

**Μελέτη επιταχυνόμενης διάβρωσης οπλισμένου  
σκυροδέματος με χάλυβα οπλισμού ανοξείδωτο χάλυβα σε  
περιβάλλον όξινης βροχής με τη χρήση ιπτάμενης τέφρας  
ως αναστολέα διάβρωσης**  
Corrosion study of stainless steel concrete reinforcement in  
acid rain simulating environment with the use of fly ash as  
corrosion inhibitor

**Σοφία ΤΣΟΥΛΗ<sup>1</sup>, Αγγελική Γ. ΛΕΚΑΤΟΥ<sup>2\*</sup>, Σπυρίδων ΚΛΕΦΤΑΚΗΣ<sup>3</sup>**

*Λέξεις κλειδιά: Οπλισμένο σκυρόδεμα, ανοξείδωτος χάλυβας, ιπτάμενη τέφρα,  
όξινη βροχή, αλατονέφωση, κυκλική πόλωση, εφελκυσμός*

*Keywords: Reinforced concrete, stainless steel, fly ash, acid rain, salt spray test,  
cyclic polarization, tensile properties*

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ:** Οι ανοξείδωτοι χάλυβες χρησιμοποιούνται ευρέως ως οπλισμός σκυροδέματος σε αποκαταστάσεις αρχαίων μνημείων, λόγω συνδυασμού καλής συμπεριφοράς σε διάβρωση και μηχανικών ιδιοτήτων. Όμως, η ραγδαία υποβάθμιση των κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα, εξαιτίας κυρίως της διάβρωσης του οπλισμού, αποτελεί σημαντικό πρόβλημα των τελευταίων δεκαετιών. Το αντικείμενο της παρούσας μελέτης είναι η αξιολόγηση της χρήσης της ιπτάμενης τέφρας (0-25 wt.%) ως αναστολέας διάβρωσης των ανοξείδωτων

---

<sup>1</sup> Υπ. διδάκτωρ, Διπλ. Πολ. Μηχανικός M.Sc., Τμήμα Μηχανικών Επιστήμης Υλικών, Πολυτεχνική Σχολή, Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων, email: [sotsouli@cc.uoi.gr](mailto:sotsouli@cc.uoi.gr)

<sup>2\*</sup> Καθηγήτρια Εφαρμοσμένης Μεταλλουργίας, Διπλ. Μηχανικός Μεταλλείων-Μεταλλουργός Μηχανικός Ph.D., Τμήμα Μηχανικών Επιστήμης Υλικών, Πολυτεχνική Σχολή, Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων, email: [alekatou@cc.uoi.gr](mailto:alekatou@cc.uoi.gr)

<sup>3</sup> Μέλος Ε.Τ.Ε.Π., Διπλ. Μηχανικός Μεταλλείων-Μεταλλουργός Μηχανικός M.Sc., Τμήμα Μηχανικών Επιστήμης Υλικών, Πολυτεχνική Σχολή, Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων, email: [skleftak@cc.uoi.gr](mailto:skleftak@cc.uoi.gr)

χαλύβων AISI 316L και AISI 304L. Η συμπεριφορά σε διάβρωση μελετήθηκε με δοκιμές κυκλικής πόλωσης χάλυβα σε περιβάλλον που προσομοιάζει σκυρόδεμα εκτεθειμένο σε όξινη βροχή, καθώς και με δοκιμή αλατονέφωσης οπλισμένου σκυροδέματος. Επίσης, πραγματοποιήθηκαν δοκιμές εφελκυσμού σε εγκιβωτισμένα δοκίμια χάλυβα προ και μετά τη δοκιμή αλατονέφωσης.

**ABSTRACT:** Stainless steels are nowadays widely used in restoration works of ancient monuments, as they combine high resistance to corrosion with good mechanical properties. Nevertheless, rapid deterioration of concrete structures due to corrosion of steel reinforcement has become a growing problem in the last decades. The objective of the present work is the assessment of the employment of fly ash (0 wt.% - 25 wt.%) as corrosion inhibitor of AISI 316L and AISI 304L stainless steels either directly immersed in solutions simulating concrete exposed to acid rain mimicking environment (cyclic potentiodynamic polarization) or embedded in standard concrete cubes (salt spray test). Furthermore, tensile testing was conducted before and after the salt spray test.

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι ανοξείδωτοι χάλυβες AISI 304L και AISI 316L βρίσκουν ευρεία εφαρμογή στη χημική βιομηχανία, σε αρχιτεκτονικές κατασκευές σε θαλάσσια και μη περιβάλλοντα, στον τομέα των τροφίμων, στην αεροναυπηγική κ.ά. (Ezuber, H.M. 2014, Wang, P. et al. 2016, Wood, R.J.K. et al. 2013). Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η χρήση του χάλυβα 316L ως οπλισμού σκυροδέματος των αρχιτεκτονικών μελών του αρχαίου θεάτρου της Δωδώνης. Αυτό οφείλεται στην υψηλή αντίσταση σε τοπικές μορφές διάβρωσης σε συνδυασμό με καλές μηχανικές ιδιότητες (Ezuber, H.M. 2014, Saidi, D. et al. 2015). Η καλή αντίσταση σε διάβρωση οφείλεται στο επιφανειακό παθητικό επίστρωμα  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ , καθώς και στη σταθεροποίηση του επιστρώματος αυτού σε χλωριούχα περιβάλλοντα λόγω των περιεχομένων Mo (κυρίως) και Ni (Biehler, J. et al. 2017, Λεκάτου, Α. 2005, Saidi, D. et al. 2015, Wood, R.J.K. et al. 2013).

