

Borlu aktif belit (bab) çimentosu ile üretilen harçlarda kısa süreli donatı korozyonu davranışının araştırılması

Emre Sancak*

16.09.2014 Geliş/Received, 14.11.2014 Kabul/Accepted

ÖZ

Bu çalışma, kapsamlı bir araştırma projesi ile borlu aktif belit çimentolu (BAB-TS 13353) harçların mekanik özellikleri ve içerisine gömülü betonarme çeliğinin korozyona karşı korunması etkinliğinin belirlenmesi amacı ile CEM I 42.5 içeren harçlarla karşılaştırılmalı olarak elde edilen ilk bulguları içermektedir. Araştırmada mekanik özelliklerin belirlenmesine yönelik 40x40x160 mm harç çubuğu numuneleri üzerinde 7. ve 28. günlük kür süreçleri sonunda basınç ve eğilme dayanımı testleri uygulanmıştır. Ayrıca ϕ 50x100 mm lik silindirik donatılı harç örnekleri üzerinde korozyon deneyleri için %5 NaCl içeren çözeltiye 60 gün maruz bırakıldıktan sonra elektrokimyasal testler uygulanmıştır. Her deney için iki seride de 5'er numune üretilmiştir. Elde edilen bulgulara göre BAB çimentolu harç örneklerinin basınç dayanımları 7. Günde 14.5 MPa iken CEM I 42.5 içerenlerde ortalama 26.8 MPa bulunmuştur. 28 günlük basınç deneyleri sonucunda BAB çimentolu harçlarda ortalama 55.2 MPa, CEM I çimentoluda ise 50.0 MPa değerleri bulunmuştur.

Elektrokimyasal testler sonucunda iki çimento türü ile üretilen betonarme çelik donatılı harç örneklerinin birbirlerine yakın sonuçlar verdikleri görülmüştür. BAB içeren harçlarda $3.06 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ korozyon akımı meydana gelirken CEM I 42.5 örneklerinde ortalama $3.87 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ olmuştur. Korozyon hızları aynı sıra ile 1,41 mpy ve 1,79 mpy olduğu görülmüştür. Rp değerleri de aynı sıra ile 1,45 kOhm ve 1,35 kOhm olarak hesaplanmıştır. 60 gün sonundaki Ecor değerleri ise sırası ile -311 ve -304 mV olarak belirlenmiştir.

Buna göre, genel olarak, 60 günlük %5 NaCl çözeltisinde korozyona maruz bırakılması sonucunda CEM I 42.5 çimentosunun çelik donatıyı korozyona karşı koruma etkinliği bakımından, BAB ile üretilen harç örneklerinden bir üstünlüğü yoktur.

Anahtar Kelimeler: BAB çimentosu, mekanik özellikler, donatı korozyonu, elektrokimyasal testler

Investigation of the short term corrosion behaviour on mortar produced with boron modified active belite cement

ABSTRACT

This study is included the initial findings of comprehensive research project on mechanical properties of mortar with boron modified active belite cement (BAB) and resistance effectivity against corrosion of steel reinforcing bar embedded BAB cement mortar. The compressive and flexural strength tests conducted to determine the mechanical properties of mortar specimens having dimension of 40x40x160 mm in the investigation. Besides, the electrochemical tests applied on the cylindrical specimens having dimension of ϕ 50x100 mm at the ending of exposed to 5% NaCl solution for 60 days. Five specimens were produced for every test on two trial groups.

* Sorumlu Yazar / Corresponding Author

Süleyman Demirel Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İnşaat Mühendisliği, Isparta - emresancak@sdu.edu.tr

According to the findings, as the mortar specimens with BAB cement have compressive strength of 14.5 MPa, those of mortar included CEM I 42.5 is 26.8 MPa in average. It found that the mean compressive strength values of mortars with BAB cement or CEM I 42.5 were 55.2 and 50.0 MPa at the age of 28 days, with respectively. At the ending of electrochemical test duration, the reinforcing steel bar embedded mortar specimens produced with two types cement exhibited similar results each other. Corrosion current of mortar specimens with BAB cement or CEM I 42.5 cement have mean values of $3.06 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ and $3.87 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, corrosion rates of those were 1,41 mpy and 1,79 mpy, polarisation resistance values were 1,45 kOhm and 1,35 kOhm, with respectively. At the ending of 60 days, Ecor mean values obtained from mortar specimens with BAB cement or CEM I 42.5 cement were -311 and -304 mV, with respectively. In general, according to the results, there was no superiority of CEM I 42.5 cement mortar from BAB cement mortar from the point of view of effectivity of resistance against rebar corrosion at the ending of exposed to 5% NaCl solution for 60 days.

Keywords: BAB cement, mechanical properties, reinforcement corrosion, electrochemical tests

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Betonun standartlara ve teknik şartnamelere uygun olarak üretildiğinde alkali doğası gereği, betonarme donatısı için yeterli koruyuculuğa sahiptir [1]. Ancak, paspayının ve beton kalitesinin kontrol dışı kalması durumu ile uygulama aşamasında sıklıkla karşılaşılmaktadır. Bu durumda korozyon oluşumuna izin vermeyecek yeterlikte sertleşmiş beton özellikleri sağlayan beton karışım tasarımları üzerinde yoğun araştırma programları devam etmektedir. Bunlardan birisi de bor katkılı çimento ile üretilen beton arayışlarıdır. Bor katkılı çimento, bir bor minerali olan Kolemanit'in borik asit üretiminde yüksek tenörlü kısmının Borik Asit üretiminde kullanılmasının ardından kalan düşük tenörlü kısmının, diğer çimento hammaddelerine (farin) ilâve olarak belirli bir miktarda kullanılması ile üretilmiştir. Endüstriyel ölçekte ilk deneme üretimi Denizli Çimento ve Isparta GÖLTAŞ Çimento Fabrikalarında ETİ MADEN İşletmeleri işbirliği ile gerçekleştirilmiştir.

