

Sepiyolit İçeren Çimento Esaslı Bağlayıcılarla Üretilen Harçların İşlenebilirlik, Dayanım ve Dayanıklılık Özelliklerinin Araştırılması

Mahmut AYTEKİN¹, Hadaan PEHLİVAN^{2*}

Öz

Çimento esaslı bağlayıcılarda çimento ve suyun reaksiyonu sonucu oluşan kalsiyum hidroksit yüksek alkali özelliği sayesinde donatıyı çevresel etkilere karşı korumaktadır. Çimentolu karışımlarda, iyonik iletkenlik çok düşük olduğu için, deniz suyu ile teması olmayan donatı yüzeyinde, korozif hücrelerin oluşumu kısıtlı olmaktadır. Bu çalışmada sepiyolit, çimentoya ağırlıkça %0, %2.5, %5, %7.5, %10, %12.5 ve %15 oranında ikame edilerek donatılı ve donatısız çimentolu karışımlar üretilmiştir. Çimento hamurlarına kıvam, priz süreleri ve hacim genleşmesi; 40×40×160 mm prizmatik çimento harçlarına fiziksel ve mekanik özellik; Ø10 donatılı Ø50 x100 mm silindir çimento harçlarına korozyon deneyleri yapılmıştır. %3.5 NaCl çözeltisi içerisinde 145 gün bekletilen silindir çimento harçlarının üç elektrotlu ölçüm yöntemi ile belirli günlerde korozyon ölçümleri alınmıştır. Sonuç olarak %5 sepiyolit katkılı çimento hamurlarında priz başlangıç ve bitiş süresinin en kısa olduğu; sepiyolit ikamesinin artmasıyla çimento harç numunelerinde su emme miktarlarının arttığı, bulk yoğunluklarının azaldığı; katkısız ve %2,5 sepiyolit katkılı çimento harçlarının mekanik özelliklerinin birbirine benzer olduğu aynı zamanda korozyona karşı en yüksek direnci gösterdiği belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Çimento, Sepiyolit, Donatı, Korozyon.

Investigation of Workability, Strength and Durability Properties of Mortars Produced with Cement-Based Binders Containing Sepiolite

Abstract

In cement based binders, calcium hydroxide formed as a result of the reaction of cement and water protects the reinforcement against environmental effects thanks to its high alkaline property. Since ionic conductivity is very low in cementitious mixtures, the formation of corrosive cells is limited on the reinforcement surface that is not in contact with sea water. In this study, reinforced and unreinforced cementitious mixtures were produced by replacing sepiolite with cement at rates of 0%, 2.5%, 5%, 7.5%, 10%, 12.5% and 15% by weight. Consistency, setting times and volumetric expansion were carried out on cement pastes; physical and mechanical properties were carried out on 40×40×160 mm prismatic cement mortars; corrosion tests were carried out on Ø10 reinforced Ø50 x100 mm cylinder cement mortars. Corrosion measurements were taken on certain days of cylinder cement mortars kept in 3.5% NaCl solution for 145 days by the three-electrode measurement method. As a result, the shortest setting start and end times were found in cement pastes with 5% sepiolite addition; It was determined that with increasing sepiolite replacement, water absorption amounts in cement mortar samples increased, bulk densities decreased; mechanical properties of cement mortars without additive and with 2.5% sepiolite additive were similar to each other and also provided the best protection against reinforcement corrosion.

Keywords: Cement, Sepiolite, Reinforcement, Corrosion.

¹Kilis 7 Aralık Üniversitesi, İnşaat Bölümü, Kilis, Türkiye, mahmutaytekin@kilis.edu.tr

²Kilis 7 Aralık Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kilis, Türkiye, hadaantaban@kilis.edu.tr

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author

1. Giriş

Çimentolu sistemler aşırı yüklenme, deprem kuvvetleri, çevresel ve iklimsel koşullardan etkilenerek zamanla hasara uğrayabilir. Bu nedenle sistemin iç ve dış etkenlerden kaynaklanabilecek bozulma ve hasarlardan korunması için mekanik, fiziksel ve kimyasal özelliklerinin iyi analiz edilerek tasarlanması gerekmektedir (Erdoğan, 2013). Beton üzerine gelen yükleri taşımalı ve dayanıklı olmalıdır (Kaya ve ark., 2015). Beton karışım oranlarının, malzeme bileşenlerinin kıvam, yoğunluk, dayanım, dayanıklılık gibi özelliklerinin donatıyı korozyona karşı korunmaya yönelik olması önemlidir (Zongjiin, 2011).

Klor iyonları korozyonun başlıca nedenlerinden biridir (Gel, 2003) ve betonun geçirgenliği, gözenekliliği ne kadar yüksekse, klorür iyonlarının betona işlemesi o kadar kolay olmaktadır. Gelgit etkisindeki deniz yapılarında beton içine sızan deniz suyu kaynaklı klor iyonları, suyun buharlaşması sonucu beton içerisinde kalmakta, tekrar sayısı arttıkça katalizör görevi yapan klorür yoğunluğu da artmaktadır (Haberal, 2010).

Sepiyolit, dünyada yaygın olarak kullanılan endüstriyel minerallere kıyasla son derece sınırlı kaynaklara sahip bir hammadde olup, yataklarının tamamına yakını Türkiye ve İspanya'da bulunmaktadır. Sivrihisar (Eskişehir) ile Polatlı (Ankara) arasındaki hattın güney kesiminde yer alan İç Anadolu Neojen Havzası'nın Yukarı Sakarya bölümüne ait sepiyolit yataklarının araştırılmasına yönelik detaylı raporlar MTA Genel Müdürlüğü tarafından hazırlanmıştır. Türkiye'de ekonomik olarak değerlendirilebilecek endüstriyel veya tabakalı tip sepiyolit yatakları Çanakkale, Bursa, Eskişehir, Isparta ve Kütahya'da bulunmaktadır (İrkeç, 1996).

Sepiyolit ismi mineralojik anlamda ilk kez 1847 yılında tanımlanmış olup, Yunanca "mürekkap balığı" anlamına gelen kelimedenden türetilmiştir (Glocker, 1847). Sepiyolit, sulu bir magnezyum silikattır, atapulgit ise fillosilikat grubuna ait sulu bir magnezyum-alüminyum silikat kil mineralidir (Nagy ve Bradley, 1955). Bu mineral grubunun tanımına uygun olarak, (T_2O_5) ($T=Si,Al,Be$) bileşiminde çift yönlü sürekli tetrahedral bir tabaka yapısına sahipken, diğer tabaka silikatlarından farklı olarak, lif boyunca devam eden kanal boşlukları ve kesikli oktahedral tabakalardan oluşan lifli bir yapıya sahiptir (Brindley ve Pedro, 1972). Sepiyolit içerisinde yüksek oranda magnezyum bileşeni bulunmaktadır (Karabulut ve Kalpaklı, 2022). İçerisinde yüksek oranda magnezyum bulunan bağlayıcılarla yapılan çalışmalarda genleşme miktarının arttığı belirlenmiştir (Çullu ve ark., 2007).

Kil minerallerinden kaolin, metakaolin ve montmorillonit de çimento üretiminde klinker kullanımını azaltmak çimento katkı maddesi olarak tercih edilmektedir. Montmorillonit minerali içeren volkanik külün alterasyonu sonucu oluşan plastik bir kil olan bentonit, (Na,Ca) (Al,Mg) $6(Si_4O_{10})$ $3(OH)_6$ nH_2O kimyasal formülüne sahip silis, alümina ve kalsiyum, sodyum, magnezyum ara tabaka katyonundan oluşur (Khandelwal ve Rhee, 2022; Allo ve Murray, 2004)

Kalsine killerin ve nano katkıların çimento üretiminde kullanımının araştırıldığı çalışmada % 10 bentonit ve % 1.0 nano silika ve % 10 sepiyolit ve % 1.0 nano silika içeren çimento harçları, kontrol harçlarının basınç dayanımının sırasıyla; %105.53 ve % %102.85'ine ulaşmıştır (Pehlivan, 2023).

Çimento üretimi sırasında en önemli çevresel sorun sera gazına neden olan karbondioksit salınımlarıdır. Bu nedenle klinker üretiminde alternatif hammaddelerin önemi her zaman dikkat çekmektedir. Tarih öncesi dönemlerden bu yana ham killer sonrasında ise kalsinasyonla puzolanik özelliği iyileştirilebilen killer önemli bir yapı malzemesi olarak karşımıza çıkmaktadır. Doğada oldukça yaygın olarak bulunan killerin sürdürülebilir çimento üretimi ve aynı zamanda çimentolu sistemi korozyon gibi çevresel etkilere karşı daha dayanıklı duruma getirebilmek için içerisine ilave edilmesi son derece önemli bir konudur.

Çimentolu sistemlerin geliştirilmesine yönelik çalışmalarda genellikle silis dumanı, uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve volkanik tüf gibi puzolanlar kullanılarak farklı özelliklere sahip sürdürülebilir çimento üretilmektedir. Türkiye'nin sepiyolit rezervleri bakımından dünyanın en büyük ikinci ülkesi olduğu bilinmektedir. Sepiyolit yüzey alanı yüksek olması, lifsi yapı, porozite, kristal yapı ve bileşimi gibi özellikleri sayesinde geniş kullanım imkanları sunmaktadır. Sepiyolit kilinin çimentolu sistemlerde katkı malzemesi olarak kullanımı ile ilgili çok yönlü çalışmalar bulunmamaktadır. Bu çalışmada, sepiyolit ikameli harç numunelerinin mekanik ve teknolojik özelliklerinin yanı sıra, en önemli çevresel etkinin sodyum klorür olduğu deniz suyu ile etkileşime giren su yapılarındaki dayanıklılık problemleri çok yönlü elektrokimyasal korozyon ölçüm yöntemleri ile incelenmiştir.

2. Materyal ve Metot

2.1. Materyal

Bu çalışmada sepiyolit (S), CEM I 42,5 R çimentosu, CEN standard kumu, içme suyu, %3,5 NaCl çözeltisi ve donatı çeliği kullanılmıştır. Kahramanmaraş KİPAŞ Çimento Fabrikasından temin edilen TS EN 197-1(2012)'e uygun CEM I 42,5 R çimentosunun fiziksel ve kimyasal özellikleri Tablo 1' de verilmiştir.

