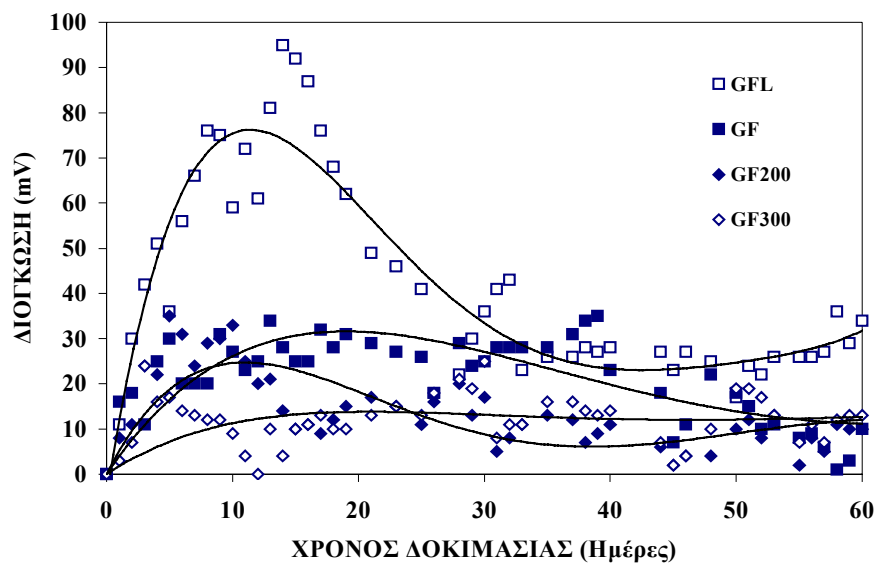
Για περαιτέρω ανάλυση των αποτελεσμάτων, διερευνήθηκε η συσχέτιση μεταξύ των μετρήσεων των SG (πριν από τη ρηγματώση) και της διάβρωσης του οπλισμού μέσω προσδιορισμού της απώλειας μάζας για κάθε δοκίμιο, όπως δείχνει και το διάγραμμα της Εικόνας 9. Οι ρυθμοί απώλειας μάζας και οι ρυθμοί ανάπτυξης τάσεων των SG συμβαδίζουν για κάθε δοκίμιο που εξετάστηκε κατά τη διάρκεια του πειράματος.

Σύμφωνα με την Εικόνα 9 αποδεικνύεται ότι η επιμήκυνση των αισθητηρίων SG σχετίζεται με τον σχηματισμό των προϊόντων διάβρωσης και συνεπώς οι μετρήσεις των SG ανταποκρίνονται στη διάβρωση του οπλισμού.



Εικόνα 9. Συσχέτιση τιμών SG – Απώλειας μάζας οπλισμών για διάφορα δοκίμια.

Τα αποτελέσματα του πειράματος με την τεχνική των SG για τις κατηγορίες των δοκιμίων GFRP εμφανίζονται στο διάγραμμα της Εικόνας 10, ως συνάρτηση του χρόνου.



Εικόνα 10. Χρονική εξέλιξη τιμών SG για δοκίμια με σπλισμούς GFRP.

Κατά τη διάρκεια των πρώτων ημερών μετά την κατασκευή των δοκιμίων, παρατηρείται ένας σχετικά υψηλός ρυθμός της ενισχυμένης διόγκωσης, η οποία καταλήγει σε μικρότερες τιμές. Αυτή η εξέλιξη της διόγκωσης εξηγείται με την είσοδο υγρού και την απορροφητική συμπεριφορά των πολυεστερικών περιβλημάτων των ράβδων. Στην αρχή ο ρυθμός απορρόφησης ήταν υψηλός και με την πάροδο του χρόνου μειώθηκε, καθώς εξισορροπήθηκε η συγκέντρωση του νερού μεταξύ της επιφάνειας και του εσωτερικού μέρους της πλαστικής μάζας.