Το οπλισμένο σκυρόδεμα αποτελεί σήμερα το πλέον διαδεδομένο δομικό υλικό για την κατασκευή του φέροντα οργανισμού των περισσότερων δομικών έργων. Αυτό οφείλεται, κυρίως, στο χαμηλό του κόστος και στη μεγάλη ανθεκτικότητα και διάρκεια ζωής (Blanco, G. et al. 2006). Εξαιτίας της αλκαλικότητας του περιβάλλοντος του σκυροδέματος (pH 12 - 13), αναπτύσσεται ένα λεπτό στρώμα οξειδίων του σιδήρου στην επιφάνεια των ράβδων που προστατεύει το υλικό από διάβρωση). Εντούτοις, η διάβρωση του οπλισμένου σκυροδέματος αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα των τελευταίων δεκαετιών, καθώς οδηγεί στην υποβάθμιση της συνάφειας οπλισμού/σκυροδέματος, καθώς και στη δυσανάλογη μείωση της ολκιμότητας του οπλισμού (Apostolopoulos, A. & Matikas, T.E. 2016, Batis, G. & Rakanta, E. 2005, Zacharopoulou, A. et al. 2014). Η ενανθράκωση του σκυροδέματος και η παρουσία επιθετικών ιόντων, όπως  $\text{Cl}^-$ , αποτελούν τις σημαντικότερες αιτίες διάβρωσης, καθώς οδηγούν στη μείωση του pH του σκυροδέματος και συνεπώς στην καταστροφή του προστατευτικού επιστρώματος

του οπλισμού (Apostolopoulos, A. & Matikas, T.E. 2016, Batis, G. & Rakanta, E. 2005, Sharifi-Asl, S. et al. 2015, Zacharopoulou, A. et al. 2014).

Η όξινη βροχή, επίπτωση της αλληλεπίδρασης των προϊόντων καύσης ορυκτών καυσίμων με την υγρασία της ατμόσφαιρας, οδηγεί στην υποβάθμιση της αισθητικής αξίας και της αντοχής αρχιτεκτονικών οικοδομημάτων και μνημείων πολιτιστικής κληρονομιάς λόγω της διάβρωσης του οπλισμού και της χημικής αποσάθρωσης του ασβεστολίθου, μαρμάρου, γρανίτη, ψαμμίτη κλπ. (Gerengi, H. et al. 2016, Λεκάτου, A. 2013, Li, J. et al. 2017, Rosso, F. et al. 2016). Πολλές μέθοδοι έχουν αναπτυχθεί για την προστασία του οπλισμένου σκυροδέματος από τη διάβρωση σε περιβάλλοντα αστικής και βιομηχανικής μόλυνσης, όπως οι προσθήκες αναστολέων, οι επαλείψεις με εποξειδικές ρητίνες, η καθοδική προστασία κ.ά.. Η αξιοποίηση των αστικών και βιομηχανικών αποβλήτων, όπως η ιπτάμενη τέφρα, αποτελεί μία τεχνικά εφικτή, οικονομικά συμφέρουσα και περιβαλλοντικά ορθή πρακτική για τις σύγχρονες κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα (Uysal, M. et al. 2012). Η ιπτάμενη τέφρα αποτελεί το ανόργανο ποζολανικό παραπροϊόν της καύσης στερεών καυσίμων (άνθρακας, λιγνίτης, τύρφη) στα εργοστάσια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Η προσθήκη ιπτάμενης τέφρας στο τσιμέντο επηρεάζει θετικά την ενυδάτωση και εργασιμότητα του σκυροδέματος ενώ μειώνει το πορώδες και συνεπώς τη διείσδυση  $Cl^-$  και  $CO_2$  (Chousidis, N. et al. 2015, Nath, P. et al. 2011, Uysal, M. et al. 2012). Έτσι, μπορεί να συμβάλει θετικά στην προστασία του οπλισμού από διάβρωση, στη μείωση της ρηγμάτωσης και, επομένως, στη βελτίωση της αντοχής του οπλισμένου σκυροδέματος (Chousidis, N. et al. 2015, Nath, P. et al. 2011, Uysal, M. et al. 2012).

Η παρούσα εργασία αποτελεί μέρος ευρύτερης έρευνας με στόχο τη μελέτη της επίδρασης διάφορων αναστολέων διάβρωσης στη συμπεριφορά σε διάβρωση μετάλλων αρχιτεκτονικών μνημείων. Η συγκεκριμένη μελέτη επικεντρώνεται στην επίδραση ιπτάμενης τέφρας στη διάβρωση γυμνού οπλισμού σε περιβάλλον που προσομοιάζει σκυρόδεμα εκτεθειμένο σε όξινη βροχή καθώς στη διάβρωση οπλισμένου σκυροδέματος στο περιβάλλον της αλατονέφωσης.

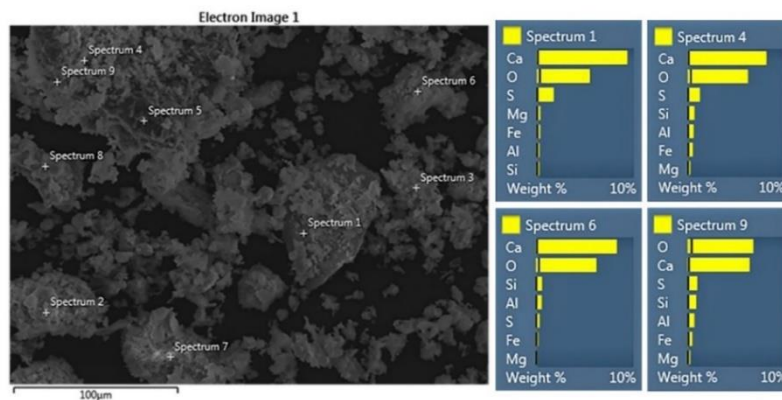
## ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Για τις ηλεκτροχημικές μετρήσεις (ASTM G61-86, 2014) χρησιμοποιήθηκαν ράβδοι οπλισμού ανοξειδωτων νευροχαλύβων 316L (ονομαστική σύσταση (wt.%): 0.022 C, 17.31 Cr, 10.08 Ni, 2.02 Mo, 0.54 Si, 1.75 Mn, 0.0032 P και 0.0001 S) και 304L (ονομαστική σύσταση (wt.%): 0.03 C, 18.00 Cr, 8.00 Ni, 1.00 Si, 2.00 Mn, 0.045 P και 0.03 S), κυκλικής διατομής διαμέτρου 6 mm και μήκους 1.5 cm. Οι ράβδοι οπλισμού παράχθηκαν με ψυχρή έλαση μετά από θερμή έλαση και αποξείδωση. Η διαμόρφωση των νευρώσεων έγινε με πίεση του μετάλλου σε ειδικές εγκοπές στο τελευταίο έλαστρο. Χρησιμοποιήθηκε ο γαλβανοστάτης Gill AC (ACM Instr.) με χρήση κελιού τριών ηλεκτροδίων (ηλεκτρόδιο αναφοράς:  $Ag/AgCl/3.5 M KCl$ , βοηθητικό ηλεκτρόδιο: Pt). Μετά την επίτευξη ισορροπίας (ανοικτό κύκλωμα, θ. δωμ., 4 h) ακολούθησε κυκλική ποτενσιοδυναμική πόλωση (ρυθμός σάρωσης 10 mV/min). Ο υπολογισμός των πυκνοτήτων των ρευμάτων