Tablo 1. CEM I 42,5 R çimentosunun özellikleri (KÇS Çimento Fabrikası verilerine göre)

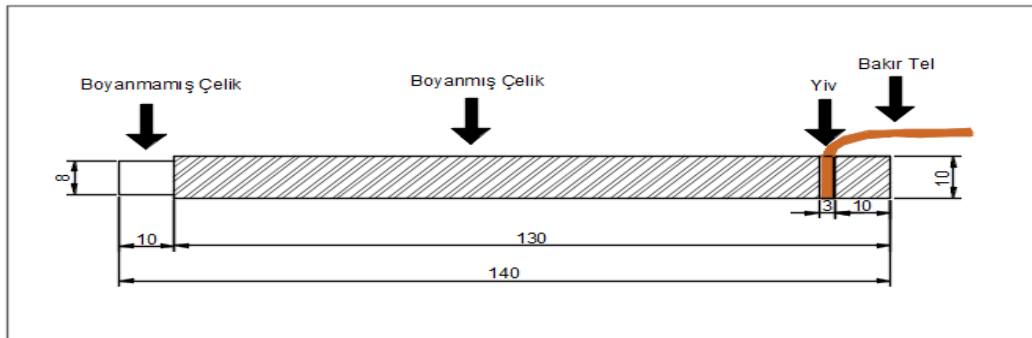
Fiziksel Özellikler			Kimyasal Özellikler		
Özellik	Değer	Birim	Özellik	Değer	Birim
Özgül Ağırlık	3.15	g/cm ³	SO ₃	2.48	%
Özgül Yüzey (Blaine)	3880	cm ² /g	MgO	0.85	%
Litre Ağırlığı	950	g/l	Kızdırma Kaybı	2.0	%
Hacim Genleşmesi	1.3	mm	Çözünmeyen Kalıntı	0.4	%
Priz Başlangıcı	200	Dakika	Cl ⁻	0.0092	%
Priz Sonu	240	Dakika			
2 Günlük Dayanım	28.1	Mpa			
28 Günlük Dayanım	54.5	Mpa			

Bu çalışmada kullanılan beyaz dolomitli sepiyolit numunesi Eskişehir Sivrihisar ilçesi Yenidoğan ve Karacaören köyleri civarında yüzeylenen kayalardan alınmıştır. Rezerv alanının jeoloji haritası incelendiğinde en üstteki birimlerin Miyosen yaşlı gösel kireçtaşı, marn, şeyl, alttaki birimlerin Üst Kretase yaşlı granitoid, Permian yaşlı mermer, en alttaki birimlerin ise Prekambriyen ve/veya Paleozoyik yaşlı ayrılmamış gnays, metagranit, şist, mermer ve amfibolitlerden oluştuğu görülmektedir (Anonim, 2018).

TS EN 196-1 (2016)'ya uygun, yoğunluğu 2.63 g/cm³ olan CEN standard kumu Kırklareli Limak Batı Çimento Sanayi ve Ticaret A.Ş. Trakya Fabrikasından temin edilmiştir.

Deniz suyunun beton üzerindeki kimyasal etkisi, çözülmüş tuzların varlığından kaynaklanmaktadır ve tipik tuzluluk oranı %3,5 civarındadır. Bu nedenle korozyon ölçümlerini yapabilmek için donatılı harç numuneleri %3,5 NaCl korozif çözeltisi içinde bekletilmiştir. Karışım suyu olarak ise şebeke suyu kullanılmıştır.

Çalışmada Evyapan Demir Çelik İnşaat San. Tic. Ltd. Şti. firmasından temin edilen Ø10 nervürlü donatı çeliği (çalışma elektrodu) korozyon testleri için kullanılmıştır. Şekil 1'de görüldüğü gibi çeliğin ucuna 10 mm içeriden 3 mm'lik bir yiv açılmış ve bu kesite bakır tel bağlanmıştır. Daha sonra bakır telin üzeri boya girmemesi için parafilm ile kapatılmıştır. Ölçümün yapılacağı uçta 8 mm çapında ve 10 mm uzunluğunda çıplak bir kesit oluşturmak için donatı tornalanmıştır. Daha sonra donatılar tornalanmış kısım açık kalacak şekilde önce pas önleyici boya ile daha sonra epoksi boya ile boyanarak kaplanmıştır. Boyama işlemi tamamlandıktan sonra açık kalan kısmın alanı 3,02 cm² olarak hesaplanmıştır.

**Şekil 1.** Korozyon numunelerinde kullanılan donatının boyutları (mm)

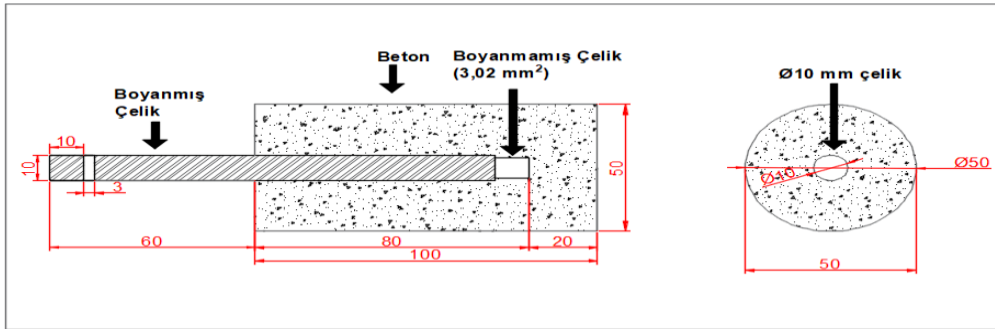
2.2. Metot

Deney numunelerinin hazırlanması ve ölçümler: S0, S2.5, S5, S7.5, S10, S12.5 ve S15 kodlu sepiyolit katkılı çimentolu karışımlar sırasıyla standart kıvam, priz başlama ve sonu, hacim genişmesi deneyleri için çimento hamuru; taze harç kıvam deneyi için çimento harcı; mekanik ve fiziksel özellik deneyleri için 40x40x160 mm harç prizmaları ve korozyon deneyleri için donatı gömülü Ø50x100 mm silindir harç numuneleri olarak Şekil 2’de görüldüğü gibi üretilmiştir.



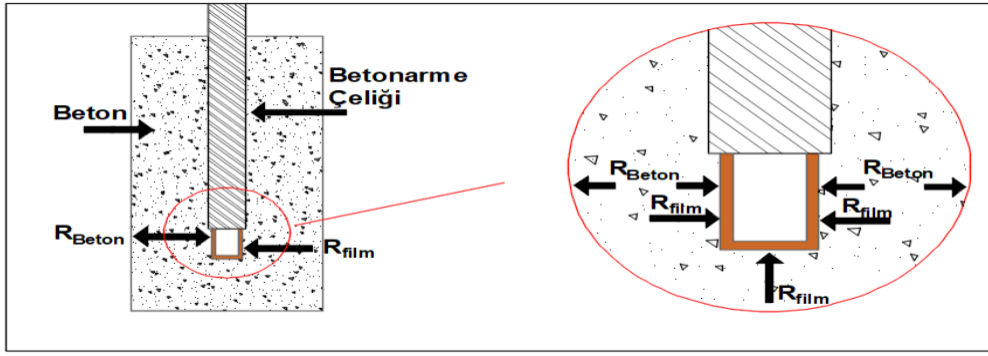
Şekil 2. Deney numuneleri

Korozyon numunelerinin yüzey alanı ne kadar büyük olursa korozyon mekanizmasını takip etmek o kadar güçleşmektedir. Bu nedenle çimentolu sistem içerisine gömülü donatının korozyon özelliklerini daha net bir şekilde belirlemek ulaşmak Şekil 3’de görüldüğü gibi donatı çeliği kısmen boyanmıştır.



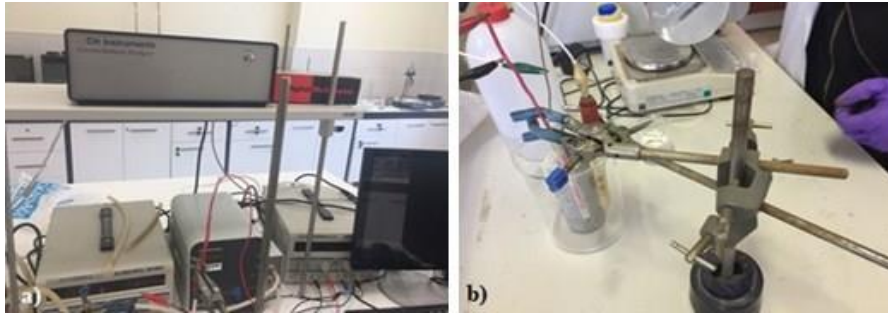
Şekil 3. Donatının çimento harcı içindeki durumu (mm olarak)

Şekil 4’e göre, bir donatının korozif, iletken ve sulu ortamda korozyon özelliğini belirleyen R (direnç) değerinin, donatı yüzeyinde oluşan film direnci (R_{film}) ve betonun dayanımından (R_{beton}) oluştuğu bilinmektedir.



Şekil 4. Çimentolu sistemde donatının farklı korozyon özellikleri bölgeleri

Harç numunelerine gömülen donatı çeliğinin elektrokimyasal korozyon parametrelerinin belirlenmesi, Şekil 5(a) ve Şekil 5(b) de görüldüğü gibi bilgisayar kontrollü CH Instruments (600E) model potansiyostat cihazı ve CHI604e programı ile üç elektrot sistemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5. Korozyon ölçüm sistemleri
(a) CH Instruments (600E) model potansiyostat cihazı (b) Üç elektrot sistemi

Üç elektrotlu sistemde, elektrokimyasal korozyon özelliklerini belirlemede kullanılan takviye elemanı çalışma elektrodu, karşıt elektrot olarak platin ve karşılaştırma elektrodu olarak da Ag/AgCl kullanılmıştır. %3.5 NaCl içeren çözeltisi içerisinde 145 gün bekletilen donatılı harçların sırasıyla 1., 3., 10., 20., 30., 50., 90. günlerde serbest korozyon; 130., 133., 136., 139., 142., 145. günlerde 3 gün dönüşümlü olarak açık havada ve tuzlu suda bekletilerek korozyon ölçümleri alınmıştır. Korozyon değerlerinin ölçümünde yarı hücre potansiyel yöntemi, lineer polarizasyon direnci yöntemi ve kulometrik yöntem gibi elektrokimyasal testler uygulanmıştır. Bu testlerin sonucunda elde edilen bulgulara göre malzeme korozyon özellikleri ve mekanizmaları belirlenmiştir.

