



Mineral Katkılı Çimento Bulamacı Kaplanmış Betonarme Donatıların Korozyon Performansının İncelenmesi

Corrosion Performance Investigation of Reinforcement Bars Coated with Cement and Mineral Admixture Slurry

Hüseyin Yiğiter ^{1*} 

¹ Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir, TÜRKİYE
Sorumlu Yazar / Corresponding Author *: huseyin.yigiter@deu.edu.tr

Geliş Tarihi / Received: 08.01.2022

Kabul Tarihi / Accepted: 04.02.2022

Atıf şekli/ How to cite: YİĞİTER, H. (2022). Mineral Katkılı Çimento Bulamacı Kaplanmış Betonarme Donatıların Korozyon Performansının İncelenmesi. DEÜ FMD 24(72), 869-874.

Araştırma Makalesi/Research Article

DOI:10.21205/deufmd.2022247216

Öz

Günümüzde betonarme yapıların güvenli servis ömrünü belirleyen en önemli parametrelerden biri donatı korozyonu olarak değerlendirilmektedir. Bu çalışmada betonarme donatılarını korozyon etkilerine karşı koruyan alternatif bir yöntem incelenmiştir. Çalışma kapsamında geleneksel olarak üretilmiş referans betonarme numunelerin yanında, mineral katkı çimento bulamacı kaplanmış donatılarla üretilen betonarme numuneler hazırlanmıştır. Mineral katkı çimento bulamacılarında çimento miktarının kütlece %30 oranında silis dumanına ilave olarak çimento miktarının kütlece %25 ve %50 oranlarında yüksek fırın cürufu kullanılmıştır. Deney sonuçlarına göre bulamacı kaplama uygulamasının sodyum klorür çözeltisinde ıslanma kuruma etkisine maruz kalan numunelerde donatıların korozyon potansiyeli değerlerini azalttığı ve korozyon akım yoğunluğu değerlerini düşürdüğü tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Donatı Korozyonu, Mineral Katkı, Çimento Bulamacı, Islanma Kuruma Çevrimi

Abstract

Reinforcement corrosion is considered as one of the most important parameters determining the service life of reinforced concrete structures. In this study, an alternative method that protects reinforced concrete reinforcements against the effects of corrosion has been examined. Within the scope of the study, in addition to the traditionally produced reference reinforced concrete samples, reinforced concrete samples produced with mineral additive cement slurry coated reinforcements were prepared. In addition to silica fume at 30% of the cement amount by mass, blast furnace slag at 25% and 50% of the cement amount was used in mineral added cement slurries. According to the test results, it was determined that the slurry coating application decreased the corrosion potential values and the corrosion current density values of the reinforcements in the samples exposed to the wetting and drying cycles in the sodium chloride environment.

Keywords: Rebar Corrosion, Mineral Admixture, Cement Slurry, Wetting Drying Cycle

1. Giriş

Betonarme veya öngerilmeli beton yapılarda gelişen donatı korozyonu, yapının stabilitesi açısından çok önemli sonuçlar doğurur. Çelik donatı korozyon sonucu kesit ve düktilite kaybına uğrar. Oluşan reaksiyon ürünleri nedeniyle betonda meydana gelen genişleme etkisi önceleri pas payı tabakasının çatlamasına, ilerleyen aşamalarda ise tamamen dökülmesine yol açar. Bu durumda, hiç bir fiziksel ve kimyasal koruması kalmayan donatının çok daha hızlı şekilde kesit kaybetmesi, zamanla tamamen yok olması mümkündür. Gereken tamir ve bakım masraflarının büyük ekonomik kayıplara yol açması, güvenlik kayıplarının yanında bir diğer önemli konu olarak kendini göstermektedir.

Betonarme yapılarda kullanılan çelik donatılar çeşitli süreçler ve mekanizmalar sonunda korozyona maruz kalabilirler. Elektrokimyasal olaylar ile gelişen donatı korozyonu, betonarme yapının klorür ve karbonatlaşma etkilerine maruz kalması ile çok daha yıkıcı bir hal almaktadır [1].

Donatı korozyonunda etkili faktörler pas payı tabakasının kalınlığı, beton kalitesi, donatı cinsi ve yüzey özellikleri, betonda mineral katkı kullanımı, donatı aralıkları, betonun geçirgenliği, betonun nem içeriği, çevreden gelen agresif saldırıların tipi ve şiddeti, betonun kimyasal madde içeriği, eleman boyutları, kullanılan çimentonun kompozisyonu vb. olarak sıralanabilir. Bu değişkenlerin etkilerini inceleyen çalışmalar literatürde mevcuttur [2-9].