διάβρωσης ( $i_{corr}$ ) έγινε με τη μέθοδο Tafel, λαμβάνοντας υπόψη συγκεκριμένα κριτήρια (Lekatou, A. et al 2015). Μετά την απαραίτητη μεταλλογραφική προετοιμασία, μελετήθηκαν τομές διαβρωμένων δοκιμίων με Ηλεκτρονική Μικροσκοπία Σάρωσης (SEM) (Jeol JSM 6510 LV).

Ως ηλεκτρολύτης χρησιμοποιήθηκε αεριζόμενο υδατικό διάλυμα κορ.  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  παρουσία όξινης βροχής, που προσομοιάζει το περιβάλλον σκυροδέματος σε περιβάλλοντα αστικής και βιομηχανικής μόλυνσης. Η προσομοίωση δικαιολογείται από το ότι οι κρύσταλλοι  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  μπορούν να καταλάβουν περίπου το 20-25% του όγκου του τσιμέντου (Kitowski, C.J. 1997, El-Mahallawi, I.S. et al. 2007). Η χημική σύσταση του διαλύματος προσομοίωσης όξινης βροχής (pH=3.1) είναι (g/l νερού):  $\text{H}_2\text{SO}_4$ : 0.032,  $\text{HNO}_3$ : 0.015,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ : 0.0128,  $\text{NaNO}_3$ : 0.0084,  $\text{NaCl}$ : 0.0336,  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ : 0.0184 (Gerengi, H. et al. 2016). Στον ηλεκτρολύτη προστέθηκε ιπτάμενη τέφρα από τα λιγνιτωρυχεία της Δημόσιας Επιχείρησης Ηλεκτρισμού στην Πτολεμαΐδα σε ποσοστά 0 - 25 wt.% στο κορ.  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  (Σχήμα 1).

Ταυτόχρονα, δοκίμια ράβδων οπλισμού 316L και 304L εγκιβωτίστηκαν σε κύβους σκυροδέματος ( $7^3 \text{ cm}^3$ ) και τοποθετήθηκαν για 2 m στο θάλαμο αλατονέφωσης της Bosch (ASTM B117-97, 1997). Η αλατονέφωση είναι μέθοδος επιταχυνόμενης διάβρωσης, που προσομοιάζει φυσική ατμοσφαιρική διάβρωση θαλάσσιου τύπου (Fekete, E. 2005). Η αξιολόγηση της ανθεκτικότητας έγινε με οπτική παρατήρηση και δοκιμές εφελκυσμού (ASTM E8/E8M-09, 2009).

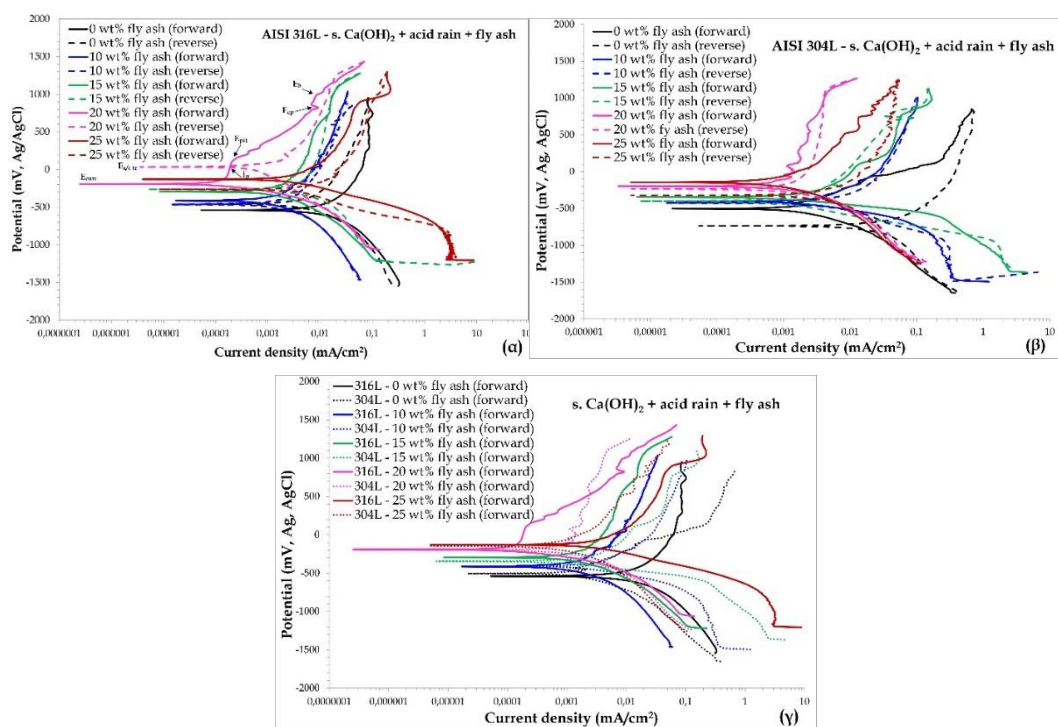


Σχήμα 1. Συσσωματώματα ιπτάμενης τέφρας και αντιπροσωπευτικές αναλύσεις EDX.

## ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ - ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΚΥΚΛΙΚΕΣ ΠΟΤΕΝΣΙΟΔΥΝΑΜΙΚΕΣ ΠΟΛΩΣΕΙΣ

Στο Σχήμα 2 παρουσιάζονται τυπικές καμπύλες κυκλικής πόλωσης των 316L και 304L σε κορ. δ.  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  παρουσία όξινης βροχής και ιπτάμενης τέφρας σε διαφορετικά ποσοστά. Η ύπαρξη αρνητικών βρόγχων υστέρησης στις καμπύλες

κυκλικής πόλωσης (δηλαδή μεγαλύτερες τιμές πυκνότητας ρεύματος κατά την ανάστροφη πόλωση συγκριτικά με τις αντίστοιχες τιμές κατά την ορθή πόλωση για τα ίδια δυναμικά) υποδηλώνουν ότι ο 316L (Σχήμα 2α) είναι επιδεικτικός σε τοπικές μορφές διάβρωσης. Εντούτοις, για όλα τα ποσοστά εκτός του 25 wt.%, τα δυναμικά μετάβασης από την ανοδική στην καθοδική πόλωση ( $E_{a/c\ tr}$ ) είναι ευγενέστερα των δυναμικών διάβρωσης ( $E_{corr}$ ), υποδεικνύοντας ευγενέστερες επιφάνειες κατά την ανάστροφη πόλωση στο  $E_{a/c\ tr}$  σε σχέση με τις επιφάνειες στο  $E_{corr}$ . Όλες οι καμπύλες ορθής ανοδικής πόλωσης του 316L παρουσιάζουν παθητικοποίηση για μεγάλα εύρη δυναμικών. Η παθητικοποίηση θεωρείται πραγματική ( $i_{corr} < 0.1 \text{ mA/cm}^2$ ). Έτσι, συνάγεται ότι ο 316L παρουσιάζει καλή αντίσταση σε τοπική διάβρωση.

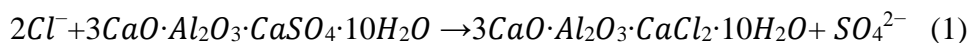


**Σχήμα 2.** Καμπύλες κυκλικής ποτενσιοδυναμικής πόλωσης (α) 316L, (β) 304L, (γ) σύγκριση 316L και 304L (κορ.  $\text{Ca(OH)}_2$  παρουσία όξινης βροχής και ιπτάμενης τέφρας).

Οι αρνητικοί βρόγχοι υστέρησης στις καμπύλες κυκλικής πόλωσης του 304L (Σχήμα 2β) επίσης υποδεικνύουν την επιδεικτικότητα του χάλυβα σε τοπική διάβρωση. Τα  $E_{a/c\ tr}$  είναι ευγενέστερα των  $E_{corr}$  στις περιπτώσεις 10 wt%, 15 wt% και 20 wt% τέφρας και αρνητικότερα στις περιπτώσεις 0 wt% και 25 wt%. Στις τελευταίες περιπτώσεις τα μεγάλα εμβαδά βρόγχων υστέρησης υποδεικνύουν σημαντική τοπική διάβρωση. Ακόμη, οι καμπύλες του 304L για όλα τα ποσοστά εκτός του 20 wt%, δεν παρουσιάζουν παθητικοποίηση, αλλά περιοχές δραστικής

μείωσης του ρυθμού αύξησης ρεύματος. Συνάγεται, λοιπόν, ότι ο 304L παρουσιάζει μικρότερη αντίσταση σε τοπική διάβρωση από τον 316 L. Παρόλα αυτά και στην περίπτωση του 304L, οι τιμές ρεύματος στις περιοχές περιορισμού του ρεύματος είναι  $< 0.1 \text{ mA/cm}^2$ .

Αναφορικά με την επίδραση του ποσοστού τέφρας στην ηλεκτροχημική συμπεριφορά των χαλύβων, τα Σχήματα 2α και 2β δείχνουν μετατόπιση των καμπύλων πόλωσης προς μικρότερα ρεύματα με αύξηση του ποσοστού τέφρας από 0 wt% - 20 wt% και για τους δύο χάλυβες, υποδεικνύοντας ότι η τέφρα μειώνει την κινητική της διάβρωσης. Ο Πίνακας 1 δείχνει ελαφρά μείωση του ρεύματος διάβρωσης με την αύξηση του ποσοστού τέφρας στον ηλεκτρολύτη και για τους δύο τύπους χαλύβων. Και στις δύο περιπτώσεις, το χαμηλότερο ρεύμα διάβρωσης μετρήθηκε στο ποσοστό τέφρας 20 wt%. Επιπλέον, το δυναμικό διάβρωσης αυξάνεται με την αύξηση του ποσοστού τέφρας, γεγονός που αποδίδεται στην αύξηση του pH του διαλύματος. Αναφορικά με τον 316 L, μόνο ο χάλυβας που αντιστοιχεί σε ποσοστό τέφρας 25 wt% παρουσιάζει αρνητικό βρόγχο υστέρησης καθ' όλη τη διάρκεια της αναστροφής ανοδικής καμπύλης, παρά τα χαμηλά παθητικά ρεύματα. Η συμπεριφορά αυτή είναι αποδίδεται στην αντίδραση μεταξύ συσσωματωμάτων ιπτάμενης τέφρας με το  $\text{Ca(OH)}_2$  (Εξίσωση 1) (Chousidis, N. et al. 2016, Kouloumbi, N. et al. 1994), που οδηγεί σε εναποθέσεις στην επιφάνεια του χάλυβα.



