

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ**



**DEĞİŞİK ORANLARDA METALİK KARAKTERDE AGREGA İÇEREN
HARÇLARIN ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

Tolga Ziya KOCAER

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS

HAZİRAN 2020

ANTALYA

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ**



**DEĞİŞİK ORANLARDA METALİK KARAKTERDE AGREGA İÇEREN
HARÇLARIN ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

Tolga Ziya KOCAER

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HAZİRAN 2020

ANTALYA

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**DEĞİŞİK ORANLARDA METALİK KARAKTERDE AGREGA İÇEREN
HARÇLARIN ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

**Tolga Ziya KOCAER
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS**

**Bu tez Akdeniz Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Proje Birimi tarafından FYL-
2019-4438 nolu proje ile desteklenmiştir.**

HAZİRAN 2020

ÖZET

DEĞİŞİK ORANLARDA METALİK KARAKTERDE AGREGA İÇEREN HARÇLARIN ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Tolga Ziya Kocaer

Yüksek Lisans, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Niyazi Uğur KOÇKAL

Haziran 2020; 57 sayfa

Araştırmada iki farklı cüruf, silis dumanı, çimento ve paslanmaz çelik atık harçların bileşenleri olarak kullanılmıştır. Farklı karışım tasarımları kullanılarak birçok numune hazırlanmış ve bu numuneler üzerinde bağlayıcı tipi ve metal karakterli atık gibi faktörlerin etkisini incelemek amacıyla fiziksel ve mekanik özellikleri tayin edecek bir seri deneyler gerçekleştirilmiştir. Bulgular ışığında atıkların, harçların özelliklerine ne ölçüde katkıda bulunduğu saptanmış ve mikroyapı incelemelerinin de katkısıyla sebepleri araştırılmıştır. Silis dumanının ince ve özgül yüzey alanı büyük olduğu için çimentoya göre boşluklu yapıları doldurmada daha etkin bir davranış sergilemiştir. Dayanımda iyileşme yönünden silis dumanının etkisi gözle görülür bir şekilde vuku bulmuştur.

Literatürde atık malzemeler ile birçok çimento esaslı kompozitler üretilmiştir ve etkileri deneyler ile saptanmıştır. Bu çalışmanın özgünlüğü ise, aynı yerden temin edilen farklı kimyasal içeriğe sahip olan cürufların harç üzerindeki fiziksel ve mekanik etkilerinin incelenmesidir.

Atık malzemelerin yeniden değerlendirilerek, yeni kullanım alanlarının meydana gelmesi ve üretimde maliyetleri düşürmesi endüstrinin desteklemesi yönünden umut vaat etmektedir.

ANAHTAR KELİMELEER: Cüruf, Dayanım, Fiziksel özellikler, Harç, Paslanmaz çelik atığı, Silis dumanı, Sürdürebilirlik

JÜRİ: Prof. Dr. Niyazi Uğur KOÇKAL

Prof. Dr. Hasan Erdem Çamurlu

Doç Dr. Turhan BİLİR

ABSTRACT

INVESTIGATION OF PROPERTIES OF AGGREGATE CONTAINING MORTARS AT DIFFERENT PROPERTIES OF METALLIC CHARACTER

Tolga Ziya Kocaer

MSc Thesis in Civil Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Niyazi Ugur KOCKAL

June 2020; 57 pages

In this research, two different slags, silica fume, cement and stainless steel wastes were used as components of mortars. Many samples were prepared by using different mix designs and a series of experiments were carried out to determine the physical and mechanical properties of these samples in order to investigate the effects of binder type and metal character. In the light of the findings, it was determined to what extent the wastes contributed to the properties of the mortars and the reasons of the microstructure studies were investigated. Since silica fume has a thin and specific surface area than cement, it has shown more effective behavior in filling pores. The effect of silica fume has been noticeable in terms of improvement in strength.

Many cement based composites and waste materials have been produced in the literature and their effects have been determined by experiments. The originality of this study is to investigate the physical and mechanical effects of slag having different chemical content obtained from the same place on the mortar.

It is promising for the industry to support the recycling of waste materials, the emergence of new areas of use and the reduction in production costs.