Betonarme yapılarda kullanılan beton kalitesi ve kompozisyonu donatı korozyonunun gelişiminde büyük bir rol oynamaktadır. Çimento tipinin doğru seçimi, su/çimento oranının azaltılması, çimento dozajının artırılması ve basınç dayanımı seviyesinin artırılması betonarme yapılarda korozyona karşı alınacak önlemlerin başında gelmektedir. Geçirimsizliği sağlamak amacıyla ele alınan önlemlerin yanında pas payı tabakası kalınlıklarının artırılması daha iyi fiziksel koruma sağlaması amacıyla uygulanır. Diğer yandan gerektiğinde beton karışımlarında korozyon inhibitörü katkı maddelerinin kullanımı ve yalıtım önlemleri de etkin olarak kullanılmaktadır.

Bu çalışma kapsamında, betonarme donatılarını korozyon etkilerine karşı koruyan alternatif bir

yöntem incelenmiştir. Deneysel çalışmalar kapsamında geleneksel olarak üretilmiş referans betonarme numunelerin yanında, mineral katkı çimento bulamacı ile kaplanmış donatılarla üretilen betonarme numuneler hazırlanmıştır. Numuneler sodyum klorür ortamında ıslanma-kuruma etkisine maruz bırakılmış ve zamanla gelişen donatı korozyonu elektrokimyasal ölçümler ile takip edilmiştir.

2. Materyal ve Metot

Laboratuvar çalışmaları kapsamında geleneksel bir beton karışımı hazırlanmıştır. Beton numunelerin üretiminde bağlayıcı olarak CEM I 42,5 R tipi çimento ve agregası olarak iki farklı tane dağılımına sahip kırma kireçtaşı kullanılmıştır. Beton karışımının su/çimento oranı 0,50 olup çimento dozajı 400 kg/m³tür. Taze betonun çökme değeri 10 cm olarak ölçülmüştür. Beton bileşenlerinin miktarları Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Beton bileşenleri ve miktarları

Bileşen	Miktar, kg/m ³
Çimento	400
Su	200
0-5 mm agregası	850
5-15 mm agregası	885

Deneysel çalışmalarda kullanılan çelik elemanlar 16 mm çapında betonarme donatısı olup S420 sınıfındadır. Donatıların ortalama akma dayanımı 478 MPa, çekme dayanımı 591 MPa ve kopma uzaması %22,8 olarak tespit edilmiştir.

Kontrol numuneleri geleneksel betonarme numuneler olarak hazırlanmıştır. Ayrıca deney programında çelik donatılar farklı tiplerde çimento bulamacı ile kaplanarak da örnekler hazırlanmıştır. Birinci tip bulamaçta bağlayıcı olarak çimento ve silis dumanı kullanılmış, ikinci ve üçüncü bulamaç karışımlarına çimentoya kütlece %25 ve %50 oranlarında yüksek fırın cürufu ikame edilmiştir. Mineral katkı çimento bulamaçlarında agregası olarak 3 farklı tane dağılımına sahip kuvars kullanılmış olup bulamaçların karışım oranları Tablo 2’de sunulmuştur. Bulamaç karışımlarının su/bağlayıcı madde oranı 0,23’tür. Bulamaçların kendiliğinden yayılma çapı 280 mm olacak şekilde akışkanlaştırıcı miktarları belirlenmiştir.

Kullanılan çimento ve mineral katkıların kimyasal özellikleri Tablo 3'de verilmiştir.

Tablo 2. Bulamaç karışım oranları.

Bileşen, kg/m ³	%0YFC	%25YFC	%50YFC
Çimento	900	675	450
Silis dumanı	270	202	135
Yüksek fırın cürufu	0	225	450
Su	270	254	239
Kuvars (0-0,1mm)	278	294	333
Kuvars (0-0,4mm)	252	266	302
Kuvars(0,6-1,2mm)	252	266	302
Akışkanlaştırıcı	36	34	32

Tablo 3. Bağlayıcı malzemelerin kimyasal kompozisyonu.