3. Bulgular ve Tartışma

3.1. Sepiyolitin XRF ve XRD Analizleri

Deneylerde kullanılan tamamı ASTM C 618-23E01 (2023)'e göre 45 µm elekten geçen sepiyolite uygulanan ve Tablo 2' de verilen XRF analizi sonucunda, kullanılan sepiyolitin kızdırma

kaybının %35.87, MgO miktarının %25.44, CaO miktarının %16.81, SiO₂ miktarının %20.30, Fe₂O₃ miktarının ise %0.26 ve Al₂O₃ miktarının %0.62 olduğu tespit edilmiştir.

Tablo 2. Sepiyolit XRF analizi

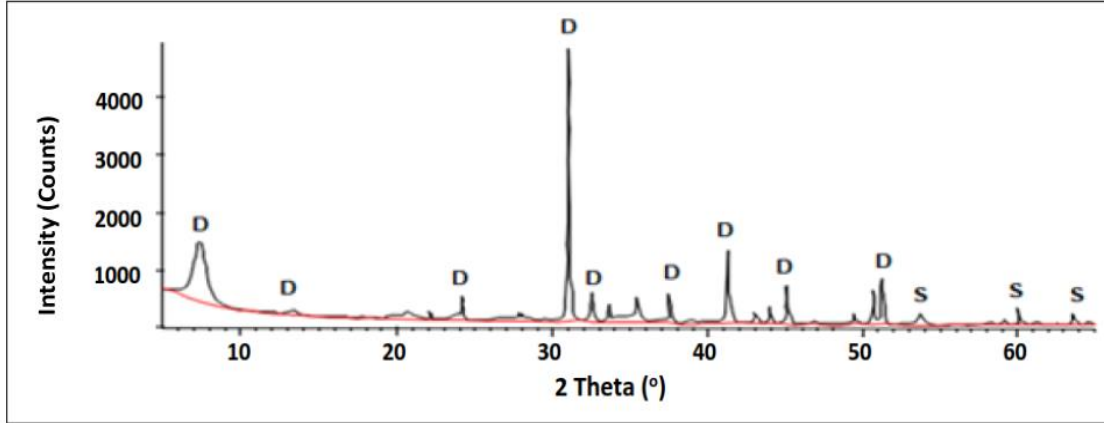
Rapor Adı	Miktar (%)	Rapor Adı	Miktar (%)
Kızdırma Kaybı	35,870	Na ₂ O	0,058
Al ₂ O ₃	0,622	NiO	0,001
BaO	0,007	P ₂ O ₅	0,003
CaO	16,810	PbO	0,002
Cr ₂ O ₃	0,003	SO ₃	0,016
CuO	0,002	SiO ₂	22,295
Fe ₂ O ₃	0,262	SrO	0,316
HfO ₂	0,002	TiO ₂	0,195
K ₂ O	0,115	V ₂ O ₅	0,010
MgO	25,437	ZnO	0,000
Mn ₃ O ₄	0,005	ZrO ₂	0,005
Na ₂ O	0,058		

Eskişehir-Sivrihisar bölgesinden temin edilen sepiyolit öğütme ve nem alma işlemleri sonucunda yoğunluğu 2.70 gr/cm³, özgül yüzey alanı 7360 cm²/g, nem içeriği ise %1.12 olarak bulunmuştur.

Kavas ve ark. (2004) Eskişehir-Sivrihisar kahverengi sepiyolitinin XRF analizi sonucunda kızdırma kaybının %26.4 olduğunu ve içerisinde %35.55 SiO₂, %18.59 MgO, %13.06 CaO, %2.85 Al₂O₃, %1.42 Fe₂O₃ ve toplam %2 oranında diğer minerallerin (SO₃, K₂O, Na₂O) bulunduğunu tespit etmiştir. Demir (2016) tarafından yapılan başka bir çalışmada Eskişehir beyaz sepiyolit yoğunluğunun 2-2.25 g/cm³ olduğu ve içeriğinde %55.92 SiO₂, %22.81 MgO, %0.57 CaO, %1.56 Al₂O₃, %0.77 Fe₂O₃, %0.77 K₂O ve %0.12 oranında Na₂O minerallerinin bulunduğu belirtilmiştir. Ersever Angur (2016) çalışmasında Eskişehir yöresi üç farklı sepiyolit (HS1, HS2 ve HS3 numune kodlu) XRF analizine göre sırasıyla HS1'de %44.42 SiO₂, %19.87 MgO, %2.05 CaO, %2.36 Al₂O₃ ve %0.95 oranında Fe₂O₃; HS2'de %38.58 SiO₂, %21.51 MgO, %7.11 CaO, %1.61 Al₂O₃ ve %0.72 oranında Fe₂O₃ ve HS3'de %49.06 SiO₂, %21.44 MgO, %2.80 CaO, %1.99 Al₂O₃ ve %0.94 oranında Fe₂O₃ bulunduğunu belirtmiştir. HS1, HS2 ve HS3 numuneleri için sepiyolit saflık derecesinin sırasıyla %70-76, %66-76 ve %76-83, dolomit içeriğinin ise sırasıyla %7, %23 ve %9 olduğu, bu nedenle HS2 numunesinin yüksek dolomit içeriğinden dolayı düşük kaliteli sepiyolit olarak raporlandığı görülmüştür. Karataş (2011) tarafından Eskişehir-Sivrihisar sepiyolit içerisinde %44.79 SiO₂, %19.73 MgO, %8.78 CaO, %2.35 Al₂O₃ ve %1.38 oranında Fe₂O₃ bulunduğu belirtilmiştir. Çullu ve ark. (2007) sepiyolit içerisinde bulunan dolomit sebebiyle bileşende yüksek miktarda bulunan MgO' in normal sıcaklıklarda çok yavaş hidrate olduğunu ve ileriki zamanlarda genleşmeye neden olabileceğini belirtmişlerdir.

Şekil 6'da XRD cihazı ve kantitatif analizlerde kullanılan Rietveld programı ile yapılan analizlerde öğütülmüş ham sepiyolit numunelerinin XRD kırınım grafiği görülmektedir. Mineralojik

analiz sonucuna göre sepiyolit içerisinde safsızlığın fazla olduğu, %69.30 dolomit, %18.40 sepiyolit, %9.10 magnezit, %3.30 analbite bulunduğu belirlenmiştir.



Şekil 6. Sepiyolit numunesinin XRD kırınım grafiği (D:Dolomit, S:Sepiyolit)

Kavas ve ark. (2004), sepiyolitın XRD analizinde %90 oranında saf olduğunu, ancak dolomit, kuvars, kalsit ve kil minerallerinin izleriyle ilişkili safsızlıklar içerdiğini bildirmiştir. Ersever Angur (2016) tarafından yapılan XRD analizine göre HS1, HS2 ve HS3 sepiyolit numunelerinin mineralojik özellikleri sırasıyla %72 sepiyolit, %8 dolomit, %7 kuvars, %2 kalsit, %2 albit ve %9 Na montmorillonit; %58 sepiyolit, %18 dolomit, %5 kuvars, %10 montmorillonit, %6 amorf faz ve %3 kalsit+feldispat+diğ. ve %68 sepiyolit, %6 dolomit, %8 kuvars, %5 montmorillonit, %4 amorf faz ve %10 kalsit+feldispat+diğ. olarak elde edilmiştir. Bu çalışmada kullanılan Eskişehir Sivrihisar sepiyolit kilinin de benzer mineralojik özellikler taşıdığı anlaşılmaktadır.

3.2. Sepiyolit Miktarının Standart Kıvam, Priz Süresi ve Hacim Genleşmesine Etkisi

Sepiyolitın değişen oranlarda ikame olarak kullanıldığı çimento hamurlarının standart kıvam tayini için gerekli olan su miktarları Tablo 3’de verilmiştir.

Tablo 3. Çimento hamurlarının standart kıvamı için gerekli su ihtiyaçları

Numune	Su ihtiyacı	
	Kütlece (g)	%
S0	133.6	26.7
S2.5	136.4	27.5
S5	146.3	29.3
S7.5	148.7	29.7
S10	150.0	30.0
S12.5	153.1	30.6
S15	162.1	32.4

Tablo 3'e göre, çimentoya eklenen sepiyolit miktarı arttıkça standart kıvam için gereken su miktarının da arttığı görülmektedir. Buna göre su ihtiyacı en fazla ve en az olan sırasıyla S15 ve S2.5 numuneleridir. Sepiyolit miktarının artmasıyla su gereksiniminin de artmasının nedeni, sepiyolit içerisinde hidrojen bağları ile oluşan dış silanol (Si-OH) gruplarının önemli miktarda su tutması olarak gösterilebilir. (Kavas ve ark., 2004).

Tablo 3'te verilen standart kıvam için gerekli su miktarlarına göre hazırlanan çimento hamurlarının priz süreleri ve hacim genleşme miktarları Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4. Çimento hamurlarının başlangıç - son priz süreleri ve hacim genleşme miktarları

Numune	Priz Süreleri (Dakika)		Katılma Süresi (Dakika)	Hacim Genleşmesi (mm)
	Priz Baş.	Priz Bit.		
S0	168	229	1:01	1
S2.5	162	207	0:45	1
S5	146	183	0:37	1
S7.5	165	204	0:39	1
S10	158	196	0:38	1
S12.5	151	201	0:50	1
S15	169	217	0:48	1
TS EN197-1	Min. 1:00	Maks. 10:00	-	Maks. 10.00 mm

Tablo 4'te görüldüğü üzere tüm çimento hamurları arasında en erken priz başlangıcı ve priz bitişi S5 numunesinde, en geç priz başlangıcı S15 numunesinde, en geç priz bitişi ise S0 (referans) numunesinde elde edilmiştir. S5 numunesinde referans numunesine göre priz 22 dakika daha erken başlamış ve 46 dakika daha önce tamamlanmıştır. Katılma süreleri incelendiğinde en kısa süre S5 numunesinde, en uzun süre S0 numunesinde görülmüştür. Hacim genleşmesi tüm numunelerde 1 mm olarak ölçülmüştür. Sepiyolit katkı oranlarının hacim genleşmesi miktarına önemli bir etkisi olmamıştır.