KEYWORDS: Mortar, Physical properties, Silica fume, Slag, Stainless steel waste, Strength, Sustainability

COMMITTEE: Prof. Dr. Niyazi Uğur KOÇKAL

Prof. Dr. Hasan Erdem Çamurlu

Assoc. Prof. Dr. Turhan BİLİR

ÖNSÖZ

Tezin her aşamasında kıymetli düşünceleri ve önerilerini esirgemeyen, sevgili hocam ve tez danışmanım Prof. Dr. Niyazi Uğur KOÇKAL’a teşekkür ederim.



İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
ÖNSÖZ	iii
İÇİNDEKİLER	iii
AKADEMİK BEYAN	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ	xi
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK TARAMASI	3
3. MATERYAL ve METOT	7
3.1. Karışımların Hesaplanması ve Hazırlanması	7
3.2. Agreganın Su Emme Miktarı Tayini	9
3.3. Agregaların Tane Büyüklüğü Dağılımı Tayini	10
3.4. Harçlardaki Malzemelerin Kristal Yapıları ve Kimyasal Kompozisyonları	10
3.5. Agregaların Birim Hacim Ağırlık ve Taneler Arası Boşluk Miktarı Tayini	10
3.6. Akma Tablası Deneyi	11
3.7. Taze Harçlarda Birim Hacim Kütle ve Hava Miktarının Ağırlık Yöntemiyle Tayini.....	12
3.8. Sertleşmiş Harcın Su Emme Miktarı, Kuru Birim Ağırlık, Görünür Birim Ağırlık ve Görünür Boşluk Oranı Tayini	12
3.9. Kılcal Su Geçirimsizlik Deneyi	13
3.10. Eğilme Dayanımı Tayini	13
3.11. Basınç Dayanımı Tayini	14
3.13. Elastisite Modüllerinin Tayini	14
3.14. SEM Görüntüleri ve EDX Analizi	15
4. BULGULAR ve TARTIŞMA.....	16
4.1. Özgül Ağırlık Tayini ve Agregaların Birim Hacim Ağırlıkları	16
4.2. Agregaların Tane Dağılımı.....	17
4.3. XRD ve XRF Sonuçları.....	18
4.4. Taze Harçların Yüzdece Hava Miktarı Tayini	22

4.5. Taze Harçların Yayılma Çapları.....	23
4.6. Sertleşmiş Harçların Su Emme Miktarı, Kuru Birim Ağırlık, Görünür Birim Ağırlık, Görünür Boşluk Oranı Tayini	24
4.7. Sertleşmiş Harçların Kılcal Su Emme Katsayısı Tayini	31
4.8. Sertleşmiş Harçlarda Eğilme Dayanımı Tayini	35
4.9. Sertleşmiş Harçlarda Basınç Dayanımı Tayini	38
4.10. Sertleşmiş Harçlarda SEM Görüntüleri ve EDX Sonuçları	44
5. SONUÇLAR	53
6. KAYNAKLAR	55
ÖZGEÇMİŞ	



AKADEMİK BEYAN

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Değişik oranlarda metalik karakterde agregata içeren harçların özelliklerinin araştırılması” adlı bu çalışmanın, akademik kurallar ve etik değerlere uygun olarak yazıldığını belirtir, bu tez çalışmasında bana ait olmayan tüm bilgilerin kaynağını gösterdiğimi beyan ederim.

26.../06.../2020

Öğrencinin Adı Soyadı

Tolga Ziya KOCABİ

İmzası

Tolga Ziya

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

Al_2O_3 : Alüminyum oksit

CuO : Bakır II oksit

ZnO : Çinko oksit

dk : Dakika

FeS : Demir sülfür

FeO : Demir II oksit

Fe_2O_3 : Demir III oksit

dm : Desimetre

GPa : Gigapaskal

g : Gram

CaO : Kalsiyum oksit

CaS : Kalsiyum sülfür

CO_2 : Karbon dioksit

kg : Kilogram

MgO : Magnezyum oksit

MnO : Mangan oksit

MnS : Mangan sülfür

Mg : Megagram

MPa : Megapaskal

m : Metre

sn : Saniye

$^{\circ}\text{C}$: Santigrat derece

cm : Santimetre

SiO_2 : Silisyum dioksit

Tez metni içerisinde ondalık sayıların gösterimi “nokta” kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Kısaltmalar