Kolemanitin çimento hammaddesi olan kireç taşının yerine kullanılması ile prekalsinasyon işleminde enerji tasarrufu ve klinker pişirme sıcaklığı da 1450°C 'tan 1325°C 'lara düştüğünden, büyük oranda enerji tasarrufu (yaklaşık %10) ve CO_2 emisyonunda % 25'lere varan azalma sağlanmıştır. Faz diyagramına göre Boroksit sadece C_2S içinde çözünmektedir. Buna karşın C_3S 'in oluşumunu engellemektedir. Bu doğrultuda bu durumdan faydalanmak amacıyla ülkemizde bor oksit (B_2O_3) kullanarak yapılan laboratuvar ve endüstriyel ölçeklerde çimento üretimlerinde C_3S yerine oluşan C_2S fazının hızlı soğutulması ($>800 \text{ C}/\text{dak.}$) ile daha kararlı ve aktif olan μ ve/veya μ' - C_2S polimorfunun oluştuğu gözlenmiştir. Bu nedenle çimentonun klinkerleşme sıcaklığı 1450°C yerine daha düşük sıcaklıkta oluşan C_2S 'in oluşma sıcaklığında 1325°C 'ye kadar inilebilmektedir. Bu çimento "Borlu Aktif Belit (BAB) Çimentosu" olarak adlandırılmaktadır [2]

Ustabaş [3] çalışmasında kolemanit ve üleksitin çimentoda kullanılabilirliğini araştırmış, öğütülmüş kolemanit ve üleksit, çimento kütesinin %0,5, %1, %2, %3, %4 ve %5 oranlarında CEM I 42,5 R sınıfı çimento ile ikame etmiştir. Çalışmanın diğer safhasında ise klinker 1300°C 'de kolemanit ve üleksit ile karıştırılarak pişirilmiş ve soğuduktan sonra öğütülerek yeni çimentolar üretmiştir. TS EN 196-1'e göre üretilen borlu çimentolu harç numunelerin basınç ve eğilme dayanımlarına göre kolemanit ve üleksit kullanımının çimento özelliklerini geliştirmediğini açıklamıştır.

Yalçın [4] yaptığı çalışmada betonarme demirlerinin korozyonunu önlemek amacıyla beton karışımı içine değişik oranlarda kolemanit ($2\text{CaO}.3\text{B}_2\text{O}_3.6\text{H}_2\text{O}$) ilave etmiştir. Deneyler sonunda %0.5 den daha az kolemanit katkısının betonarme demirlerinin korozyonu üzerine inhibitif etki göstermediği, %2.0 dan daha fazla kolemanit katkısının ise, çimentonun fiziksel özellikleri üzerine bozucu etki yaptığı, en uygun kolemanit katkısının %1.0 olduğu belirtilmiştir.

Ergi vd [5] yaptıkları çalışmada, bazı endüstriyel atıkların, Çinko-Bakır fabrikasından alınan cüruf, Ece Seramikten alınan alçı atığı, uçucu kül ve boraks şlamı belli oranlarda Yibitaş Lafarge-Çorum Çimento Fabrikasının ürettiği PÇ 42,5 CEM II/A çimentosuna ilave ederek katkılı çimento ile ürettiği harçların betonarme demirlerinin korozyonuna etkisini araştırmak için 60 gün süreyle korozyon potansiyellerini ölçmüşlerdir. Sonuç olarak, denedikleri alçı atığı, uçucu kül ve boraks şlamı gibi endüstri atıklarından %5 Alçı atığı-%5 boraks şlamı içeren KPÇBE2 kodlu çimento ile KPÇBE3 kodlu %9 Alçı atığı ve %1 boraks şlamı içeren katkılı çimentoların, betonarme demirinin korozyonunun önlenmesinde önemli bir katkı sağladığını açıklamışlardır.

Zeybek [6], yaptığı araştırmada zengin kolemanit yataklarının yer aldığı ve kolemanit zenginleştirme

işlemlerinin yapıldığı Kütahya-Emet-Espey'de bulunan konsantratörün, 25 mm. elekaltı atığı ile atık göletinden alınan numunelerin, çimento endüstrisine bir katkı maddesi olarak değerlendirilmesini araştırmıştır. Bu atıkların Portland ve Traslı Çimentolar için bir katkı maddesi olabileceğini belirtmiştir.

Erdoğan [7] kolemanit konsantratör atığının belli bir oranı aşması durumunda mekanik özelliklere katkı sağlamadığı hatta TS değerlerinin altına düşürdüğü tespit etmiştir. Fakat bu olumsuzluğuna rağmen kolemanit konsantratörü atığı ilavesiyle oluşan çimento harçlarının Alkali silika reaksiyonuna, sülfatlı ortama ve asitli ortama direnci artırmada katkı sağladığını belirtmiştir.

2. MATERYAL VE YÖNTEM (MATERIAL AND METHOD)

2.1. Materyal (Material)

2.1.1. Referans çimento (Reference cement)

Çalışmada, Isparta Göltaş çimento fabrikasından temin edilen CEM I 42.5 R çimentosu referans çimento olarak kullanılmış olup, fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.

2.1.2. Borlu aktif belit (BAB) çimentosu (Boron modified active belite cement)

Çalışmada, referans harç örneklerinin üretimi için CEM I 42.5 R çimentosu, deneme örneklerinin üretimi için % 2.5 B₂O₃ içeren BAB (TSE 13353 [9]) çimentosu kullanılmıştır. BAB çimentosunun kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri Tablo 1' de verilmiştir.

Tablo 1. Referans çimento ve BAB çimentosunun kimyasal, fiziksel özellikleri (The chemical and physical properties reference cement and BAB cement)

Kimyasal Bileşenler (%)	Referans Çimento	BAB Çimentosu
SiO ₂	21.672	21.163
Al ₂ O ₃	4.612	5.805
Fe ₂ O ₃	3.674	3.875
CaO	65.998	63.225
MgO	1.289	3.383
SO ₃	1.155	1.087
B ₂ O ₃ (%)	---	3.00
Serbest CaO	0.528	0.983
C ₃ S	62.289	44.910
C ₂ S	15.143	26.793
C ₃ A	6.006	8.826
C ₄ AF	11.179	11.793
Kızdırma Kaybı	2.72	3.82
Cl ⁻	0.066	0.001

Davraz [8] göre taze harçlardaki B₂O₃/çimento oranı artarken, pH-Elektriksel iletkenliği(EC)-taze harç sıcaklığı (T) değerleri azalmıştır. Bununla birlikte BAB örneklerinin B₂O₃/çimento oranı yaklaşık % 1.20 iken kontrol örneklerinin değerlerine çok yakın değer sergilemiştir. Ayrıca çimento pastasının hidrasyon ısısındaki önemli miktardaki düşmeden dolayı mikroçatlak oluşumunun azaldığını açıklamıştır.