Kavas ve ark. (2004) tarafından %5 alçı taşı + %95 çimento karışımına (referans numune) %3, %5, %10, %15, %20 ve %30 kahverengi sepiyolit ikamesiyle s/b oranı 0.5 olan çimento hamurları hazırlanmıştır. Referans, %3 sepiyolit+%92 çimento+%5 alçı taşı, %10 sepiyolit+%85 çimento+%5 alçı taşı numunelerinin priz başlangıç ve bitiş süreleri sırasıyla 156 dakika ve 240 dakika; 132 dakika ve 252 dakika; 108 dakika ve 216 dakika olarak bulunmuştur. Bu çalışmada da literatüre paralel düşük sepiyolit ikameli çimento hamurlarının (örneğin S5) priz başlama ve sonu süresinin en kısa olduğu görülmektedir.

3.3. Sepiyolit Miktarının Taze Harç Kıvamına Etkisi

Sepiyolit ikame miktarlarına bağlı çimento harçlarının su ihtiyacı Tablo 5'de verilmiştir. Çimento harç karışımlarının üretimi sarsma tablasında yayılma çapı 110 ± 5 olacak şekilde yapılmıştır (ASTM C187-23, 2023; TS EN 196-1, 2016).

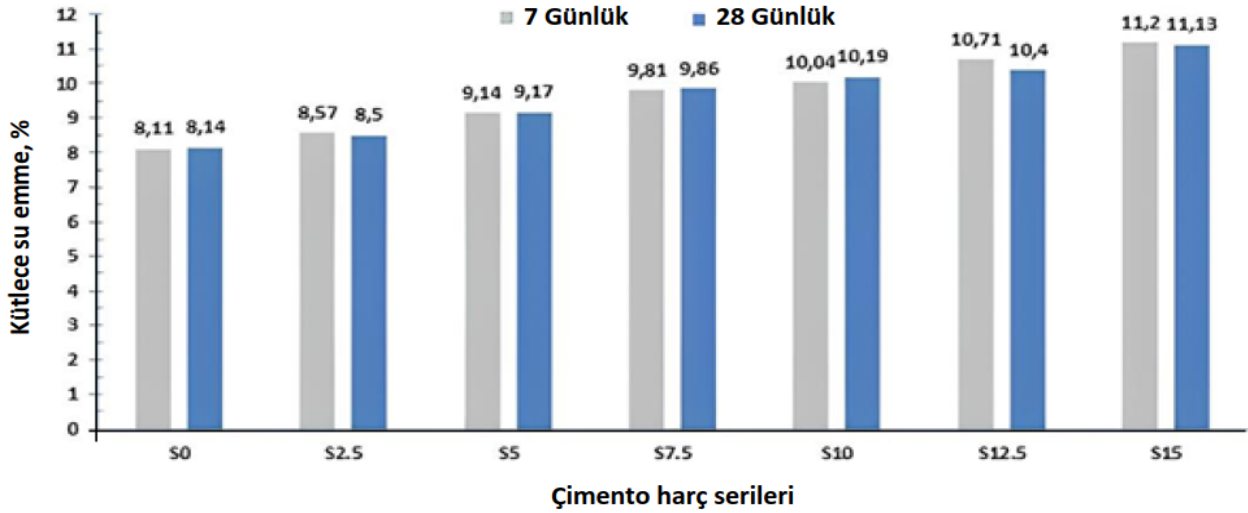
Tablo 5. Taze harç kıvamı için gerekli su ihtiyacı

Numune	Çimento (g)	Sepiyolit (g)	Kum (g)	Su (g)	s/b
S0	450.00	0.00	1350	225	0.50
S2.5	438.75	11.25	1350	230	0.51
S5	427.50	22.50	1350	234	0.52
S7.5	416.25	33.75	1350	243	0.54
S10	405.00	45.00	1350	250	0.56
S12.5	393.75	56.25	1350	256	0.57
S15	382.50	67.50	1350	264	0.59

Tablo 5'e göre sepiyolit ikame miktarlarının artması ile harcın su ihtiyacı artmaktadır. En fazla ve en az su ihtiyacı sırasıyla S15 numunesinde 264 gram ve S0 numunesinde 225 gram olarak elde edilmiştir.

3.4. Harçların Fiziksel Özellikleri

TS EN 12390-7, (2010)'a göre harç numunelerinin fiziksel özellikleri belirlenmiştir. 7 ve 28 günlük kür sonrasında prizmatik harçların kütlece su emme oranları Şekil 7'de verilmiştir.



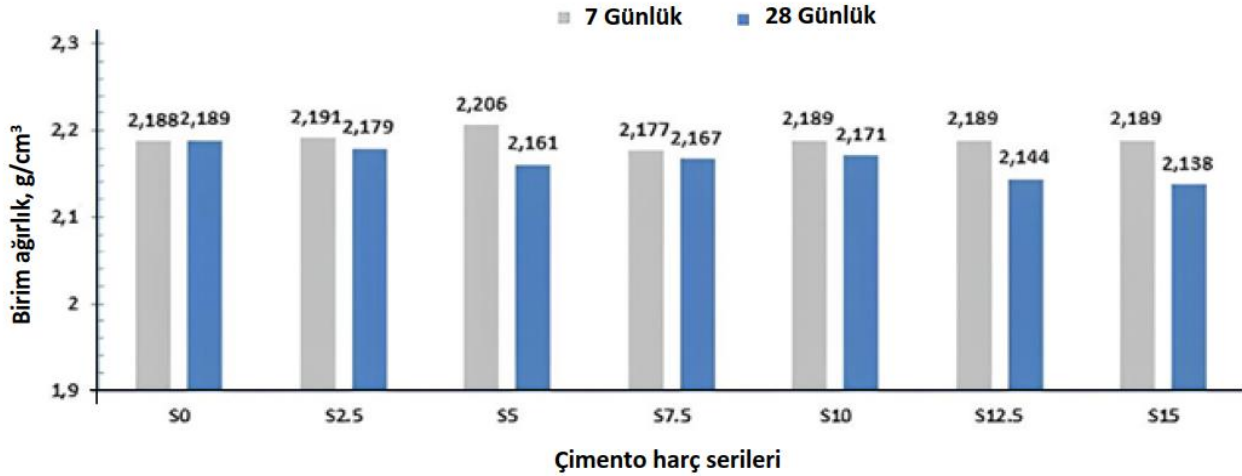
Şekil 7. Çimento harç numunelerinin kütlece su emme oranları

Şekil 7'ye göre 7 ve 28 günlük kür uygulanmış numunelerde en düşük ve en yüksek su emme miktarının sırasıyla S0 ve S15 numunesinde olduğu görülmüştür. Sepiyolit ikame miktarının

artmasıyla numunelerin su emme oranlarının arttığı ayrıca su emme oranı en düşük S0 olan referans örneğine en yakın değerler S2.5 numunesinde görülmüştür. Yüksek su ihtiyacına sahip sepiyolit kilinin büyük miktarlarda tamamlayıcı çimentolu malzemeleri olarak kullanımı, taze çimentolu sistemin işlenebilirliğini ve sertleşmiş durumda ise boşluk miktarı, mekanik dayanım, su geçirimsizliğini olumsuz yönde etkilediği için pratikte uygun olmamaktadır. Bunun yerine sepiyolit gibi killerin çimentolu karışımlara daha düşük oranlarda ilave edilmesi ile hem ekolojik çimento üretimi kriteri hem de hafif beton veya harç üretimlerine katkıda bulunabilir.

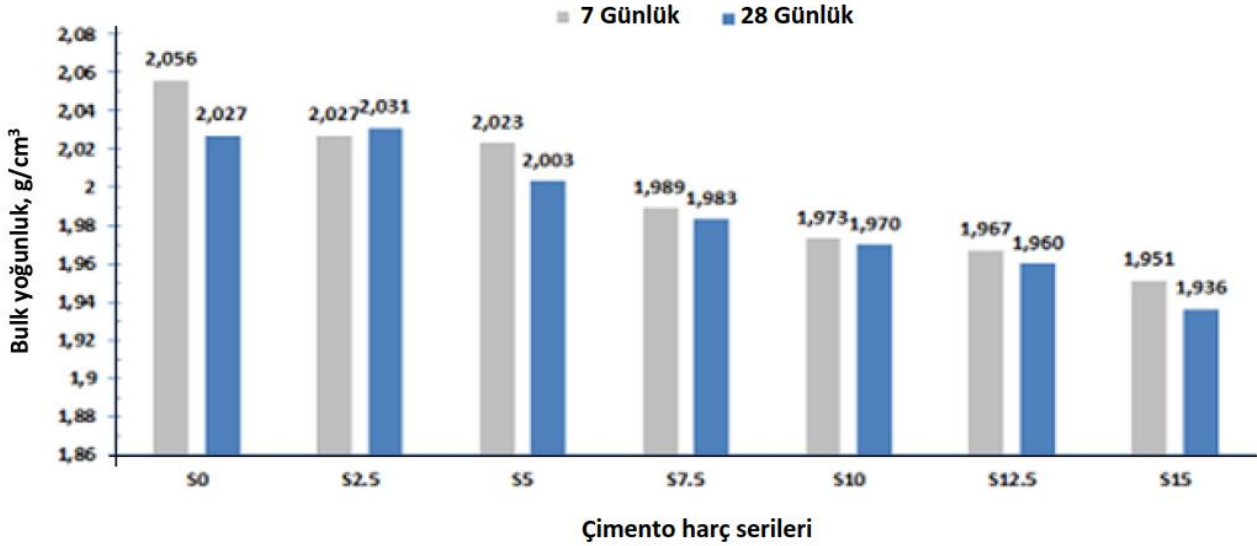
Demir (2016) çalışmasında %10, %20 ve %30 Eskişehir beyaz sepiyolit katkıli çimento harçlarında sepiyolit ikamesinin arttırılmasının genel olarak numunelerde su emilim miktarını arttırdığı belirlenmiştir. 7, 28 ve 56 günlük yaşlarda su emme oranının %0 referans harçlarına göre %10 sepiyolit katkıli olanlarda en az değişim gösterdiği; 56 günlük yaşlarda su emme oranının %0 ve %10 sepiyolit katkıli olanlara göre %20 ve %30 sepiyolit katkıli harçlarda yaklaşık olarak %200-250 civarında daha fazla olduğu belirtilmiştir. Bu durumun sepiyolit boşluklu yapısına bağlı su tutma özelliğinden kaynaklandığı ve dolayısıyla sepiyolit ikamesi artışının (örneğin S15) su emme değerlerinde artışa neden olduğu düşünülmektedir.