ASTM : American Society for Testing and Materials

EN : Avrupa Birliği

CEM : Çimento

EAF : Elektrikli ark ocağı fırını

C-S-H : Kalsiyum-Silikat-Hidrat

SEM : Taramalı elektron mikroskobu

TBH : Taze birim hacim

TS EN : Türkiye Standartları Enstitüsü

XRD : X ışını difraktometresi

XRF : X ışını floresans analizi

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 4.1. Paslanmaz çelik atığının elek analizi grafiği	17
Şekil 4.2. 1. ve 2. cürufun elek analizi grafiği	18
Şekil 4.3. Harçlarda kullanılan silis dumanının XRD analizi	20
Şekil 4.4. Harçlarda kullanılan 1. cürufun XRD analizi (Gülmez, 2018).....	21
Şekil 4.5. Harçlarda kullanılan 2. cürufun XRD analizi	22
Şekil 4.6. 28 ve 90 günlük 1. serinin yüzde su emme ve görünür boşluk oranları.....	27
Şekil 4.7. 28 ve 90 günlük 1. serinin kuru birim ağırlık ve görünür birim ağırlık değerleri.....	28
Şekil 4.8. 28 ve 90 günlük 2. serinin yüzde su emme ve görünür boşluk oranları.....	30
Şekil 4.9. 28 ve 90 günlük 2. serinin kuru birim ağırlık ve görünür birim ağırlık değerleri.....	31
Şekil 4.10. 1S serisi harçların eğilme dayanımı değerleri	37
Şekil 4.11. 2S serisi harçların eğilme dayanımı değerleri	38
Şekil 4.12. 28 günlük 1 serisi harçların gerilme–birim şekil değiştirme değerleri	40
Şekil 4.13. 90 günlük 1 serisi harçların gerilme–birim şekil değiştirme değerleri	40
Şekil 4.14. 28 günlük 2 serisi harçların gerilme–birim şekil değiştirme değerleri	42
Şekil 4.15. 90 günlük 2 serisi harçların gerilme–birim şekil değiştirme değerleri	42
Şekil 4.16. 28 günlük harçların elastisite modülü değerleri.....	43
Şekil 4.17. 90 günlük harçların elastisite modülü değerleri.....	43
Şekil 4.18. 2S0R numunesinin SEM görüntüleri	45
Şekil 4.19. 2S10R numunesinin SEM görüntüleri	46
Şekil 4.20. 2S0P9 numunesinin SEM görüntüleri	47
Şekil 4.21. 2S10P9 numunesinin SEM görüntüleri	48
Şekil 4.22. 2S0R numunesine ait SEM görüntüsü ve seçilen bölgedeki EDX spektrumları.....	48
Şekil 4.23. 2S0R numunesine ait SEM görüntüsü ve seçilen bölgedeki EDX spektrumları.....	49

Şekil 4.24. 2S10R numunesine ait SEM görüntüsü ve seçilen bölgedeki EDX spektrumları.....	49
Şekil 4.25. S10R numunesine ait SEM görüntüsü ve seçilen bölgedeki EDX spektrumları.....	50
Şekil 4.26. 2S0P9 numunesine ait SEM görüntüsü ve seçilen bölgedeki EDX spektrumları.....	50
Şekil 4.27. 2S0P9 numunesine ait SEM görüntüsü ve seçilen bölgedeki EDX spektrumları.....	51
Şekil 4.28. 2S10P9 numunesine ait SEM görüntüsü ve seçilen bölgedeki EDX spektrumları.....	51
Şekil 4.29. 2S10P9 numunesine ait SEM görüntüsü ve seçilen bölgedeki EDX spektrumları.....	17