Bu çalışmada, (GÖLTAŞ Çimento tarafından % 9 kolemanit kullanılarak elde edilen %2.5 B₂O₃ içeren) BAB çimentosu ile üretilen betonarme çeliği donatılı harç örneklerinin, CEM I 42.5 çimento ile üretilen donatılı harçlarla karşılaştırmalı olarak korozyona karşı donatıyı koruma etkinliğini araştırılmıştır.

Tablo 1. Referans çimento ve BAB çimentosunun kimyasal, fiziksel özellikleri (The chemical and physical properties reference cement and BAB cement) (devam-continiu)

Fiziksel Özellikler	Referans Çimento	BAB Çimentosu	
200 µ elek üstü	1.84	1.8	
90 µ elek üstü kalan	0.3	0.1	
Özgül Ağırlık (gr/cm ³)	3,11	3.09	
Özgül Yüzey (Blaine, cm ² /gr)	3265	3562	
Priz başlama süresi (dakika)	155	145	
Priz bitiş süresi(dakika)	190	180	
Hacim genleşmesi (mm)	0.5	1	
Basınç dayanımı (N/mm ²)	2 Gün	26,8	14.5
	7 Gün	40.6	34.6
	28 Gün	50.0	55.2

2.1.3. Standart CEN referans kumu (Standard CEN reference sand)

Harç çubuklarının ve korozyon numunelerin üretiminde %98 silisyum dioksit miktarı içeren standart CEN kumu referans kum olarak kullanılmıştır. CEN referans kumunun tane dağılımı Tablo 2' de verilmiştir.

Tablo 2. Standart CEN kumunun tane dağılımı (TS EN 196-1 [10]) (Standard CEN reference sand grain gradation)

Kare göz açıklığı (mm)	Yığılımlı elekte kalan (%)	Tolerans (±)
2	0	0
1.6	7	5
1	33	5
0.5	67	5
0.16	87	5
0.08	99	1

2.1.4. Karışım suyu (Mixing water)

Çalışmada, TSE EN 196-1 [10] standardında belirtilen içme suyu niteliklerine sahip Isparta Süleyman Demirel Üniversitesi Kampüsü şebeke suyu karışım suyu olarak kullanılmıştır.

2.1.5. Betonarme çeliği (Reinforcement bar)

Çalışmada korozyon numuneleri üretiminde beton donatısı olarak kullanılacak niteliklere sahip TSE 708 [11]'e uygun Ø10 çapında düz transmisyon betonarme çeliği kullanılmıştır. Betonarme çeliğinin özellikleri Tablo 3' de verilmiştir.

Tablo 3. Betonarme çeliğinin özellikleri (Reinforcement bar properties)

	C (%)	Si (%)	Mn (%)	P (max) (%)	S (max) (%)
St 37	≤0.17	0.21	0.50	0.05	0.05

2.1.6. Referans elektrot (Reference electrode)

Çalışmada korozyon ölçümlerinde referans elektrot olarak Şekil 1'de gösterilen doymuş kalomel elektrot (SCE) kullanılmıştır.



Şekil 1. Referans elektrot (Reference electrode)

2.1.7. Karşıt elektrot (Counter electrode)

Çalışmada korozyon ölçümlerinde karşıt elektrot olarak 2.0 cm² yüzey alanına sahip Şekil 2.'de verilen karşıt elektrot kullanılmıştır.



Şekil 2. Karşıt elektrot (Counter electrode)

2.1.8. Çözelti (Solution)

Korozyon için üretilen harç numunelerini korozyon ortamına maruz bırakmak için %5'lik NaCl çözeltisinden oluşan agresif ortam hazırlanmıştır (Şekil 3).



Şekil 3. NaCl çözeltisi (NaCl solution)

2.2. Yöntem (Method)

2.2.1. Harç prizma ve donatılı silindirik korozyon numunelerinin üretilmesi (The production of mortar prism and cylindrical specimens with reinforcing bar)

Dayanımlarına bakılmak üzere 6 adet (3'ü 7 günlük, 3'ü 28 günlük) CEM I, 6 adet de (3'ü 7 günlük, 3'ü 28 günlük) BAB içerecek şekilde 40x40x160mm'lik prizma kalıplarda harç çubuğu numuneleri TS EN 196-1'e [10] uygun olarak toplam 12 adet üretildi (Şekil 4).



Şekil 4. Harç numuneleri (Mortar specimens)

Üretilen numuneler 7-28 gün boyunca kür ortamında bekletilmişlerdir. Korozyon ortamına maruz bırakılmak üzere 5 adet CEM I bağlayıcılı, 5 adet de BAB bağlayıcılı olmak üzere toplamda φ10/5'lik silindirik kalıplara 10 adet numune üretimi gerçekleştirilmiştir (Şekil 5). Üretilen numuneler prizlerini aldıktan sonra kalıplarından sökülerek 14 gün boyunca kürde bekletilmişler ve 14 günün ardından %5'lik NaCl ortamına maruz bırakılmışlardır.