Kompozisyon (%)	Çimento	Silis Dumanı	Yüksek Fırın Cürufu
SiO ₂	19,07	92,26	39,62
Al ₂ O ₃	5,61	2-5	11,54
Fe ₂ O ₃	2,91	1-2,5	1,50
CaO	62,28	1-2	33,28
MgO	0,87	4-8	7,60
Na ₂ O	0,61	-	0,3
K ₂ O	0,67	-	1,02
SO ₃	2,75	-	0,55
Kızdırma kaybı	4,82	<5	2,95

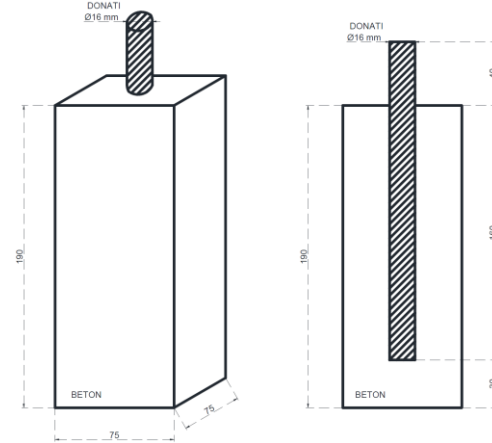
Korozyon ölçümleri 75x75x190 mm boyutlarında prizmatik numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Paspayı tabakası kalınlığı 30 mm olarak uygulanmıştır. Yalın numunelerde donatılar bir aparat yardımı ile kalıba konulmuş ve üzerine beton karışımı iki aşamada vibrasyon ile yerleştirilmiştir. Diğer numunelerde ise donatı çubukları üzerine Şekil 1'de görüldüğü gibi püskürtme yöntemi bir saat ara ile üç kat bulamaç uygulanmıştır. İşlem sonunda ortalama kaplama kalınlığı 0,75 mm olarak ölçülmüştür.

Ardından kaplanmış donatılar kullanılarak betonarme numuneler üretilmiştir.



Şekil 1. Püskürtme yöntemi ile donatılara bulamaç uygulaması.

Numunelerin şematik görünümü Şekil 2'de sunulmuştur. 24 saat sonunda kalıptan çıkarılan numunelere 7 gün standart kür uygulanmıştır. Donatıların açıkta kalan kısımlarına elektrokimyasal ölçümler için elektrik bağlantı kablosu takılmış ve açıkta kalan donatı bölümüne epoksi kaplama uygulanmıştır.



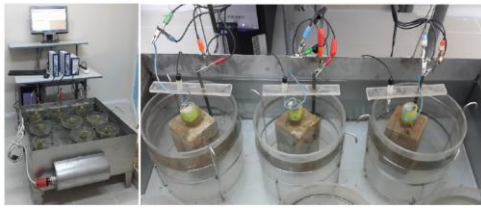
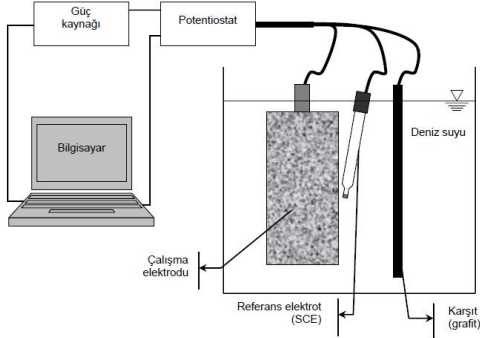
Şekil 2. Betonarme numunelerin şematik görünümü ve boy kesiti.

Korozyon süreci için numuneler hızlandırılmış korozyon kabini içinde %3,5 NaCl çözeltisinde ıslanma ve kuruma çevrimlerine maruz bırakılmıştır. Kabin içerisinde bir çevrim 120 dakika ıslanma (20° C %3,5 NaCl çözeltisi ile), 30 dakika kuruma (60° C sıcak hava ile) ve 150 dakika kuruma (20° C normal hava ile) aşamalarından oluşmaktadır. Betonarme numunelerin hızlandırılmış korozyon süreci başında, 400 çevrim ve 800 çevrim sonunda korozyon ölçümleri gerçekleştirilmiştir.

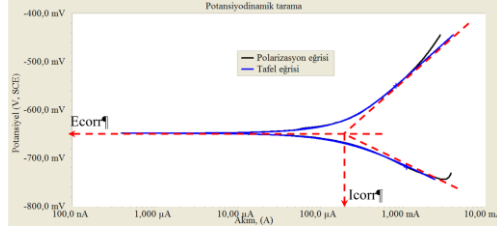
Korozyon ölçümleri Şekil 3'te verilen üç elektrotlu sistem kullanılarak

gerçekleştirilmiştir. Ölçümlerde Gamry Interface-1000 Potentiostat sistemi kullanılmıştır. Ortam sıcaklığı 20 °C'dir. Referans elektrot doygun kalomel elektrot (SCE) olup karşıt elektrot grafitir. Hızlandırılmış korozyon etkisine maruz numunelerde (%3,5 NaCl çözeltisinde ıslanma-kuruma) korozyon hızlarının tespit edilmesine yönelik ölçüm elektrolitik ortamı yine %3,5 NaCl çözeltisidir.