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. 1. cürufu içeren karışımların bileşen miktarları(kg/m ³)	8
Çizelge 3.2. 2. cürufu içeren karışımların bileşen miktarları (kg/m ³)	9
Çizelge 3.3. Harçlarda kullanılan cürufların tane boyutu tasarımı	10
Çizelge 4.1. Harçların üretiminde kullanılan malzemelerin özgül ağırlıkları	16
Çizelge 4.2. Agregaların birim hacim ağırlıkları	16
Çizelge 4.3. Paslanmaz çelik atığının tane dağılımı	17
Çizelge 4.4. 1. ve 2. cürufun tane dağılımı	18
Çizelge 4.5. Harç içerisinde kullanılan malzemelerin XRF analizi sonuçları	20
Çizelge 4.6. Karışımların taze halde birim hacim ağırlık değerleri ve hava miktarları ..	23
Çizelge 4.7. Taze harçların yayılma çapı değerleri.....	24
Çizelge 4.8. 28 günlük 1. cüruf içeren harçların yüzdesel su emme, kuru birim ağırlık, görünür birim ağırlık ve görünür boşluk oranı değerleri	25
Çizelge 4.9. 90 günlük 1. cüruf içeren harçların yüzdesel su emme, kuru birim ağırlık, görünür birim ağırlık ve görünür boşluk oranı değerleri	26
Çizelge 4.10. 28 günlük 2. cüruf içeren harçların yüzdesel su emme, kuru birim ağırlık, görünür birim ağırlık ve görünür boşluk oranı değerleri	29
Çizelge 4.11. 90 günlük 2. cüruf içeren harçların yüzdesel su emme, kuru birim ağırlık, görünür birim ağırlık ve görünür boşluk oranı değerleri	29
Çizelge 4.12. 1. grup sertleşmiş harçların 28 günlük kılcal su emme katsayıları (x10 ⁻³ cm/sn ^{1/2})	32
Çizelge 4.13. 1. grup sertleşmiş harçların 90 günlük kılcal su emme katsayıları (x10 ⁻³ cm/sn ^{1/2})	33
Çizelge 4.14. 2. grup sertleşmiş harçların 28 günlük kılcal su emme katsayıları (x10 ⁻³ cm/sn ^{1/2})	34
Çizelge 4.15. 2. grup sertleşmiş harçların 90 günlük kılcal su emme katsayıları (x10 ⁻³ cm/sn ^{1/2})	35
Çizelge 4.16. 1. grup sertleşmiş harçların 28 ve 90 günlük eğilme dayanımı verileri....	36
Çizelge 4.17. 2. grup sertleşmiş harçların 28 günlük eğilme dayanımı verileri	37

Çizelge 4.18. 1. cüruf içeren sertleşmiş harçların 28 ve 90 günlük basınç dayanımı sonuçları 39

Çizelge 4.19. 2. cüruf içeren sertleşmiş harçların 28 ve 90 günlük basınç dayanımı sonuçları 41



1. GİRİŞ

Silis dumanı, cüruf ve paslanmaz çelik atığının betonda kullanılmasının ekonomik yararları bulunmaktadır. İlk etapta harç ve betonda mineral katkıların daha çok ekonomik sebeplerle kullanıldığı söylenebilir. Ancak, bugün geldiğimiz durumda söz konusu malzemelerin bilinçli kullanılmasıyla, betonların çoğunlukla tüm mühendislik özelliklerine olumlu etkiler yapabileceği; genellikle bağlayıcı malzeme içindeki Portland çimentosu miktarını düşürerek CO₂ salınımını azalttıkları bilinmektedir. Kullanılmamaları durumunda birer atık olan bu malzemelerin geri dönüşümüyle sağlanan çevresel faydalar mevcuttur (Tokyay 2013).

Araştırmanın geri dönüşümlü ürünlerin yeniden kullanılabilirliği amaçladığı düşünüldüğünde, en başta gelen malzemelerden biri silis dumanıdır. Silis dumanı, ferrosilikon veya silikon metal üretiminde kullanılan fırınlardan elde edilen bir yan üründür (Santosh vd. 2017). Esas olarak amorf olan, %90'dan fazla silisdioksit içeren, çok ince küresel parçaların yüksek içeriğine sahip ve fırınlardan çıkan gazların filtrelenmesi sonucu temin edilmektedir (Papa vd. 2016).

Yapı sektöründe geniş bir kullanım yelpazesi sağlayan geri dönüşümlü endüstriyel atıklardan bir diğeri ise kalker kumu yerine kullanılabilir yüksek fırın cürufudur. Demir üretiminde hammadde olarak demir cevheri, kireçtaşı ve kok kömürü kullanılmaktadır. Yüksek fırın cürufu ise, demir-çelik tesislerindeki yüksek fırınlarda demir üretimi prosesinin son aşamasında, özgül ağırlık farkı yardımıyla elde edilen bir yan üründür. Başlıca bileşenleri SiO₂, Al₂O₃, CaO iken, MgO, FeO ve CaS, MnS, FeS formundaki sülfürler ikinci bileşenleridir (Vaclavik vd. 2012).