Şekil 5. Silindirik örnekler (Cylindrical specimen)

2.2.2. Eğilmede çekme ve basınç mukavemetlerinin belirlenmesi (The determination of flexural and compressive strength)

7 ve 28 gün kür ortamında bekletilen CEM I ve BAB çimentolu harç çubuğu örnekleri TS EN 196-1' [10] uygun olarak eğilme de çekme ve basınç mukavemeti deneylerine tabi tutulmuş ve Denklem 1 ve 2 yardımıyla hesaplanmıştır (Şekil 6 ve Şekil 7).

$$R_f = 1,5 \left(\frac{F_f l}{b^3} \right) \quad (1)$$



Şekil 6. Eğilmede çekme dayanımı deneyi (Flexural strength test)



Şekil 7. Basınç dayanımı deneyi (Compressive strength test)

$$R_c = F_c / b^2 \quad (2)$$

Burada,

R_c : Basınç dayanım mukavemeti, (N/mm²)

F_c : Kırılmadaki en büyük mukavemet, (N)

b : basınç plakasının kenar uzunluğu, (40 mm)

2.2.3. Tafel ekstrapolasyon yöntemiyle korozyon ölçümü (The corrosion measurement by means of Tafel extrapolation method)

Korozyon ortamına maruz bırakılan CEM I ve BAB çimentolu harç çubuğu örnekleri üzerinde 60 gün boyunca Tafel ekstrapolasyon ölçümleri yapılmıştır. Tafel ölçümlerinde numunelerin korozyon hızı, E_{cor} , korozyon potansiyeli, I_{cor} , korozyon akımı ve açık devre potansiyel parametreleri belirlenmiştir. I_{cor} korozyon akımı Denklem 3 yardımıyla hesaplanmıştır [12].

$$\dot{I} = i_{kor} \{ \exp[2.303(E - E_{kor})] - \exp[2.303(E - E_{kor})] \} \quad (3)$$

Burada, \dot{I} : Ölçülen hücre akımı, (amper), \dot{I}_{cor} : Korozyon akımı, korozyon hızının bir ölçüsü, (amper), E_{cor} : Korozyon potansiyeli, (volt), E : Elektroda uygulanan gerilim, (volt), β_a , β_c : Anodik ve katodik tafel katsayılarıdır.

2.2.4. Lineer polarizasyon yöntemiyle korozyon ölçümü (The corrosion measurements by means of Linear polarization)

Korozyon ortamına maruz bırakılan CEM I ve BAB çimentolu harç çubuğu örnekleri üzerinde 60 gün boyunca Lineer polarizasyon ölçümleri yapılmıştır. Lineer ölçümlerinde numunelerin korozyon hızı, R_p (polarizasyon direnci), E_{cor} (korozyon potansiyeli), I_{cor} (korozyon akımı) ve açık devre potansiyel parametreleri belirlenmiştir. I_{cor} korozyon akımı Stern ve Gary tarafından geliştirilen Denklem 4 yardımıyla hesaplanmıştır.

$$I_{cor} = \frac{\beta_a \beta_c}{2,3 R_p (\beta_a + \beta_c)} \quad (4)$$

Burada β_a ve β_c anodik ve katodik Tafel sabitleridir ve deneysel olarak tayin edilebilir. Bu bağıntıda R_p dışında bulunan terimler sabittir ve bunlar toplu olarak (B) ile gösterilebilir. Bu durumda korozyon hızı,

$$I_{cor} = \frac{B}{R_p} (\mu A/cm^2) \quad (5)$$

Burada birimsel olarak $\beta_a = \beta_c = V$, $R_p = \text{Kohm}$ 'dur [12].

3. DENEYSEL BULGULAR (EXPERIMENTAL FINDINGS)

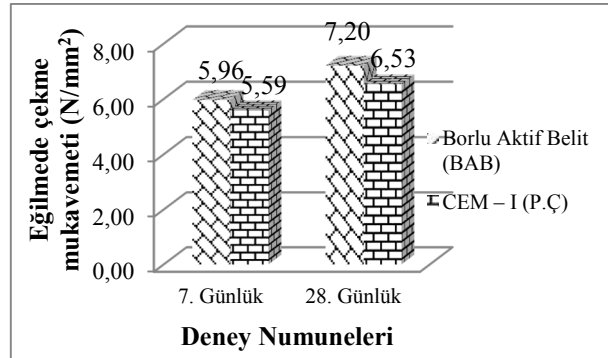
Bu çalışmada CEM I ve BAB çimentoları kullanılarak TS EN 196-1'ya [10]göre harç çubuğu örnekleri ve korozyon örnekleri üretilmiştir. Harç çubuğu örnekleri yine TS EN 196'ya göre eğilmede çekme ve basınç mukavemeti deneylerine tabi tutulmuştur. Korozyon örnekleri ise 60 gün boyunca %5'lik NaCl'den oluşan korozyon ortamında bekletilerek Tafel Ekstrapolasyon

ve Linear Polarizasyon ölçümlerine tabi tutulmuştur. Çalışmada CEM I çimentolu numuneler hem mekanik hem de korozyon değerlerinde referans kabul edilmiştir. Mekanik ve korozyon deneylerinden elde edilen deneysel bulgular sırasıyla aşağıda verilmiştir.

3.1. Eğilmede çekme mukavemeti bulguları (Flexural strength findings)

7 ve 28 günlük CEM I ve BAB çimentolu harç numuneleri üzerinde eğilmede çekme mukavemeti deneyleri yapılmış ve elde edilen deneysel veriler Şekil 8'de grafik olarak verilmiştir.

Şekil 8'e göre BAB çimentosuyla dökülen harç çubuğu örneklerinin 7 ve 28 günlük eğilme dayanımı değerleri CEM I çimentolu numunelere göre yüksektir. BAB çimentolu harç çubuklarının eğilmede çekme mukavemetleri CEM I çimentolu harç çubuklarına göre % 6.81, 28 günlüklerde ise %10.26 daha fazladır.

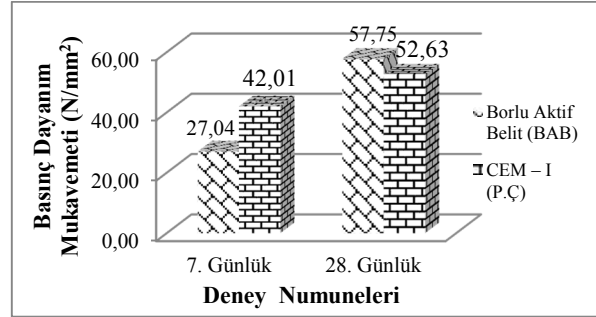


Şekil 8. Harç çubuğu numunelerinin eğilmede çekme dayanımı-kür süresi ilişkisi (The flexural strength and curing time relation of mortar bar specimens)

3.2. Basınç mukavemeti bulguları (Compressive strength findings)

7 ve 28 günlük CEM I ve BAB çimentolu harç numuneleri üzerinde basınç mukavemeti deneyleri yapılmış ve elde edilen veriler Şekil 9'da grafik olarak verilmiştir.