7 ve 28 günlük kür sonrasında prizmatik harçların birim ağırlık ve bulk (yığın) yoğunlukları sırasıyla Şekil 8 ve Şekil 9'da verilmiştir.



Şekil 8. Harç numunelerinin birim ağırlıkları (g/cm³)

Şekil 8'e göre tüm numunelerin birim ağırlıklarının birbirlerine çok yakın değerlerde olduğu görülmüştür. 7 günlük kür sonrasında birim ağırlık miktarlarının en yüksek ve en düşük değeri sırasıyla; S5 (2.206 g/cm³) ve S7.5 (2.177 g/cm³) numunesinde görülmüştür. 28 günlük kür sonrasında ise birim ağırlık miktarlarının en yüksek ve en düşük değeri sırasıyla; S0 (2.189 g/cm³) ve S15 (2.138 g/cm³) numunesinde görülmüştür.



Şekil 9. Harç numunelerinin bulk yoğunlukları (g/cm³)

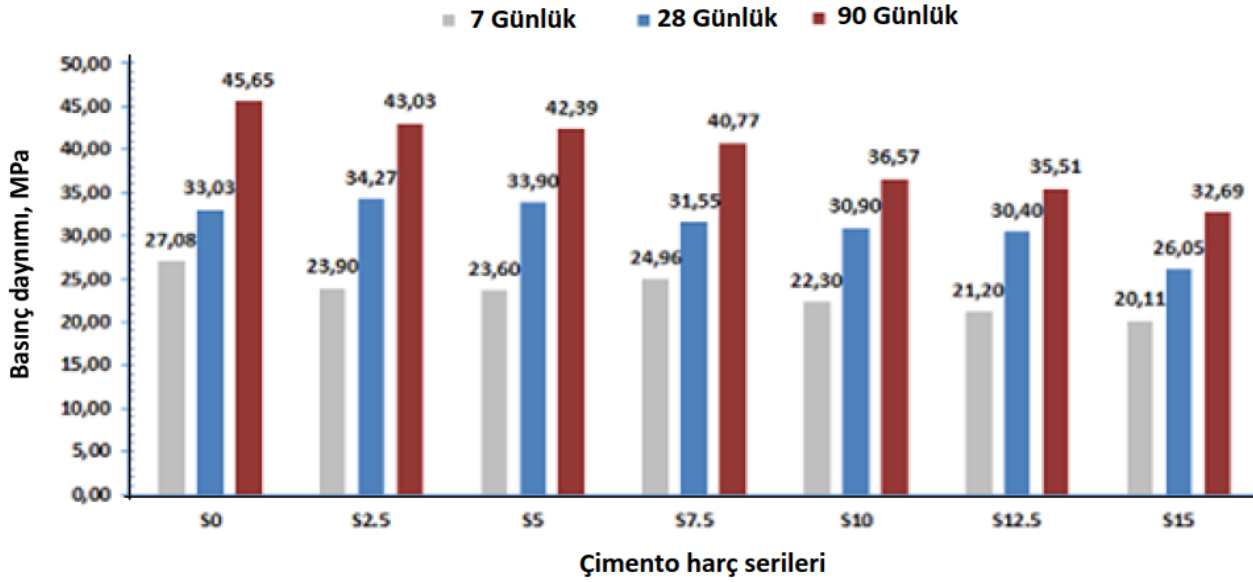
Şekil 9’da tüm numunelerin 7 ve 28 günlük kür sonrasında bulk (yığın) yoğunluğun sepiyolit ikame miktarının artmasıyla azalan bir eğilim göstermektedir. 7 günlük kür sonrasında bulk yoğunluk miktarlarının en yüksek ve en düşük değeri sırasıyla S0 (2.056 g/cm³) ve S15 (1.951 g/cm³) numunesinde görülmüştür. 28 günlük kür sonrasında bulk yoğunluk en yüksek ve düşük değeri sırasıyla S2.5 (2.031 g/cm³) ve S15 (1.936 g/cm³) numunesinde görülmüştür.

Demir (2016) tarafından %0 referans ve %10, %20,%30 sepiyolit ikameli harçlarda birim ağırlıklarının sırasıyla 2.19-2.26 g/cm³; 2.20-2.29 g/cm³ arasında olduğu bildirilmiştir. Üretilen harç serilerinin ileri yaşlarda kendi aralarında birim ağırlıklarının %2 arttığı, ancak %20 ve %30 sepiyolit katkılı harçların referans numunesine göre birim ağırlıklarının %1 oranında düştüğü bildirilmiştir. Bu durum çimento hidratasyonunun önemli derecede tamamlanması ve sepiyolit çimentoya göre daha düşük özgül ağırlık değerine sahip olması ile açıklanabilir.

3.5. Harçların Mekanik Özellikleri

7, 28 ve 90 günlük kür süreleri sonucunda TS EN 196-1, (2016)'ya göre harç numunelerinin basınç dayanımları Şekil 10’da verilmiştir.

Şekil 10’a göre harçların 7, 28 ve 90 günlük kür sonrası en yüksek ve en düşük basınç dayanım değerleri sırasıyla, S0 numunesinde (27.08 MPa) ve S15 numunesinde (20.11 MPa); S2.5 numunesinde (34.27 MPa) ve S15 numunesinde (26.05 MPa); S0 (45.65 MPa) ve S15 (32.69 MPa) olduğu görülmüştür.



Şekil 10. Harç numunelerinin basınç dayanımı sonuçları (MPa)

Kavas ve ark. (2004) tarafından %95 çimento+%5 alçı taşı içeren çimentolu karışıma sırasıyla %0, %3, %5, %10, %15, %20 ve %30 Eskişehir-Sivrihisar kahverengi sepiyoliti ikameli harçların 2, 7 ve 28 günlük basınç dayanımının en yüksek ve en düşük değerleri sırasıyla %10 sepiyolit, %85 çimento, %5 alçı taşı (20.7 MPa), %30 sepiyolit+%65 çimento +%5 alçı taşı (11.2 MPa); %10 sepiyolit+%85 çimento+%5 alçı taşı (34.5 MPa), %30 sepiyolit+%65 çimento+%5 alçı taşı (23.2 MPa) ve %10 sepiyolit+%85 çimento+%5 alçı taşı (44.9 MPa), %30 sepiyolit+%65 çimento+%5 alçı taşı (31.5MPa) numunede bulunmuştur. %10 sepiyolit ilavesi üzerinde çimento harçlarında basınç ve eğilme dayanım değerlerinin bozulma olduğu bildirilmiştir. Demir (2016) tarafından %10, %20 ve %30 Eskişehir beyaz sepiyolitli çimento harçlarının 7, 28 ve 56 günlük kür sonrası basınç dayanım değerleri sırasıyla 40.2 MPa, 47.02 MPa ve 47.83 MPa olarak elde edilmiştir. Sepiyolit katkılı harçların basınç dayanımlarının %0 referans numuneden daha düşük olduğu, sadece %10 sepiyolit ilaveli numunelerin 28 günlük kür sonrası basınç dayanımlarının referans numuneden daha yüksek olduğu görülmüştür. Bu çalışmada da tüm günlerde harçların basınç dayanımlarının sepiyolit ikame miktarı arttıkça azaldığı görülmektedir.