**Πίνακας 1.** Ηλεκτροχημικά μεγέθη για τους ανοξειδωτους χάλυβες 316L και 304L για ποσοστά τέφρας 0 wt% - 25 wt% (μέσοι όροι 4 μετρήσεων,  $\text{SDEV}(i_{\text{corr}}) < 0.001 \text{ mA/cm}^2$ ).

Fly ash (wt.%)	AISI 316L			AISI 304L		
	$E_{\text{corr}}$ (mV)	$E_{a/c \text{ tr}}$ (mV)	$i_{\text{corr}}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	$E_{\text{corr}}$ (mV)	$E_{a/c \text{ tr}}$ (mV)	$i_{\text{corr}}$ (mA/cm <sup>2</sup> )
0%	-372±17	-314±55	0.0022±0	-468±116	-494±204	0.0024±0
10%	-209±37	-186±73	0.0018±0	-491±46	-343±54	0.0019±0
15%	-302±9	-287±134	0.0017±0	-448±122	-345±109	0.0018±0
20%	-209±75	-166±48	0.0015±0	-381±181	-277±51	0.0017±0
25%	-249±95	-276±88	0.0020±0	-281±152	-295±155	0.0021±0

Κατά την εναπόθεση, δημιουργείται διάκενο μεταξύ επιφάνειας χάλυβα και απόθεσης αρκετά μικρό για μειωμένη  $\text{pO}_2$  στο διάκενο και αρκετά μεγάλο για διεύδυση του ηλεκτρολύτη. Έτσι, δημιουργούνται κελιά διαφορικού αερισμού

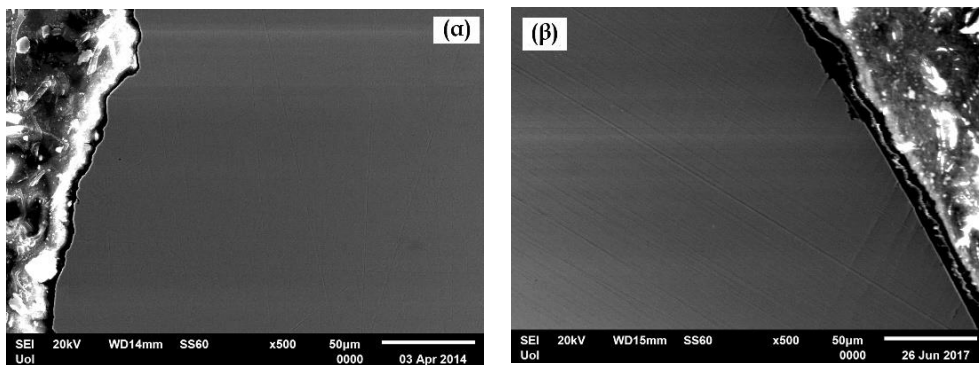
κάτω από τις αποθέσεις, που οδηγούν σε διάβρωση οπών. Τα ευκίνητα Cl<sup>-</sup> διαχέονται μέσα στις οπές, προκαλώντας αντιδράσεις υδρόλυσης (Εξίσωση 2), που μειώνουν δραστικά το pH της οπής εμποδίζοντας την αναπαθητικοποίηση των οπών (Lekatou, A. et al. 2010). Έτσι, προκύπτει αρνητικός βρόγχος υστέρησης κατά την ανάστροφη πόλωση, στην περίπτωση του 25 wt% τέφρας.



Σύγκριση της ηλεκτροχημικής συμπεριφοράς των δύο χαλύβων στο Σχήμα 2γ, δείχνει ότι στις περισσότερες περιπτώσεις, οι καμπύλες του 304L είναι μετατοπισμένες προς μεγαλύτερα ρεύματα σε σχέση με τον 316L, υποδεικνύοντας ταχύτερη κινητική. Αυτό επιβεβαιώνεται και από τους ελαφρώς μεγαλύτερους ρυθμούς γενικής διάβρωσης (Πίνακας 1). Ο 316L εμφανίζει ευγενέστερο  $E_{\text{corr}}$  από τον 304L, αποδιδόμενο στη στερεή διάλυση του Mo στο πλέγμα του ωστενίτη. Η σημαντικότερη διαφορά στην ηλεκτροχημική συμπεριφορά των δύο χαλύβων έγκειται στην καλύτερη παθητικοποίηση του 316L, όπως προαναφέρθηκε, και κατά συνέπεια στη μεγαλύτερη αντίσταση σε τοπική διάβρωση. Η τελευταία αποδίδεται στον ευεργετικό ρόλο του Mo για αρκετούς πιθανούς λόγους που αναφέρονται αναλυτικά στην εργασία των Pardo et al. (Pardo, A. 2014).

Εντούτοις, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2γ, η προσθήκη ακόμη και μόλις 10 wt% - 15 wt% ιπτάμενης τέφρας στο προσομοιωμένο του σκυροδέματος περιβάλλον του 304L μπορεί να οδηγήσει σε καλύτερη συμπεριφορά σε διάβρωση σε σχέση με τον 316L χωρίς την προσθήκη τέφρας και από κινητικής άποψης αλλά και από την άποψη της τοπικής διάβρωσης (μηδενικοί ή θετικοί βρόγχοι υστέρησης, Σχήμα 2β).