Öncelikle deney yapılan numunelerin açık devre potansiyelleri belirlenmiştir. İkinci aşamada numunelere doğru akım ile anodik yönde polarizasyon uygulanmıştır. Açık devre potansiyelinde ölçülen değer ± 150 mV aralığında 0,2 mV/s tarama hızı ile polarizasyon eğrileri çıkarılmıştır. Elde edilen elektrokimyasal verilerin Tafel analizleri sonucunda numunelerin, korozyon potansiyeli (E_{corr}) ve korozyon akım yoğunluğu (i_{corr}) değerleri belirlenmiştir. Elektrokimyasal veriler 6'şar adet numune üzerinden elde edilen verilerin ortalaması olarak verilmiştir. Şekil 4'de örnek bir eğri ve eğri üzerinde gerçekleştirilen ekstrapolasyon ile Tafel analizi görülmektedir.



Şekil 3. Üç elektrotlu sistem ile korozyon ölçümü.



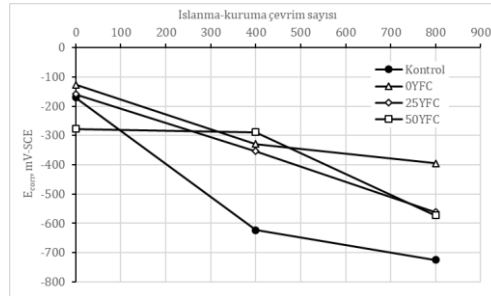
Şekil 4. Polarizasyon eğrisi ve Tafel analizi.

Ayrıca beton karışımının basınç dayanımı ile beton ve bulamaç karışımlarının ASTM C1202 standardına göre klor geçirimsizliği deneyleri gerçekleştirilmiştir.

3. Bulgular

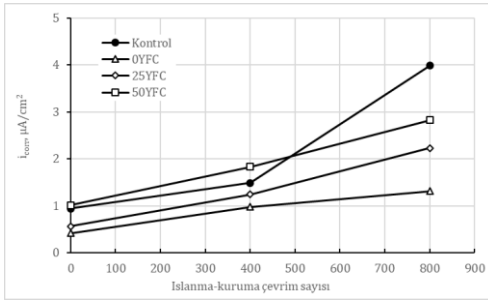
Örneklerde kullanılan betonun uygulanan kür altında 10 cm ayrıtlı küp numunelerden elde edilen 7 günlük basınç dayanımı 35,9 MPa, 28 günlük dayanımı 42,6 MPa olarak ölçülmüştür. ASTM C1202 standardına göre gerçekleştirilen ölçümlerde betonun klor geçirimsizliği 3800 coulomb, 0YFC, 25YFC ve 50YFC bulamaçlarının klor geçirimsizliği sırasıyla 1140, 600 ve 440 coulomb mertebesinde ölçülmüştür. Sobhani ve Najimi deneysel çalışmaları, silis dumanı içeren çimentolu kompozitlerin klor geçirimsizliği değerlerindeki iyileşmenin, daha düşük su/çimento kullanımından daha etkin olduğunu ortaya koymuştur [10]. Bulamaç karışımlarında yüksek fırın cürufu oranının artışı boşluk yapısının değişmesi ve elektriksel iletkenliğin azalması nedeni ile klor geçirimsizlik değerlerini oldukça düşürmüştür.

Hızlandırılmış korozyon süreci başında, 400 çevrim ve 800 çevrim sonunda gerçekleştirilen korozyon ölçümleri sonucunda elde edilen korozyon potansiyeli değerleri Şekil 5'de, korozyon akım yoğunluğu değerleri ise Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 5. Örneklerin çevrim sayılarına göre korozyon potansiyeli değerleri.

Kontrol numunelerinin korozyon potansiyeli değerleri ıslanma-kuruma çevrimleri başında 170 mV değerinde iken 800 çevrim sonunda bu değer 725 mV değerine ulaşmıştır. Sadece silis dumanı katkılı bulamaçla kaplanmış donatılarda bu değer 126 mV değerinden 395 mV değerine yükselmiştir. %25 ve %50 oranında yüksek fırın cürufu içeren bulamaç kaplı örnekler sırasıyla 159 mV değerinden 562 mV değerine ve 278 mV değerinden 573 mV değerine yükselmiştir.