Παρατηρήθηκε ότι η πλαστική μάζα GFL παρουσιάζει μεγαλύτερη διόγκωση σε σύγκριση με αυτή των δοκιμίων GF, GF200 και GF300. Είναι γνωστό ότι ο συντελεστής διάχυσης των ενισχυμένων με ίνες γυαλιού πλαστικών εξαρτάται από τον τύπο του πλαστικού περιβλήματος και την περιεκτικότητα αυτών σε ίνες. Υψηλή περιεκτικότητα ινών με καλή επικάλυψη πρέπει να οδηγεί σε χαμηλό συντελεστή διάχυσης. Οι ίνες γυαλιού θεωρείται ότι έχουν μηδενική διαπερατότητα στο νερό. Ο συντελεστής διάχυσης επηρεάζεται και από την ποιότητα της εξωτερικής επιφάνειας της ράβδου (Pantuso και Συνεργάτες 1999). Η μεγαλύτερη απορροφητικότητα νερού και η ενισχυμένη διόγκωση που παρατηρήθηκαν στα δοκίμια GFL μπορούν να αποδοθούν στις μικρορωγμές της επιφάνειας, που προκλήθηκαν από την ηλιακή ακτινοβολία.

Ανάμεσα στις ενισχύσεις που εκτέθηκαν σε θερμική επεξεργασία, GF200 και GF300, η σχετικά υψηλότερη διόγκωση του GF200 μπορεί να εξηγηθεί από τη μικρότερη απώλεια μάζας του πολυμερούς μετά τη θέρμανση. Η μικρότερη απώλεια μάζας του πολυμερούς, οδηγεί σε μικρότερη περιεκτικότητα ινών και συνεπώς σε μεγαλύτερο συντελεστή διάχυσης.

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Βασίζόμενοι στις μετρήσεις και τα πειραματικά αποτελέσματα που προέκυψαν από αυτή τη μελέτη, αποδεικνύεται ότι η εργαστηριακή τεχνική των SG μπορεί να εφαρμοσθεί αξιόπιστα στην παρακολούθηση της εξέλιξης της διάβρωσης των χαλύβδινων σπλισμών δοκιμίων κονιάματος / σκυροδέματος. Ακόμη μπορεί να εκτιμηθεί η διάβρωση διαφόρων τύπων δομικού χάλυβα και να

προσδιοριστεί ο βαθμός προστασίας που παρέχει η χρήση ορυκτών προσθέτων καθώς και η χρήση και ο τρόπος εφαρμογής αναστολέων διάβρωσης σε κονιάματα / σκυροδέματα. Τέλος η μέθοδος των SG μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για τον προσδιορισμό της ανθεκτικότητας των FRP's που τοποθετούνται ως οπλισμοί κονιαμάτων / σκυροδεμάτων.

## ΑΝΑΦΟΡΕΣ

Batis, G. & Routoulas, A. 1999. Steel bars corrosion investigation with strain gauges. *Cement and Concrete Composites*, Vol. 21, No 3: 163 -171.

Batis, G., Katsiamboulas, A., Meletiou, C.A. & Chaniotakis, E. 1996. Durability of reinforced concrete made with composite cement containing kiln dust". *Concrete for Environment Enhancement and Protection*. Dundee UK, Ed. R.K.Dhir and T.D.Dyer, 67-72.

Broomfield, J.P. 1999. Corrosion inhibitors for steel in concrete. *Concrete*, Vol. 33, No. 6: 44-47.

Bjegovic, D., Ukrainczyk, V., Ukrainczyk, B. & Miksic, B. 1997. Compatibility of Repair Mortar with Migrating Corrosion Inhibiting Admixtures, *National Association of Corrosion Engineers Conference*, New Orleans, paper No 183.

Colombo, G. 1986. *Automazione Industriale*, Vol.4, Dott, Giorgio Torino.

Kouloumbi, N., Batis, G. & Pantazopoulou, P. 1995. Efficiency of Natural Greek Pozzolan in Chloride Induced Corrosion of Steel Reinforcement. *Cement, Concrete and Aggregates CCAGDP*, Vol. 17, No 1: 18-25.

Neville, A. 1995. Chloride attack of reinforced concrete: an overview. *Materials and Structures*, Vol.28: 63-70.

Pantuso, A., Spadea, G. & Swamy, R. N. 1999. Study of the Shear and Elastic Characteristics of FRP Bars Subject to Moisture and Alkaline Environment. *Infrastructure Regeneration and Rehabilitation*. Ed. R.N.Swamy, Sheffield Academic Press, 567-579.

Routoulas, A. & Batis, G. 1999. Performance Evaluation of Steel Rebars Corrosion Inhibitors with Strain Gauges. *Anti-Corrosion Methods and Materials*, Vol. 46, No 4: 276-283.