3.6. Donatılı Çimento Harçlarının Elektrokimyasal Korozyon Ölçümleri

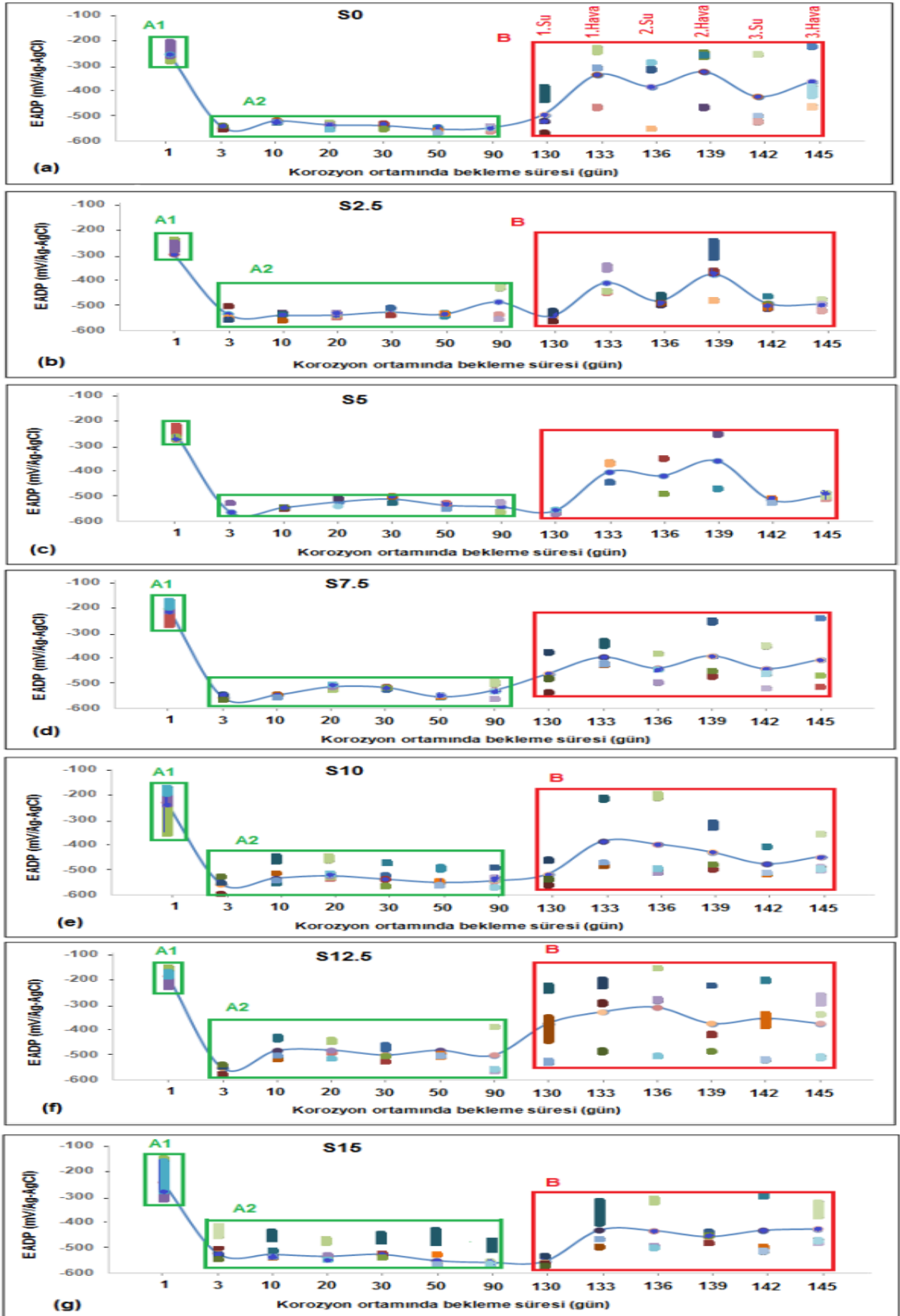
Çalışmanın bu aşamasında, sepiyolit katkılı çimento harcı numunelerinin mekanik ve teknolojik özelliklerinin yanı sıra, en önemli çevresel etkinin sodyum klorür olduğu deniz suyu ile etkileşime giren su yapılarındaki dayanıklılık sorunları da araştırılmıştır. Bu nedenle deniz suyu çevresel etkilerine benzer bir ortamda korozyon ölçümleri yapabilmek için 21 adet Ø50x100 mm silindirik harç numunesi %3,5'lük NaCl korozif çözeltisinde bekletilmiştir. Çevresel etkilerin değişimine bağlı

olarak gelişen donatı çeliği korozyonu, yarı hücre potansiyeli yöntemi, kulometri ve doğrusal polarizasyon direnci yöntemleri kullanılarak iki aşamada ("A" ve "B") incelenmiştir.

A: Betonarme çimento harcı numunelerinin 130 gün süre ile serbest korozyon ortamında, %3,5 NaCl içeren sulu ortamda bekletilmesiyle elde edilen potansiyel değerleri, A koşulunda, başlangıç (1. gün "A1") ve dengeye gelme (3-90. günler "A2") koşullarında değerlendirilmiştir.

B: Takviyeli çimento harcı numuneleri 130. günün sonunda %3,5 NaCl içeren sulu ortamdan çıkarıldıktan sonra 3 gün açık havada bekletilmiş ve ardından tekrar 3 gün daha %3,5 NaCl içeren sulu ortama daldırılmıştır. Bu şekilde donatının çevresel etki değişimi (su gelgiti etkisi) altında korozyon davranışını incelemek amacıyla bu işlem 130. ile 145. günler arasında 3 çevrim halinde gerçekleştirilmiştir.

Yarı hücre potansiyel yöntemi: Bu yöntemde, farklı oranlarda sepiyolit katkısı ile üretilen donatılı çimento harcı numunelerinin %3,5 NaCl ortamında 145 günlük süre içerisinde belirli günlerde ve farklı durumlarda ölçülen potansiyel değerlerindeki değişimlere ait veri dağılım grafikleri Şekil 11'de sunulmaktadır. Buna göre "A1" durumu numunelerin tuzlu su çevresel etkisinde başlangıç, "A2" durumu tuzlu su ortamındaki bekleme süresi içinde çimento harcı-donatı ara yüzeyinde denge durumundaki, "B" durumu ise çevresel etkinin korozyon davranışına etkisini incelemek için elde edilen potansiyel saçılmalarına ait verilerdir. Bu grafiklerdeki değerlere ve veri saçılma genişliklerine göre, özellikle donatılar için en tehlikeli olan kararsız lokalize (çukurlaşma) korozyon durumları karşılaştırılmıştır.

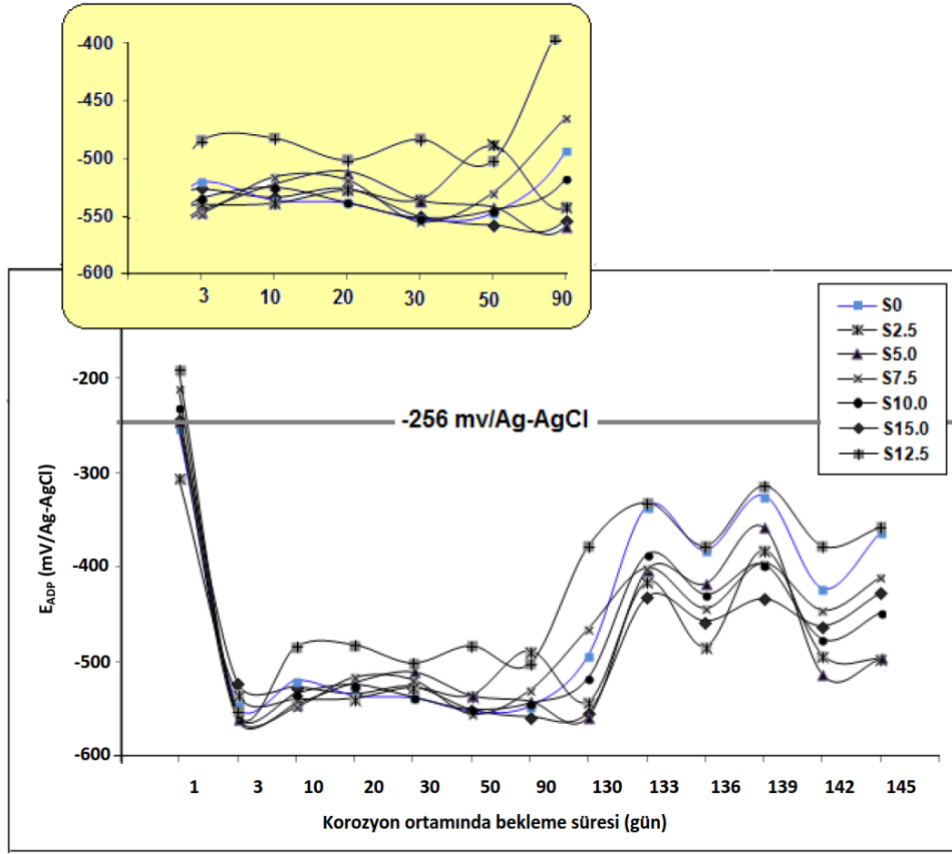


Şekil 11. Donatılı çimento harç numunelerinin 145 günlük açık devre potansiyelleri (a) S0 (b) S2.5 (c) S5 (d) S7.5 (e) S10 (f) S12.5 (g) S15

Şekil 11’de donatı korozyonu başlangıç evresinde (“A1” durumu 1. günde) potansiyel değişimlerinin tüm numunelerde geniş saçılmalara sahip olması sistemin dengede olmayan reaksiyon kinetiğine aittir. (Şekil 11). Korozyon reaksiyon kinetiği göre ara yüzeydeki potansiyel farklarının ilk koşullara göre artışı korozyon hızının artmasına işaret etmektedir.

Sadece potansiyelin pozitif değerlere kayması ile korozyon mekanizmasının açıklanması yanıltıcı olabilmektedir. Elektrokimyasal bulgulardaki titreşimlerin frekans ve genlik artması zayıf bölgelerde korozyonun lokal olarak artmasına yani yüzey filminin kesikli duruma gelmesine işaret etmektedir. Bu nedenle donatı için pasifleşmeye bağlı artan lokal korozyon riski olabilir. Metalik malzemelerin ara yüzeyinde oluşan bu tür korozyon davranışını, Tafel ekstrapolasyon yöntemine göre elde edilen parametrelerle açıklamak yanıltıcı sonuçlar verebileceği için yeterli olmamaktadır (Vedalakshmi ve ark., 2009).