Şekil 6. Örneklerin çevrim sayılarına göre korozyon akım yoğunluğu değerleri.

Benzer bir eğilim korozyon akım yoğunluğu değerlerinde de görülmüştür. Korozyon akım yoğunluğu değerleri çevrimler arttıkça kontrol numunelerinde 0,940 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ değerinden 3,983 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ değerine, yalnızca silis dumanı katkılı bulamaç kaplı numunelerde 0,419 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ değerinden 1,313 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ değerine, %25 yüksek fırın cürufu içeren bulamaç kaplı numunelerde 0,566 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ değerinden 2,229 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ değerine, %50 oranında yüksek fırın cürufu içeren numunelerde 1,013 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ değerinden 2,821 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ değerine yükselmiştir.

4. Tartışma ve Sonuç

Elektrokimyasal ölçümler ile elde edilen korozyon potansiyeli değerleri niteliksel bir değerlendirme yapmaya uygundur. ASTM C876 standardına göre -270 mV değerinden daha negatif korozyon potansiyeli değerleri %90'dan daha büyük olasılıkla aktif korozyon gelişimini ifade etmektedir [11]. Bu açıdan değerlendirildiğinde hızlandırılmış korozyon sürecinin başlangıcında deney numunelerinin tamamının pasif veya belirsiz bölgede olduğu söylenebilir. 400 ıslanma-kuruma çevriminde örnekler aktif korozyon sürecine girmiş görünmektedir. Buna rağmen bulamaç kaplı numunelerde daha düşük korozyon potansiyeli

değerleri kaplamasız donatılara göre daha yavaş bir korozyon gelişimine işaret etmektedir. Banar vd. çalışmalarında silis dumanı içeren karışımların yarı hücre potansiyeli değerlerinin etkili bir şekilde daha pozitif tarafta kaldığını [12], Jin vd. cüruf içeren çimentolu kompozitlerin klor difüzyonunun daha yavaş olduğunu tespit etmiştir[13].

Korozyon akım yoğunluğu değerlerinin sınıflandırılması ise ACI 222R-01 ve SHRP-S-330 şartnamelerinde verilmektedir [14-15]. Buna göre 0,1 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ değerinden daha düşük değerler ihmal edilebilir seviyede iken, 0,1-0,5 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ arasındaki değerler düşük, 0,5-1,0 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ arasındaki değerler orta ve 1,0 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ değerinden büyük değerler yüksek korozyon akım yoğunluğu olarak sınıflandırılmıştır.

Deneysel çalışma kapsamında kontrol numunelerinde ölçülen korozyon akım yoğunluğu değerlerinin literatürde verilen değerler ile uyumlu olduğu görülmektedir. [16-17]. İslanma kuruma çevrimlerinin başlangıcında orta hızda, ilerleyen çevrimlerde yüksek hızda korozyon gelişimi izlenmiştir.

Diğer yandan bulamaç kaplanmış donatıların korozyon akım yoğunluğu değerleri daha düşük değerler almıştır. Donatı yüzeyinde bağlayıcı malzeme açısından zengin bir karışımla oluşturulmuş bulamaç tabakasının hem fiziksel hem de kimyasal korumayı arttırdığı düşünülmektedir.

Mineral katkı olarak yalnızca silis dumanının kullanıldığı bulamacın kullanıldığı numuneler başlangıçta düşük hızda, 400 çevrimde orta hızda 800 çevrim sonunda yüksek hızda korozyon gelişimi göstermiştir. Ayrıca bu numuneler 800 çevrim sonunda kontrol numunelerine göre %67 oranında daha düşük korozyon gelişimi göstermiştir.

Yüksek fırın cürufu içeren bulamaç ile kaplanmış numuneler de kontrol karışımlarına göre daha iyi bir korozyon davranışı göstermiştir. %25 YFC kullanılan bulamaç kaplı örnekler kontrol numunelerine göre 800 ıslanma kuruma çevriminden sonra %44 oranında daha yavaş korozyon gelişimi sergilemiştir. Bu oran %50 YFC için %54 olarak gerçekleşmiştir.