Şekil 9'a göre, BAB çimentosuyla dökülen harç çubuğu örneklerinin 7 günlük değerleri CEM I çimentolu numunelere göre daha düşük olmasına rağmen 28 günlük basınç dayanımı daha yüksektir. BAB çimentolu harç çubuklarının 7 günlük basınç dayanımı mukavemetleri CEM I çimentolu harç çubuklarına göre % 35.63 düşüktür. 28 günlüklerde ise %9.72 daha yüksek değerlere sahiptir. Buradan BAB çimentosunun basınç dayanımı mukavemeti açısından CEM I çimentosuna göre 28 günlük kür koşullarını tamamladıktan sonra daha yüksek dayanım sağlamıştır.

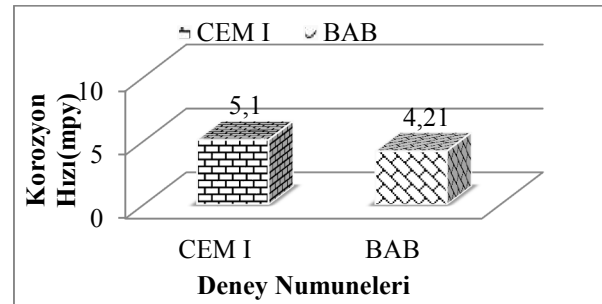


Şekil 9. Harç çubuğu numunelerinde basınç dayanımı-kür süresi ilişkisi (The compressive strength and curing time relation of mortar bar specimens)

Bunun nedeni Tablo 1'den görüleceği gibi BAB çimentosunda C₂S miktarı yaklaşık %26.8 iken, CEM I 42.5 çimentosunda %15.14 olması olabilir. Bilindiği gibi C₂S miktarı ilk günlerdeki dayanım artışını azaltırken, örnek yaşının ilerlemesi ile dayanımı arttırmaktadır [1], [13].

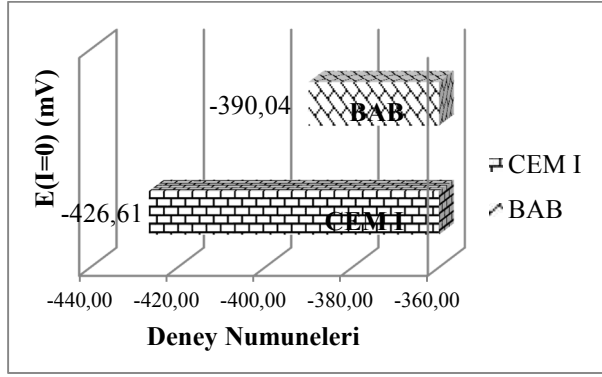
3.3. Tafel Ekstrapolasyon ölçümü bulguları (The measurement of Tafel extrapolation findings)

Korozyon ortamına maruz bırakılan CEM I ve BAB çimentolu harç çubuğu örnekleri üzerinde 60 gün boyunca Tafel ekstrapolasyon ölçümleri yapılmış ve elde edilen deneysel bulgular Şekil 10, Şekil 11, Şekil 12, Şekil 13'de grafik halinde verilmiştir.



Şekil 10. Korozyon oranı değerleri (mpy) (Corrosion rate values)

Şekil 10'da CEM I ve BAB çimentosuyla üretilip 60 gün boyunca korozyon ortamına maruz bırakılan korozyon numunelerinin korozyon hızları görülmektedir. CEM I ve BAB çimentolu numuneleri korozyon hızı açısından ele almak gerekirse, BAB çimentolu numunelerin CEM I çimentolu numunelere göre korozyon hızını % 17.45 oranında azaltarak korozyona daha dayanıklı olduğu görülmektedir.

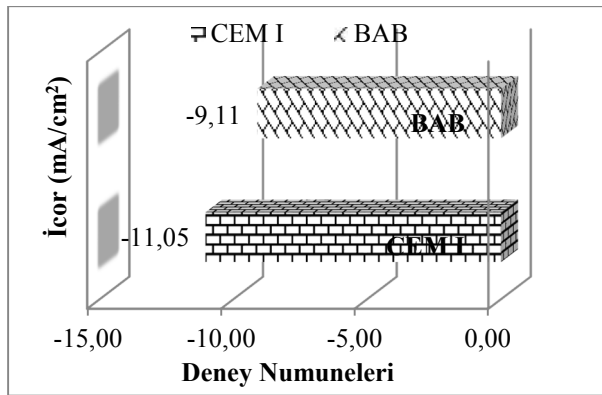


Şekil 11. Ecor, korozyon potansiyeli değerleri (mV) (corrosion potential values)

Şekil 11’de 60 gün boyunca korozyona maruz bırakılan CEM I ve BAB çimentolu numunelerin Ecor (korozyon potansiyelleri) verilmiştir. Grafikteki değerler ele alındığında BAB çimentolu numunelerin korozyon potansiyeli (Ecor) CEM I çimentolu numunelere göre %8.57 oranında düşük ölçülmüştür. Buna göre BAB çimentosunun korozyon potansiyelini çok belirgin olmasa da yavaşlattığı söylenebilir.

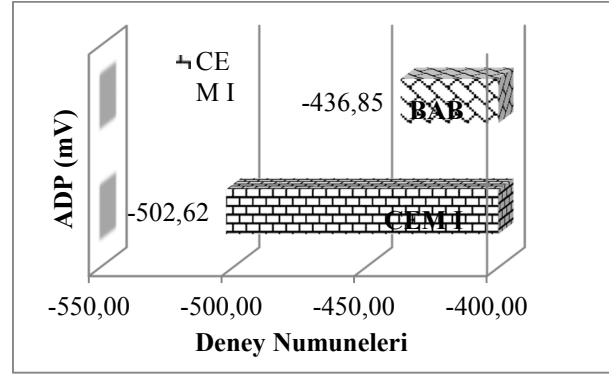
Şekil 12’de 60 günlük korozyona maruz bırakılan numunelerin Icor (korozyon akımı) değerleri verilmiştir.