Η άψογη κατάσταση του 316L μετά από κυκλική πόλωση (0 wt% και 20 wt% ιπτάμενη τέφρα) σε μικροσκοπική κλίμακα φαίνεται στο Σχήμα 3. Τονίζεται ότι και στα δύο ποσοστά τέφρας, όλες οι εκτιθέμενες στον ηλεκτρολύτη επιφάνειες των ανοξειδωτων χαλύβων (νευρώσεις, διεπιφάνειες νευρώσεων/κυρίως όγκου χάλυβα, επιφάνειες ελεύθερες νευρώσεων) δεν παρουσίασαν ίχνη διάβρωσης σε μορφή ρωγματώσεων, εναποθέσεων και διειδύσεων στην εξέταση SEM.

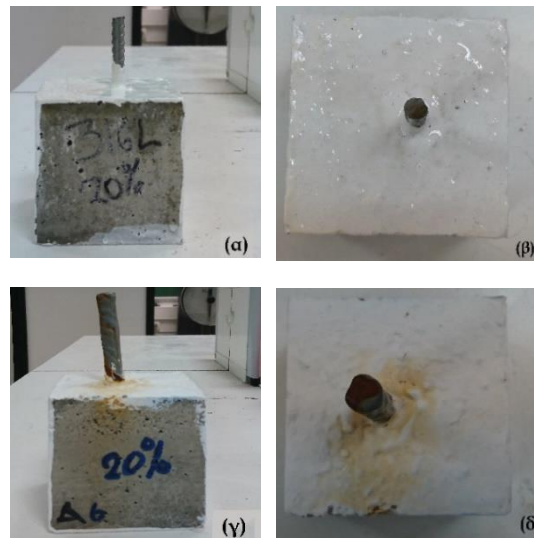


**Σχήμα 3.** Τομές δοκιμών ανοξειδωτου χάλυβα 316L μετά από κυκλική πόλωση σε κορ. Ca(OH)<sub>2</sub> παρουσία όξινης βροχής και ιπτάμενης τέφρας (α) 0 wt%, (β) 25 wt% τέφρας.

Το αποτέλεσμα αυτό συνάδει με τα ευγενέστερα δυναμικά  $E_{a/c\ tr}$  σε σχέση με το  $E_{corr}$ . Όπως προαναφέρθηκε, ο 316L-20 wt% τέφρα εμφάνισε κάποιες εναποθέσεις (οξειδία) κάτω από συσσωματώματα τέφρας. Για τον 304L, ο εντοπισμός ιχνών διάβρωσης σε μικροσκοπική κλίμακα αποτελεί αντικείμενο συνεχιζόμενης μελέτης.

#### ΑΛΑΤΟΝΕΦΩΣΗ - ΔΟΚΙΜΕΣ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ

Σύγκριση δοκιμίων σκυροδέματος που περιέχει 20 wt% ιπτάμενη τέφρα και είναι οπλισμένο με ανοξείδωτο 316L και κοινό χάλυβα S500, μετά από παραμονή στο θάλαμο αλατονέφωσης 3 μηνών (Σχήματα 4α και 4β) και 7 ημερών (Σχήματα 4γ και 4δ) αντίστοιχα, δείχνει την εμφανή ανωτερότητα του δοκιμίου 316L. Το δοκίμιο 316L δεν παρουσιάζει εμφανή ίχνη διάβρωσης ενώ το δοκίμιο S500 εμφάνισε σκουριά στην (εξωτερική) διεπιφάνεια χάλυβα/σκυροδέματος μετά από μόλις 7 ημέρες.

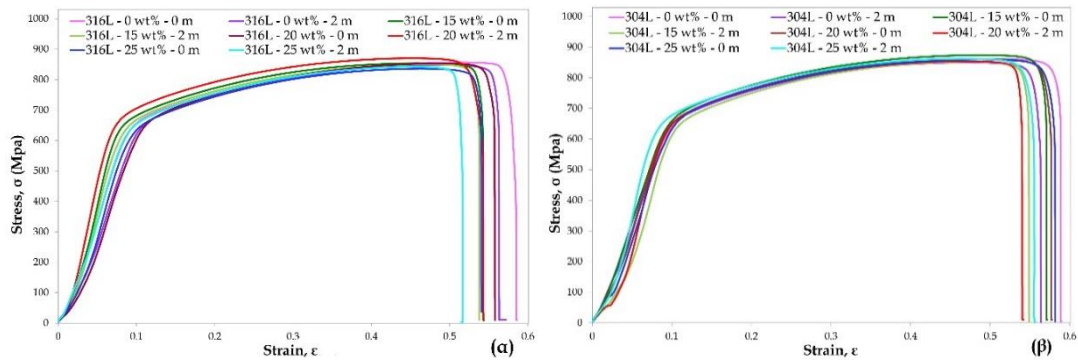


**Σχήμα 4.** Δοκίμια οπλισμένου σκυροδέματος (ποσοστό τέφρας στο σκυρόδεμα 20 wt%) μετά από παραμονή σε θάλαμο αλατονέφωσης (α) & (β) 316, 90 d και (γ) & (δ) S500, 7 d.

Στο Σχήμα 5 απεικονίζονται τα διαγράμματα τάσης-παραμόρφωσης για τους εγκιβωτισμένους χάλυβες 316L (Σχήμα 5α) και 304L (Σχήμα 5β) μετά από παραμονή στο θάλαμο αλατονέφωσης για 60 d. Φαίνεται ότι οι μηχανικές ιδιότητες των χάλυβων επηρεάστηκαν ελάχιστα από τη δοκιμή αλατονέφωσης. Στις περισσότερες περιπτώσεις, παρατηρείται μικρή μείωση της συνολικής επιμήκυνσης (% EL), η οποία, όμως, μόνο σε τρεις περιπτώσεις είναι εκτός των ορίων του πειραματικού σφάλματος (Πίνακας 2). Επίσης, η μεταβολή των εφελκυστικών μεγεθών σε σχέση με το ποσοστό τέφρας δεν είναι σημαντική, ενώ



για το όριο διαρροής ( $\sigma_y$ ), αντοχή σε εφελκυσμό ( $\sigma_t$ ) και όριο θραύσης ( $\sigma_f$ ) οι μεγαλύτερες τιμές εμφανίζονται στα ποσοστά 15 wt% - 25 wt%. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η διαφαινόμενη αύξηση του μέτρου ελαστικότητας με το ποσοστό τέφρας στο Σχήμα 5 δεν μπορεί να επαληθευθεί διότι εμπίπτει στα όρια στατιστικού σφάλματος. Ακριβέστερες μετρήσεις του μέτρου ελαστικότητας διεξάγονται με την τεχνική των υπερήχων και αποτελούν αντικείμενο προσεχούς δημοσίευσης.