Bulamaç kaplama karışımları birlikte değerlendirildiğinde ikili çimento ve silis dumanı kompozisyonunun üçlü çimento, silis dumanı ve yüksek fırın cürufu

kombinasyonlarından daha iyi korozyon önleme davranışı gösterdiği söylenebilir. Bu durumun nedeninin, ikili bulamaç kompozisyonundaki yüksek çimento içeriği ve üçlü kombinasyonlara göre nispeten daha yüksek silis dumanı içeriğinin olduğu düşünülmektedir.

Çalışmadan elde edilen verilerle, betonarme elemanlarda çelik donatının yüzeyinde mineral katkıli bir bulamaç kaplama uygulamasının başarılı bir alternatif korozyon önleme tekniği olarak kullanılabileceği sonucuna ulaşılmıştır.

Kaynakça

- [1] Baradan, B., Yazıcı, H. ve Ün, H. 2002. Betonarme Yapılarda Kalıcılık (Durabilite) (1. Baskı). İzmir: D.E.Ü. Mühendislik Fakültesi Yayınları.
- [2] Proverbio, E. & Cigna, R. 1995. Influence of rebar surface condition on polarization resistance measurements in concrete structures. *Materials Science Forum*, 192-194: 877-882.
- [3] John, D.G., Coote AT., Treadaway, K.W.J. & Dawson, J.L. 1983. Repair of concrete – A laboratory and exposure site investigation. In A.P. Crane, (Ed.). *Corrosion of reinforcement in concrete construction* (263-286). London: Halsted Press.
- [4] Maslehuddin, M., Al-Zahrani, M. M., Abdulguddus, S.U.A., Rehman, S. & Ahsan, S.N. 2002. Effect of steel manufacturing process and atmospheric corrosion on the corrosion resistance of steel bars in concrete. *Cement and Concrete Composites*, 24, 151-158.
- [5] Andrade, C., Alonso, C. & Sarria, J. 2002. Corrosion rate evolution in concrete structures exposed to the atmosphere. *Cement and Concrete Composites*, 24, 55-64.
- [6] Zivica, V. 2003. Corrosion of reinforcement induced by environment containing chloride and carbondioxide. *Bulletin of Materials Science*, 26 (6), 605-608.
- [7] Ghorbani, S. et al. 2018. Improving corrosion resistance of steel rebars in concrete with marble and granite waste dust as partial cement replacement. *Construction and Building Materials*, 185, 110-119.
- [8] Heniegal, A. M., Amin, M. and Youssef, H. 2017. Effect of silica fume and steel slag coarse aggregate on the corrosion resistance of steel bars. *Construction and Building Materials*, 155, 846-851.
- [9] Zhang, P. et al. 2017. Steel reinforcement corrosion in concrete under combined actions: The role of freeze-thaw cycles, chloride ingress, and surface impregnation. *Construction and Building Materials*, 113-121.
- [10] Sobhani, J., Najimi M. 2013. Electrochemical impedance behavior and transport properties of silica fume contained concrete. *Construction and Building Materials*, 47, 910-918.
- [11] ASTM C876-15 Standard Test method for corrosion potentials of uncoated reinforcing steel in concrete. American Society for Testing and Materials. PA- USA.
- [12] Banar, R., Dashti, P., Zolfagharnasab, A., Ramezaniapour, A.M., Ramezaniapour, A.A. 2022. A comprehensive comparison between using silica fume in the forms of water slurry or blended cement in mortar/concrete. *Journal of Building Engineering*, 46, 103802.
- [13] Jin, H., Li, Z., Zhang, W., Liu, J., Xie, R., Tang, L., Zhu, J. 2022. Iodide and chloride ions diffusivity, pore characterization and microstructures of concrete incorporating ground granulated blast furnace slag. *Journal of Materials Research and Technology*, 16, 302-321.
- [14] ACI 222R-01. 2001. Protection of Metals in Concrete Against Corrosion. Manual of Concrete Practice. American Concrete Institute.
- [15] SHRP-S-330. 1993. Condition Evaluation of Concrete Bridges Relative to Reinforcement Corrosion. Strategic Highway Research Program, National Research Council, Washington, DC-USA.
- [16] Andrade, C. & Alonso, M.C. 2004. Values of corrosion rate of steel in concrete to predict service life of concrete structures, In Gustavo Cragolino, Narasi Sridhar (Eds) *ASTM Symposium on Application of Accelerated Corrosion Tests to Service Life Prediction of Materials*, 282-295, American Society for testing and Materials. PA.
- [17] Andrade, C. & Alonso, C. 2001. On-site measurements of corrosion rate of reinforcements. *Construction and Building Materials*, 15, 141-145.