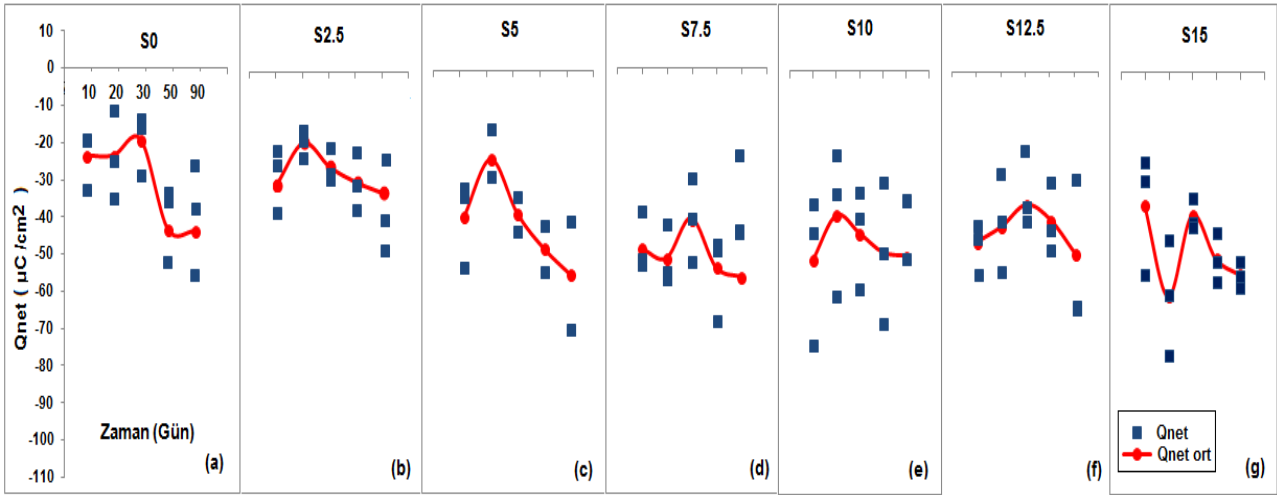
Bir numunede başlangıçta korozyon hızı yüksek olsa bile yüzeyde düzgün, dirençli ve koruyucu bir oksit filmi oluşması durumunda aynı hızla devam etmeyebilir. Bu çalışmanın 1.gününde ("A1") ölçülen potansiyeller, yüzeydeki suyun çimentolu sisteme işleme süresine bağlı korozyon aktivitesi ayrıca ara yüzeylerdeki oksit, hidroksit ve klorür oluşma ve bozunma hızları gibi değişkenlere de bağlıdır. Bu nedenle su işleme süreleri tüm numunelerde birbirine eşit bile olsa ölçülen ADP değerleri donatı korozyon özelliklerini doğru olarak yansıtmaz. Şekil 11’de tüm numunelerin E_{ADP} potansiyelleri 3-90. günlerde ("A2") denge durumunda değerlendirildiğinde S0, S2.5, S5, S7.5, S10, S12.5 ve S15 numunelerin potansiyel farklarının 42-80 mV arasında değiştiği bulunmuştur. Çevresel etkilerdeki değişimin numunelerin korozyon davranışına yansımalarını araştırmak amacıyla ıslatma-kurutma koşulları üç kez üst üste döngü şeklinde değiştirildi. 130-145. günlerde ölçülen su ve havadaki potansiyel farklarının (B), sudaki potansiyel farklarına ("A2") kıyasla daha geniş bir aralıkta (64-206 mV) olduğu görüldü. Bu farklar, numunelerdeki çevresel etkilerdeki değişime bağlı olarak korozyon davranışındaki değişimden kaynaklanmaktadır. Çimentolu sistemlerde, 10 güne kadar korozyon ortamında tutulan donatıların açık devre potansiyellerinin -250 ile -150 mV arasında pasif durumda olduğu görülmektedir. 30 günden fazla korozyon ortamında tutulan numunelerde, açık devre potansiyelleri -400 ile 600 mV arasında daha geniş bir değişim aralığına sahiptir. Yaklaşık 90 gün korozyon ortamında tutulan donatıların açık devre potansiyelleri -450 ile -550 mV arasında daha kararlı bir değişim aralığı göstermektedir (Pourbaix, 1974; Yoon-Seok ve ark., 2006).



Şekil 12. Donatılı çimento harç numunelerinin 145 günlük ortalama açık devre potansiyelleri

Şekil 12’de 3.gün ve sonrasında numunelerin tümünde potansiyeller -256 mV/Ag-AgCl ASTM C 876-22B, (2022) sınır değerinden negatife doğru kaydığı görülmektedir. Bu nedenle, sepiyolit katkısının donatı korozyonuna olan etkisini belirlemek için yalnızca açık devre potansiyeli ölçümleri yeterli değildir. Yarı hücre potansiyeli yöntemi korozyon çalışmalarında önemli bir yere sahiptir. Fakat çimentolu sistemlerin ara yüzelerindeki (çimento harcı-donatı) kimyasal ortam değişim gösteriyorsa, oksit filminin büyümesi durumu ortaya çıkmaktadır. Böylece çok tehlikeli bir korozyon türü olan lokal (çukurlaşma) korozyonu zamanla korozyon ortamındaki malzemede meydana gelir. Lokal korozyon oluşumunda ise korozyon akımında ve korozyon direncinde önemli bir değişiklik olmadan sinsi gelişir. Bu nedenle korozyon davranışının zaman içinde farklı elektrokimyasal ölçüm yöntemleri ile çok yönlü olarak incelenmesi gerekmektedir.

Kulometrik yöntem: Kulometrik uygulamalarda sabit gerilim altında ölçülen akım değerleri, Faraday Kanununa ($Q=i \times t$) göre korozyon hızını ifade etmektedir. Tüm numuneler için kulometrik ölçümlerden elde edilen açık devre potansiyelindeki net korozyon yükleri (Q_{net}) dağılım grafikleri düzenlenmiştir. Şekil 13’de korozyon ortamında bekletilen tüm numunelerin 10-90. günlerinde (A2) yüzeydeki korozyon yükleri (açık devre potansiyelinde) verilmiştir. Buna göre numunelerin tümünde katodik korozyon aktivitelerinin farklı büyüklüklerde ve S2.5 numunesinde en küçük ayrıca kontrol numunesine benzer özellikte olduğu görülmektedir.

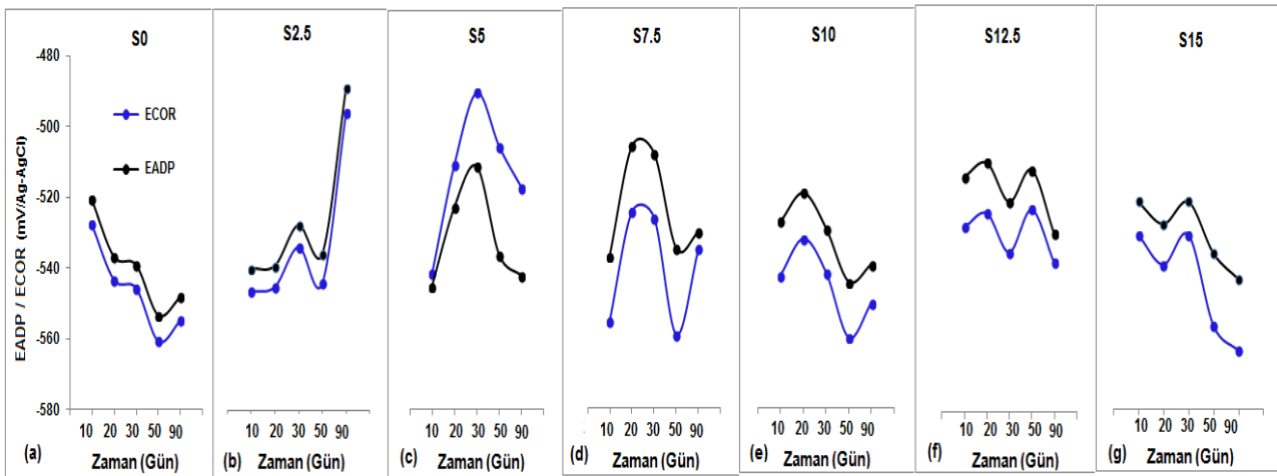


Şekil 13. Donatılı çimento harç numunelerinin tuzlu suda 90 günlük ("A2") korozyon yükleri (a) S0 (b) S2.5 (c) S5 (d) S7.5 (e) S10 (f) S12.5 (g) S15

Tüm numunelerde Şekil 13'de görülen katodik yük değerleri, çimento harcı/donatı ara yüzlerinde oksijen indirgenmesinin hızlandığına yani çimentolu sistem içerisinde lokal korozyonu başlatan porozite artışına işaret etmektedir. S7.5, S10, S12.5 ve S15 numunelerde zaman içinde katodik yük değerlerinin büyümesi çimentolu sistemde porozitenin artışına işaret etmektedir.

Lineer polarizasyon direnci yöntemi: Tahribatsız elektrokimyasal yöntemlerden olan bu ölçümler donatının korozyon direncini belirlemek için kullanılmaktadır. Çalışma elektrodunun akım-potansiyel eğrileri, açık devre potansiyelinin ± 10 mV aralığında elde edilmiştir ve korozyon potansiyeli (E_{COR}) bulunmuştur (Taban, Pehlivan, 2010).

Farklı oranlarda sepiyolit içeren donatılı çimento harç numunelerinin Şekil 14' de A2 durumunda lineer polarizasyon direnci ve yarı hücre potansiyel yöntemine göre belirlenen sırasıyla korozyon potansiyelleri (E_{COR}) ve açık devre potansiyelleri (E_{ADP}) aynı grafik üzerinde verilmiştir.



Şekil 14. Donatılı çimento harç numunelerinin tuzlu suda 90 günlük (A2) açık devre potansiyelleri ve korozyon potansiyelleri (a) S0 (b) S2.5 (c) S5 (d) S7.5 (e) S10 (f) S12.5 (g) S15

Açık devre potansiyellerinin (E_{ADP}), korozyon potansiyellerine (E_{COR}) yakın değerler alması sistemin elektrokimyasal olarak dengeye geldiğini ve doğrulanabilir ölçümler alınabildiğini göstermektedir. Bu çalışmada 10. günden sonra açık devre potansiyellerinin korozyon potansiyellerine yakın değerler aldığı görülmektedir. E_{ADP} ve E_{COR} değerinin çakışmaması durumu ise lokal korozyon reaksiyonlarında aktifleşme olasılığının arttığını düşündürmektedir.

Şekil 14’de benzer özellik gösteren S0 ve S2.5 numunelerde tuzlu suda kalma süresi artışına bağlı potansiyellerin daha pozitif değerlere kaydığı, E_{ADP} ve E_{COR} değerlerinin çakışmasına rağmen diğer katkılı numunelerde bu durumunun oluşmadığı görülmektedir. Bu durum yukarıda açıklandığı gibi sistemin dengede olmadığı yani lokal korozyon aktifliğinin artabileceğinin bir göstergesi olabilmektedir.

4. Sonuçlar ve Öneriler

Çimento esaslı sistemlerin üretiminde kullanılan sepiyolit kiline uygulanan XRD analizi sonucu safsızlığın, dolomit miktarının fazlalığı ve sepiyolit miktarının %50 altında kaldığından dolayı düşük kaliteli sepiyolit olduğu belirlenmiştir.

Çimento hamurlarında standart kıvam için gereken minimum su ihtiyacının S0 numunesinde olduğu, sepiyolit ikamesinin artmasıyla standart kıvam için gereken su ihtiyacının arttığı gözlenmiştir. S2.5 ve S15 numunelerinde standart kıvam için su ihtiyacı sırasıyla % 27.5 ve %32.4 olarak belirlenmiştir. Hazırlanan sepiyolit katkılı ve katkısız çimento hamurları içerisinde en erken priz başlangıcı ve bitişi S5, en geç priz başlangıcı S15, en geç priz bitişi ise S0 numunesinde elde edilmiştir.