**Σχήμα 5.** Καμπύλες τάσης - παραμόρφωσης δοκιμίων (α) 316L και (β) 304L εγκιβωτισμένων σε σκυρόδεμα μετά από παραμονή στο θάλαμο αλατονέφωσης για 60 d.

**Πίνακας 2.** Επίδραση δοκιμής αλατονέφωσης στις ιδιότητες εφελκυσμού ανοξειδωτων χαλύβων (316L & 304L) εγκιβωτισμένων σε κύβους σκυροδέματος με διαφορετικά ποσοστά τέφρας (μέσοι όροι).

Δοκίμιο	Ποσοστό τέφρας (wt.%)	Διάρκεια (m)	$\sigma_y$ 0.2% (MPa)	$\sigma_y$ (MPa)	$\sigma_t$ (MPa)	$\sigma_f$ (MPa)	% EL
316L	0	0	599±54	644±6	773±58	737±41	44±1
		2	593±31	653±3	759±30	772±77	39±1
	15	0	566±9	649±8	737±13	710±18	40±3
		2	589±21	655±0	772±14	741±24	40±3
	20	0	581±13	643±0	746±1	715±21	39±1
		2	605±34	662±1	786±40	754±28	41±4
304L	0	0	590±9	642±27	754±5	716±6	39±0
		2	580±56	633±9	747±50	728±50	37±1
	15	0	611±31	663±2	782±31	726±50	44±0
		2	605±50	663±23	776±58	720±57	42±1
	20	0	619±30	660±9	790±27	732±3	43±1
		2	555±44	648±10	729±52	667±24	41±2
25	0	586±15	659±25	754±16	686±20	43±1	
	2	594±19	653±8	771±18	735±4	40±2	
	25	0	592±8	664±1	753±11	669±1	42±1
		2	598±41	670±2	780±38	706±31	43±0

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

- Κυκλικές ποτενσιοδυναμικές πολώσεις των AISI 316L ράβδων οπλισμού σε κορ. διάλυμα  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  παρουσία όξινης βροχής και διαφορετικών ποσοστών ιπτάμενης τέφρας (0 wt% - 25 wt%) αποκάλυψαν παθητικοποίηση και περιορισμένη επιδεκτικότητα σε τοπική διάβρωση. Αντίστοιχες πολώσεις των AISI 316L ράβδων οπλισμού, οδήγησαν μόνο σε στάδιο περιορισμού ρεύματος (παθητικοποίηση εμφανίστηκε μόνο στο 25 wt% τέφρα) και χαμηλή αντίσταση σε τοπική διάβρωση (περιπτώσεις 0 wt% και 25 wt% τέφρα).
- Η προσθήκη ιπτάμενης οδηγεί σε μικρότερη θερμοδυναμική τάση για διάβρωση (ευγενέστερα δυναμικά διάβρωσης) και βραδύτερη κινητική διάβρωσης (χαμηλότερα ρεύματα διάβρωσης και μετατόπιση καμπύλων πόλωσης σε μικρότερα ρεύματα).
- Και στους δύο χάλυβες το ποσοστό 20 wt% ιπτάμενης τέφρας οδήγησε σε βραδύτερη κινητική της διάβρωσης συγκριτικά με τα υπόλοιπα ποσοστά (μικρότερα ρεύματα διάβρωσης, σταθερότερο παθητικό επίστρωμα).
- Και στους δύο χάλυβες το ποσοστό 25 wt% ιπτάμενης τέφρας οδήγησε σε χειρότερη συμπεριφορά στη διάβρωση συγκριτικά με το 20 wt%, το οποίο αποδίδεται στο σχηματισμό συσσωματωμάτων της ιπτάμενης τέφρας.
- Η προσθήκη ακόμη και μόλις 10 wt% - 15 wt% ιπτάμενης τέφρας στο προσομοιωμένο του σκυροδέματος περιβάλλον του 304L μπορεί να οδηγήσει σε καλύτερη συμπεριφορά σε διάβρωση σε σχέση με τον 316L χωρίς την προσθήκη τέφρας και από κινητικής άποψης αλλά και από την άποψη της τοπικής διάβρωσης.
- Η παραμονή στο θάλαμο αλατονέφωσης των εγκιβωτισμένων δοκιμίων και των δύο χάλυβων για 60 d επηρέασε ελάχιστα τις μηχανικές τους ιδιότητες.

## ΑΝΑΦΟΡΕΣ

Apostolopoulos, A. & Matikas, T.E., "Corrosion of bare and embedded in concrete steel bar - impact on mechanical behavior". Int. J. Struct. Integr., Vol. 7, No 2 (2016) 240-259

ASTM Standard Practice for Operating Salt Spray (Fog) Apparatus, ASTM International B117-97 (1997)

ASTM Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials, ASTM International E8/E8M - 09 (2009)

ASTM Standard Test Method for Conducting Cyclic Potentiodynamic Polarization Measurements for Localized Corrosion Susceptibility of Iron-, Nickel-, or Cobalt-Based Alloys, ASTM International G61-86 (2014)

Batis, G. & Rakanta, E., "Corrosion of steel reinforcement due to atmospheric pollution". Cem. Concr. Compos., Vol. 27, No 2 (2005) 269 - 275