Şekil 12 değerlendirildiğinde, BAB çimentolu numunelerin CEM I çimentolu numunelere göre korozyon akımını (Icor) %17.56 oranında azalttığı görülmektedir. BAB çimentosunun CEM I çimentosuna göre korozyon akımını düşürerek belirgin olmamakla birlikte olumlu etki göstermektedir.



Şekil 12. Icor, korozyon akım değerleri ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$) (Icor, corrosion rate values)

Şekil 13’de 60 günlük korozyona maruz bırakılan numunelerin Açık Devre Potansiyeli (ADP) değerleri verilmiştir.

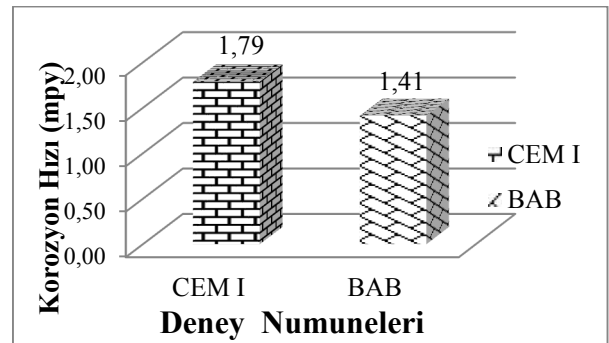


Şekil 13. Açık devre potansiyeli değerleri (mV) (Open circuit potential values)

Şekil 13 incelendiğinde, BAB çimentolu numunelerin ADP değerlerini CEM I çimentolu numunelere göre %13.05 oranında düşürdüğü görülmektedir. Buna göre BAB çimentolu numunelerin ADP değerleri CEM I çimentolu betonarme harç örneklerine nazaran daha az negatif olmasını sağlayarak, korozyonun oluşmasında çok az da olsa CEM I çimentolu numunelere göre olumlu katkı sağladığını söylemek mümkündür. Bu yöntemin tahribatsız test tekniklerinden biri olması nedeni ile sonuçları ile ilgili kesin değerlendirmede bulunmadan önce destekleyici diğer yöntemlerden birinden mesela ağırlık kaybı belirlenmesi yönteminden yararlanmakta yarar vardır.

3.4. Lineer polarizasyon ölçümü bulguları (Linear polarisation measurement findings)

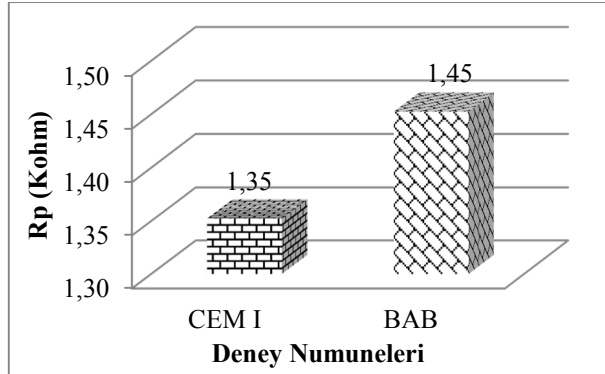
Korozyon ortamına maruz bırakılan CEM I ve BAB çimentolu harç çubuğu örnekleri üzerinde 60 gün boyunca Lineer Polarizasyon ölçümleri yapılmış, ortalamaları alınarak elde edilen sayısal veriler Şekil 14, Şekil 15, Şekil 16, Şekil 17, Şekil 18’de grafik halinde verilmiştir.



Şekil 14. Korozyon hızı değerleri (mpy) (corrosion rate values)

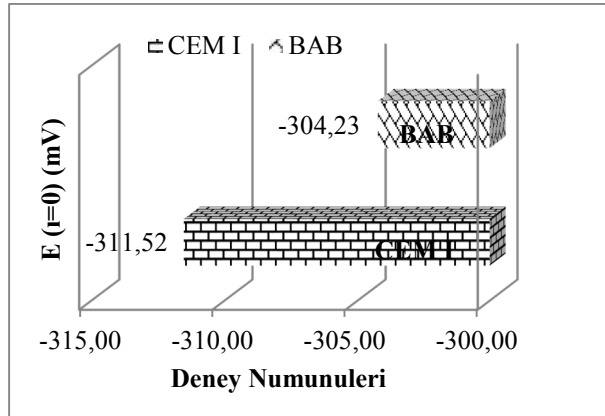
Şekil 14’e göre korozyon hızı değerleri; BAB çimentolu numunelerde CEM I çimentolu numunelere göre % 21.23 oranında daha düşüktür. Korozyona karşı donatı koruma etkinliği bakımından olumlu bir davranış sergilediği

söylenbilir. Bunun nedeni ana çimento bileşenlerinden biri olan C_3A miktarının BAB çimentosunda CEM I çimentosuna göre daha az olması ve ileri yaşlarda daha yüksek basınç dayanım kazanımına yardımcı olmasından kaynaklanabilir. Bu durum, BAB içeren harçların mikroyapısının da daha yüksek kompaziteye sahip olmasına işaret etmektedir [13]. Şekil 15’de CEM I ve BAB çimentosuyla üretilip 60 gün boyunca NaCl çözeltisine maruz bırakılan örneklerin polarizasyon dirençleri görülmektedir.