Taze çimento harçlarının en fazla ve en az su ihtiyacı sırasıyla S15 numunesinde 264 gram ve S0 numunesinde 225 gram olduğu belirlenmiştir. Çimento harçlarında s/b oranı S0 ve S15 numunelerinde sırasıyla 0.50 ve 0.59 olarak bulunmuştur.

Prizmatik harçların 7 ve 28 günlük kütlece su emme miktarlarının en düşük ve en yüksek değerleri sırasıyla S0 ve S15 numunesinde görülmüştür. Sepiyolit ikame miktarı arttıkça numunelerin su emme oranları artmakta, su emme oranı en düşük olan ve referans numuneye en yakın değeri veren numunenin ise S2.5 numunesi olduğu görülmüştür. Harç numunelerinin 7 ve 28 günlük birim ağırlık miktarları içerisinde en yüksek ve en düşük değere S5 (2.206 g/cm³), S7.5 (2.177 g/cm³); S0(2.206 g/cm³), S15 (2.138 g/cm³) numunesinin sahip olduğu görülmüştür. Aynı koşullarda en yüksek ve en düşük bulk yoğunluk miktarının sırasıyla S0 (2.056 g/cm³), S15 (1.951 g/cm³); S2.5(2.031 g/cm³), S15 (1.936 g/cm³) olduğu görülmüştür.

Harç prizmaları üzerinde 7, 28, 90 günlük basınç dayanımlarının en yüksek ve en düşük değerlerinin sırasıyla S0 (27.08 MPa), S15 (20.11 MPa); S2.5 (34.27 MPa), S15 (26.05 MPa); S0 (45.65 MPa), S15 (32.69 MPa) olduğu görülmüştür. 90 günlük harçlarda referans numunesinin basınç dayanımı değerine en yakın değer S2.5 numunesinde 43.03 MPa olarak bulunmuştur. Genel olarak sepiyolit ikame miktarındaki artışın basınç dayanımı değerlerini düşürdüğü gözlemlenmiştir.

3-90. günlerde (A2) denge durumunda tüm numunelerde potansiyel farklarının (E_{ADP}) 42-80 mV arasında değiştiği bulunmuştur. Numunelerde korozyon davranışı üzerine çevresel etki değişimini incelemek için 130-145. günlerde ölçülen suda ve havada (B) potansiyel farklarının daha geniş bir aralıkta olduğu (64-206 mV) görülmüştür. Korozyon ortamında bekletilen tüm numunelerin 10-90. günlerde A2 durumunda katodik aktivitenin S2.5 numunesinin en küçük, 10. günden sonra E_{ADP} ve E_{COR} değerlerinde S0 ve S2.5 numunelerinde çakışma olduğu görülmektedir.

Sepiyolit su emme oranının ve boşluklu yapısının fazla olmasından dolayı özellikle korozyona maruz kalan yapılarda çimento yerine ikame edilecek oranın %5'i geçmemesi önerilmektedir. Daha yüksek oranlarda kullanımı ise sepiyolit düşük yoğunluğundan dolayı hafif beton üretimlerinde tercih edilmesi önerilmektedir. Killerin esas olarak fillosilikatlar, kuvars, karbonatlar vb. içerdiği bilinmektedir. Puzolanik reaktivite esas olarak fillit minerallerine bağlı olduğundan, dehidroksilasyon oranı dikkate alınmalıdır. Dehidroksilasyon genellikle kilden kile değişen termal işleme sağlanır (Mohammed, 2017). Bu çalışmada kullanılan sepiyolit kili, termal işlem yapılmadan çok az miktarda çimentoya eklenmiş ve donatı korozyonu üzerindeki etkileri incelenmiştir. Termal işlem sonrası bu killerin daha yüksek miktarda çimento karışımlarında kullanılma olasılığı da araştırılabilir.

Yazarların Katkısı

Bu çalışma Kilis 7 Aralık Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Mahmut AYTEKİN'in Dr. Öğr. Üyesi Hadaan PEHLİVAN danışmanlığında yürüttüğü yüksek lisans tez çalışması kapsamında üretilmiştir.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Kaynaklar

- Allo, W.A. and Murray, H.H. (2004). Mineralogy, chemistry and potential applications of a white bentonite in San Juan province. *Applied Clay Science*, 25, 237-243. <https://doi.org/10.12691/jgg-10-3-5>
- Anonim (2018). <http://yerbilimleri.mta.gov.tr/anasayfa.aspx>, (Erişim tarihi: 25.06.2018).
- ASTM C187-23 (2023). Standard Test Method for Normal Consistency of Hydraulic Cement. American Society for Testing and Materials. USA.
- ASTM C618-23E01 (2023). Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Uses as a Mineral Admixture in Portland Cement Concrete. American Society for Testing and Materials. USA.
- ASTM C876-22B (2022). Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete. American Society for Testing and Materials. USA.
- Brindley, G. W., and Pedro, G. (1972). Report of the AIPEA Nomenclature Committee. AIPEA Newsletter No.7, 8-1.
- Çullu, M., Subaşı, S., Yıldız, K. (2007). Uçucu Kül İçerisindeki Cao ve Mgo'nun Çimento Genleşmesine ve Mekanik Özelliklerine Etkisi. *UMES 07 Ulusal Teknik Eğitim, Mühendislik ve Eğitim Bilimleri Genç Araştırmacılar Sempozyumu*, 20-22 Haziran, Kocaeli.
- Demir, A. (2016). Sepiyolitli Harçların Mekanik ve Fiziksel Özelliklerinin İncelenmesi. *International Multidisciplinary Congress of Euroasia, Electronic Journal of Vocational Colleges*.
- Erdoğan, T.Y. (2013). *Beton*. ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş., Ankara.
- Ersever Angur, G. (2016). *Çimento Esaslı Yapıştırıcı Harçlarda Sepiyolit Katkılı Malzeme Geliştirilmesi*. Doktora Tezi, Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kütahya.
- Gel, M. K. (2003). Betonarme Yapılarda Donatıların Korozyonu ve Su Yalıtımı. *Türkiye Mühendislik Haberleri*, Sayı 427-5.
- Glocker, E. F. (1847). *Generum et Specierum Mineralium Secundum Ordines Naturales Digestorium Synopsis*, Halle.
- Haberal, Y. (2010). *Uçucu Küllü Betonlarda Klor İyonu Geçirgenliğinin ve Donatı Korozyonunun İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- İrkeç, T. (1996). Lületaş, Tabakalı Sepiyolit, Atapulgit (Paligorskit). DPT VII. Beş Yıllık Kalkınma Planı Özel İhtisas Komisyonu, Diğer Endüstri Mineralleri Çalışma Grubu Raporu, Cilt 1, Yayın No: DPT 2421 ÖİK: 480, pp. 5-35, Ankara.
- Karabulut, H.A., ve Kalpaklı, Y. (2022). Sepiyolit Cevherinin Genel Özellikleri ve Isıl Davranışı. *Konya Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 10(1), 249-273. <https://doi.org/10.36306/konjes.1040430>
- Karataş, D. (2011). *Sepiyolit Kiline Kuvaterner Amin Surfaktanlarının Adsorbsiyonunun Deneysel ve Teorik Olarak İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Kavas, T., Sabah, E., and Çelik, M.S. (2004). Structural Properties of Sepiolite-Reinforced Cement Composite. *Cement and Concrete Research*, 34 (11), 2135-2139. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.03.015>
- Kaya, T., Karakurt, C., ve Bayazit, Y. (2015). Kalsine Edilmiş Bentonitin Çimento Harçlarında Puzolanik Katkı Maddesi Olarak Kullanılabilirliği. *2nd International Sustainable Building Symposium*, Ankara.
- Khandelwal, S., and Rhee, K.Y. (2022). Evaluation of pozzolanic activity, heterogeneous nucleation, and microstructure of cement composites with modified bentonite clays. *Construction and Building Materials*, 323, 126617. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126617>
- Mohammed, S. (2017). Processing, Effect And Reactivity Assessment of Artificial Pozzolans Obtained from Clays and Clay Wastes: A Review. *Construction and Building Materials*, 140 (1), 10-19. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.078>
- Nagy, B., and Bradlet, W.F. (1955). The Structural Scheme of Sepiolite. *American Mineralogist*, 40(9-10), 855-892.
- Pehlivan, H. (2023). Kalsine Kil Katkılı Çimento Harçlarının Üretiminde Nano Silika Kullanımının Araştırılması. *Euroasia Journal of Mathematics, Engineering, Natural & Medical Sciences International Indexed and Refereed*, 10 (28), 1-12. <https://doi.org/10.5281/zenodo.8189315>
- Pourbaix, M. (1974). *Atlas of Electrochemical Equilibria*. Texas, USA: NACE International Cebelcor Houston.
- Taban (Pehlivan), H. (2010). *Farklı Oranlarda Zeolitik Tüf Katkısının Beton Özellikleri ve Betonarme Çeliği Korozyonuna Etkilerinin Araştırılması*. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 12390-7, (2010). Beton - Sertleşmiş Beton Deneyleri - Bölüm 7: Sertleşmiş Beton Yoğunluğu Tayini. TSE, Ankara.

- TS EN 196-1, (2016). Çimento Deney Metotları- Bölüm 1: Dayanım Tayini. TSE, Ankara.
- TS EN 197-1, (2012). Çimento Bölüm 1:Genel Çimentolar-Bileşim, Özellik ve Uygunluk Kriterleri. TSE, Ankara.
- Vedalakshmi, R., Manoharan, S.P., Ha-Won Song, and Palaniswamy, N. (2009). Application of Harmonic Analysis in Measuring The Corrosion Rate of Rebar in Concrete. *Corrosion Science*, 51 (11), 2777-2789. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2009.07.014>
- Yoon-Seok, C., Jung-Gu K., and Kwang-Myong L., (2006). Corrosion Behavior of Steel Bar Embedded in Fly Ash Concrete. *Corrosion Science*, 48 (7), 1733-1745. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2005.05.01>
- Zongjun, L. (2011). *Advanced Concrete Technology*. John Wiley & Sons, Inc., Print ISBN:9780470437438.