- Biehler, J., Hoche, H. & Oechsner, M., "Corrosion properties of polished and shot-peened austenitic stainless steel 304L and 316L with and without plasma nitriding". *Surf. Coat. Technol.*, Vol. 313 (2017) 40-46
- Blanco, G., Bautista, A. & Takenouti, H., "EIS study of passivation of austenitic and duplex stainless steels reinforcements in simulated pore solutions". *Cem. Concr. Compos.*, Vol. 28, No 3 (2006) 212-219
- Chousidis, N., Rakanta, E., Ioannou, I. & Batis, G., "Mechanical properties and durability performance of reinforced concrete containing fly ash". *Constr. Build. Mater.*, Vol. 101 (2015) 810-817
- Chousidis, N., Ioannou, I., Rakanta, E., Koutsodontis, C. & Batis, G., "Effect of fly ash chemical composition on the reinforcement corrosion, thermal diffusion and strength of blended cement concretes". *Constr. Build. Mater.*, Vol. 126 (2016) 86-97
- El-Mahallawi, I.S., El Koussy, M.R., El Raghy, S.M., Megahed, G., Hashem, M., Waheed, A.F. & Abd-Ellatif, O., "Current research in Egypt on optimisation of combined mechanical strength and corrosion behaviour of steel rebar". *Int. Heat Treat. Surf. Eng.*, Vol. 1, No 3 (2007) 126-137
- Ezuber, H.M., "Influence of temperature on the pitting corrosion behavior of AISI 316L in chloride-CO<sub>2</sub> (sat.) solutions". *Mater. Des.*, Vol. 59 (2014) 339-343
- Fekete, É. & Lengyel, B., "Accelerated testing of waterborne coatings". *Prog. Org. Coat.*, Vol. 54, No. 3 (2005) 211-215
- Gerengi, H., Bereket, G. & Kurtay, M., "A morphological and electrochemical comparison of the corrosion process of aluminum alloys under simulated acid rain conditions". *J. Taiwan Inst. Chem. Eng.*, Vol. 58 (2016) 509-516
- Kitowski, C.J. & Wheat, H.G., "Effect of chlorides on reinforcing steel exposed to simulated concrete solutions". *Corros.*, Vol. 53, No 3 (1997) 216-226
- Kouloumbi, N., Batis, G. & Malami, C., "The anticorrosive effect of fly ash, slag and a Greek pozzolan in reinforced concrete". *Cem. Concr. Compos.*, Vol. 16, No 4 (1994) 253-260
- Lekatou, A., Zois, D., Karantzalis, A.E. & Grimanelis, D., "Electrochemical behaviour of cermet coatings with a bond coat on Al7075: Pseudopassivity, localized corrosion and galvanic effect considerations in a saline environment". *Corros. Sci.*, Vol. 52, No. 8 (2010) 2616-2635
- Lekatou, A., Sioulas, D., Karantzalis, A.E. & Grimanelis, D., "A comparative study on the microstructure and surface property evaluation of coatings produced from

nanostructured and conventional WC-Co powders HVOF-sprayed on Al 7075". Surf. Coat. Technol., Vol. 276 (2015) 539-556.

Λεκάτου, Α., «Βιομηχανικά Κράματα», εκδ. Παπασωτηρίου, Αθήνα (2005).

Λεκάτου, Α., «Η διάβρωση και προστασία των μετάλλων με απλά λόγια», εκδ. Νημερτής, Αθήνα (2013)

Li, J., Jia, C., Lu, Y., Tang, S. & Shim H., "Multivariate analysis of heavy metal leaching from urban soils following simulated acid rain," Microchem. J., Vol. 122 (2015) 89-95

Nath, P. & Sarker, P., "Effect of fly ash on the durability properties of high strength concrete". Proced. Eng., Vol. 14 (2011) 1149-1156

Pardo A., Merino, M.C., Coy, A.E., Viejo, F., Arrabal, R. & Matykin, E., "Pitting corrosion behaviour of austenitic stainless steels - combining effects of Mn and Mo additions", Corros. Sci., Vol. 50, No 6 (2008) 1796 -1806

Rosso, F., Jin, W., Pisello, A.L., Ferrero, M. & Ghandehari, M., "Translucent marbles for building envelope applications: Weathering effects on surface lightness and finishing when exposed to simulated acid rain". Constr. Build. Mater., Vol. 108 (2016) 146-153

Saidi, D., Zaid, B., Souami, N., Saoula, N., Siad, M., Si Ahmed, A. & Biberian, J.P., "AES depth profiles in Mo-coated 304L stainless steel achieved by RF-magnetron sputtering and influence of Mo on the corrosion in 3.5% NaCl solution". J. Alloy Compd., Vol. 645 (2015) 45-50

Sharifi-Asl, S., Mao, F., Lu, P., Kursten, B. & Macdonald, D.D., "Exploration of the effect of chloride ion concentration and temperature on pitting corrosion of carbon steel in saturated Ca(OH)<sub>2</sub> solution". Corros. Sci., Vol. 98 (2015) 708-715

Uysal, M. & Akyuncu, V., "Durability performance of concrete incorporating Class F and Class C fly ashes". Constr. Build. Mater., Vol. 34 (2012) 170-178

Wang, P., Zhang, J., Zhang, Y., Wang H., Hu, W. & Yu, D., "Preparation of high-performance ultrafine-grained AISI 304L stainless steel under high temperature and pressure". Prog. Nat. Sci. Mater., Vol. 26, No 4 (2016) 404-410

Wood, R.J.K., Walker, J.C., Harvey, T.J., Wang S. & Rajahram, S.S., "Influence of microstructure on the erosion and erosion-corrosion characteristics of 316 stainless steel". Wear, Vol. 306, No 1-2 (2013) 254-262

Zacharopoulou, A., Zacharopoulou, E. & Batis, G., "Protection systems for reinforced concrete with corrosion inhibitors". Open J. Met., Vol. 4, (2014) 86-92