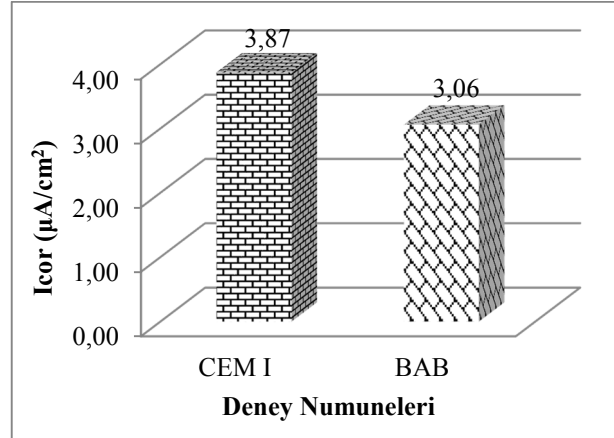
Şekil 15. Rp polarizasyon direnci değerleri (Kohm) (Rp, polarisation resistance values)

Polarizasyon direncinin (R_p) korozyon hızı ile ters orantılıdır. Buna göre, CEM I ve BAB çimentosu betonarme örneklerin, polarizasyon dirençleri bakımından, BAB çimentosu örneklerin, CEM I çimentosu örneklerine göre % 7.41 oranında fazla olduğu, dolayısı ile BAB çimentosu harcın içerisindeki çelik donatının korozyona karşı daha iyi korunduğu sonucuna varılabilir. Buna neden olarak bor oksit (B_2O_3) kullanılarak üretilen çimentoda C_3S yerine oluşan C_2S fazının hızlı soğutulması ile daha kararlı ve aktif olan μ ve/veya μ' - C_2S polimorfunun oluşması gösterilebilir [2]. Şekil 3.9’da 60 gün boyunca korozyona maruz bırakılan CEM I ve BAB çimentosu numunelerin Ecor (korozyon potansiyelleri) verilmiştir.



Şekil 16. Ecor korozyon potansiyeli değerleri (mV) (Ecor corrosion values)

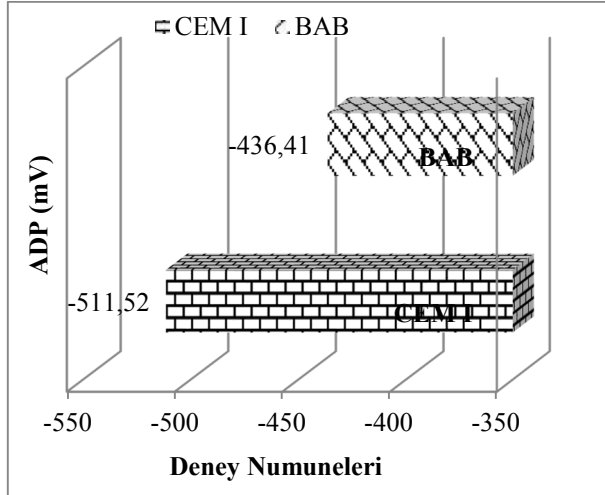
Şekil 16’ya göre BAB çimentosu numunelerin korozyon potansiyeli (Ecor) CEM I çimentosu numunelere göre %2.34 oranında düşük çıkmıştır. İki farklı çimento türü ile üretilen harç numunelerin Ecor değerleri birbirlerine çok yakındır. Bu deney metodu tahribatsız korozyon belirleme metodlarından biri olması nedeni ile nihai kararı alırken tek başına kullanmak doğru olmamaktadır [12]. Benzer sonuçlara Ergi vd. [5] tarafından yapılan çalışmada da değinilmiştir. Şekil 17’ de 60 gün boyunca NaCl çözelti ortamında korozyona maruz bırakılan numunelerin Icor (korozyon akımı) değerleri verilmiştir.



Şekil 17. Icor korozyon akımı değerleri ($\mu A/cm^2$) (Icor corrosion rate values)

Korozyon akımı değerleri, donatı korozyonu değerlendirmesi yapılabilmesi için oldukça yeterli veriler sağlamaktadır [12]. Şekil 17’ye göre, BAB çimentosu donatılı harç örneklerinin, CEM I çimentosu örneklerine göre korozyon akımı değerlerini %20.93 oranında azalttığı görülmektedir. Bu durumda BAB çimentosu kullanılarak üretilen betonarme çeliği donatılı harçlar, CEM I çimentosu ile üretilen donatılı harçlara göre korozyon akımını düşürerek korozyonu önleme açısından olumlu etki göstermiştir. Şekil 18’de 60 günlük korozyona maruz bırakılan numunelerin ADP değerleri verilmiştir.

Şekil 18 incelendiğinde, BAB çimentosu donatılı örneklerin ADP değerleri, CEM I çimentosu örneklerine göre %14.68 oranında daha düşüktür. Buna göre donatı korozyonunun engellenmesi bakımından, BAB çimentosu örneklerinin CEM I çimentosu örneklerine nazaran az da olsa olumlu davranış sergilediği söylenebilir.



Şekil 18. Açık devre potansiyeli değerleri (mV) (Open circuit potentials)

4. SONUÇLAR (CONCLUSION)

Bu çalışmada CEM I 42.5 ve BAB çimentoları kullanılarak TS EN 196'ya göre harç çubuğu örnekleri ve korozyon örnekleri üretilmiştir. Harç çubuğu örnekleri yine TS EN 196'ya göre eğilmede çekme ve basınç mukavemeti deneylerine tabi tutulmuştur. Betonarme çeliği donatılı örnekler ise 60 gün boyunca %5 NaCl içeren çözeltisinde korozyona maruz bırakıldıktan sonra Tafel Ekstrapolasyon ve Lineer Polarizasyon yöntemleri kullanılarak korozyon ölçümlerine tabi tutulmuştur. Mekanik ve korozyon deneylerinden elde edilen sonuçlar aşağıda verilmektedir.

4.1. Mekanik deney sonuçları (Mechanical test results)

BAB çimentolu harç çubuğu örnekleri CEM I 42.5 çimentolu harç çubuklarına göre 7 günlüklerde %6.81, 28 günlüklerde ise %10.26 daha yüksek değerlere ulaşarak harç çubuklarında BAB çimentosunun eğilmede çekme mukavemetini CEM I 42.5 çimentosuna göre arttırdığını söylemek mümkündür.

BAB çimentosuyla dökülen harç çubuğu örneklerinin 7 günlük basınç dayanım mukavemeti CEM I 42.5 çimentolu harç çubuklarına göre %35.63 düşük iken, 28 günlük basınç mukavemeti değerleri ise %9.72 daha yüksektir. BAB çimentosu, CEM I 42.5 çimentosuna göre basınç mukavemeti açısından daha iyi bir performansa sahiptir.

4.1. Tafel Ekstrapolasyon korozyon ölçümü sonuçları (Tafel extrapolation corrosion measurement results)

60 gün boyunca korozyona maruz bırakılan demir donatılı korozyon örnekleri Tafel Ekstrapolasyon ölçümlerine maruz bırakılmıştır. BAB çimentolu

örneklerin CEM I 42.5 çimentolu örnekler göre, korozyon hızını; %17.45 oranında düşürdüğünden, çelik donatıyı korozyona karşı daha yüksek koruma etkinliğine sahiptir. Ayrıca BAB çimentolu örneklerin Ecor değerleri, CEM I 42.5 çimentolu örneklerin değerlerine göre %8.57 oranında daha düşüktür. BAB çimentolu örnekler, CEM I 42.5 çimentolu örnekler göre Icor ve ADP değerlerini sırasıyla %17.56 ile %13.05 oranında azaltarak, donatı korozyonunu yavaşlatmıştır.

4.2. Lineer Polarizasyon korozyon ölçümü sonuçları (Linear polarisation corrosion measurement results)

BAB çimentolu örneklerin, CEM I 42.5 çimentolu örnekler göre korozyon hızları bakımından %21.23 oranında daha düşük olması, BAB çimentosunun donatı korozyonunu yavaşlattığını göstermiştir. Ayrıca BAB çimentolu örneklerin Rp (polarizasyon direnci) ile Ecor değerleri CEM I 42.5 çimentolu örnekler göre sırasıyla % 7.41 ve %2.34 oranlarında daha düşüktür. Bunlara ek olarak; BAB çimentolu örneklerin Icor ve ADP değerleri, CEM I 42.5 çimentolu örnekler göre sırasıyla %20.93 ile %14.68 oranında daha düşük olarak belirlenmiştir.

Genel bir değerlendirmede; harç üretiminde BAB çimentosu kullanımı, CEM I 42.5 çimentosuna göre, harçların içerisindeki çelik donatının korozyona karşı dayanımını artırarak olumlu etki göstermektedir. BAB çimentosu, gerek mekanik deney sonuçları bakımından, gerekse korozyon ölçüm yöntemlerinden elde edilen sonuçlar ışığında, deniz yapıları vb. gibi korozif ortamlarda hizmet edecek yapılarda, yapı elemanlarının kalıcılığı açısından en az CEM I 42.5 çimentosu kadar yeterli olacağı söylenebilir.

BAB çimentosundan, bu özelliği nedeni ile beton üretiminde yaygın bir şekilde faydalanması sonucu enerji tasarrufu (yaklaşık %10) ve CO₂ emisyonunda % 25'lere varan azalma sağlanabilecektir. BAB çimentosunun durabilite özelliklerini belirlemek üzere daha kesin sonuçlara ulaşmak için tahribatsız korozyon belirleme yöntemlerine ek olarak Cl⁻ profili, ağırlık kaybı belirleme, hızlandırılmış klorür geçirgenliği gibi testlerle desteklenen daha ileri düzey araştırmaların yapılmasında yarar vardır.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Yazar, araştırmanın yapılmasında 1646M08 kod nolu proje ile desteklerinden dolayı S.D.Ü. Bilimsel Araştırma Projeleri birimine teşekkür eder. Çalışmanın laboratuvar aşamasındaki gayretlerinden dolayı Ömer ÇOBAN ve Halil KILAVUZ'a, BAB çimentosunu temin eden ve her türlü desteği esirgemeyen GÖLTAŞ Çimento'ya teşekkürlerini sunar.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] B. Baradan, H. Yazıcı ve H. Ün, Betonarme Yapılarda Kalıcılık (Durabilite), Yayın No: 298,, İzmir: D.E.Ü. Müh. Fak. Yayınları, (2003), p. 282s.
- [2] A. Sağlık, O. Sümer, E. Tunç ve F. Kocabeyler, «Borlu aktif belit çimentosu ve DSİ projelerinde uygulanabilirliği,» *DSİ Teknik Bülteni*, no. No.105, pp. 1-26, 2009.
- [3] İ. Ustabaş, «Kolemanit ve Üleksitin Çimentoda Kullanılabilirliğinin Araştırılması,» %1 içinde *Hazır Beton Kongresi, BETON2011*, İstanbul, 2011.
- [4] S. Yalçın, *Kolemanitli Çimentoların Betonarme Demirlerinin korozyonu Üzerine İnhibitif Etkisi*, Ankara: Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Mühendisliği A.B.D., 1996, p. 65.
- [5] S. Zeybek, A. Asan, E. Ergi ve G. Bilgin, «Endüstriyel Atık Katkılı Çimentoların Beton Dayanımı ve Donatı Korozyonuna Etkileri,» %1 içinde *TMMOB Kimya Mühendisleri Odası ve TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, 2.Yapılarda Kimyasal Katkılar Sempozyum ve Sergisi*, Ankara, 2007.
- [6] M. Zeybek, *Borlu Çimentolar, Y.Lisans tezi*, Manisa: Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 1996, p. 59 s..
- [7] E. Erdoğan, *Çimentoya bor katkısı, uçucu kül, yüksek fırın cürufu ilavesiyle özelliklerinin incelenmesi*, İstanbul: Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü,, 2006.
- [8] M. Davraz, «The effect of boron compound on the properties of cementitious composites,» *Science and Engineering of Composite Materials*, cilt 17, no. 1, pp. 1-17, 2010.
- [9] TSE, «13353 Borlu Aktif Belit (Bab) Çimentosu - Tarifler, Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri, 06 Mart.,» Türk Standartları Enstitüsü,, Ankara, 2008.
- [10] TSE, «196-1 Çimento deney metotları - Bölüm 1: Dayanım tayini,» Türk Standartları Enstitüsü,, Ankara, 26 Mart 2009.
- [11] TSE, «708 Çelik-Betonarme için- Donatı çeliği,» Türk Standartları Enstitüsü,, Ankara, 13 Nisan 2010.
- [12] Yalçın H. ve Koç T., *Betonarme Demirlerin Korozyonu ve Önlenmesi*, Ankara: CMS Yayıncılık Bilişim Hiz., I.Baskı, ISBN:975-92264-1-3, 2004.
- [13] T.Y. Erdoğan, *Beton*, 760s., ISBN: 975706467X, I. Baskı,, Ankara: METU Press,, 2003.