Proje, Antalya Ferrokrom İşletmesi'nin elektrik-ark fırınlarından temin edilen iki farklı cüruf atıklarının agrega olarak kullanılmasıyla, endüstriyel atık bileşenlerin yeniden değerlendirmesini ve alınan iki farklı cürufun harç üzerindeki etkisinin incelenmesini amaçlamıştır. Çıkan sonuçlar doğrultusunda cüruf, silis dumanı ve metalik karakterli endüstriyel atıkların yeni bir kullanım alanı oluşturması hedeflenmiştir. Öncelikle birinci cürufun agrega olarak kullanıldığı harçlarda belirli yüzdelerde metalik karakterde atıklar farklı yüzdelere halinde birinci cüruf yerine kullanılarak taze ve nihai harçlar meydana getirilmiş, fiziksel ve mekanik özelliklerini belirlemek için üzerinde deneyler yapılmıştır. Daha sonrasında ise, agrega olarak ikinci cüruf kullanılarak oluşturulan harçlarda, farklı yüzdelerde ikinci cürufun yerine, belirli yüzdelerde metalik karakterde atık eklenerek taze ve nihai harçlar üretilmiş ve üzerinde fiziksel ve mekanik özelliklerini belirlemek için deneyler yapılmıştır. Deneysel çalışmalar ve karakterizasyon çalışmaları çimentolu karışımlar üzerinde tatbik edilmiştir.

Proje kapsamında, sıva harçlarının fiziksel ve mekanik özelliklerinin iyileştirilmesinde, öncelikle agrega olarak %100 oranda birinci cüruf ve %100 oranında ikinci cüruf kullanılarak kontrol numunesi üretilmiştir. Daha sonrasında agrega olarak kullanılan bu iki farklı cüruf hacimce % olarak, belirli oranlarda metalik karakterde atık ile yer değiştirilerek karışımlara dahil edilmişlerdir.

Çalışmada, harçların üretimi için elektrik-ark fırınlarından temin edilen iki farklı cüruf, silis dumanı ve metal işleme ve şekillendirme sektörü yan ürünü paslanmaz çelik atık parçacıkları kullanılarak, üretilen numunelerin özellikleri karşılaştırılmıştır. Bunun

için üretilen taze harçlarda, birim hacim kütlesi, kıvam ve işlenebilirlik, sertleşmiş harçlarda ise yığın yoğunluk, görünür porozite, su emme, eğilme dayanımları, basınç dayanımları, kılcal su geçirimsizlik gibi fiziksel, mekanik özellikleri tayin edecek deneyler yapılmıştır. Bulgular ışığında, atık özelliklerinin, harçların özelliklerine ne mertebede katkıda bulunduğu saptanmış ve mikroyapı incelemelerinin de katkısıyla sebepleri araştırılmıştır.



2. KAYNAK TARAMASI

Silis dumanı, silisyum metali ve ferro-silisyum alaşımların üretimi sırasında 2000 °C’yi aşan sıcaklıklardaki elektrik ark fırınlarında yüksek saf kuvarsın indirgenmesi sonucu açığa çıkan endüstriyel yan üründür (Chung 2002). Silis dumanı, çok yüksek özgül yüzey alanına sahip (15.000-25.000 m²/kg), küresel parçacıklar veya ortalama çapı yaklaşık 0.15 mikroküreler içeren çok ince tozdur. Her bir mikroküreciği, bir çimento tanesinden ortalama olarak 100 kez daha küçüktür (King 2012). Bu özelliklerinden dolayı, silis dumanı son derece reaktif puzolanik bir malzemedir. Ancak yüksek derecedeki inceliği ve düşük yoğunluğu, bu malzemenin taşınmasında, işlenmesinde ve depolanmasında zorluklara sebep olmaktadır (Pedro vd. 2017). Silis dumanı başlıca kristal olmayan saf silisten oluşmuştur. Farklı silis dumanlarının XRD analizleri, malzemenin esas olarak kristobalit biçiminde camsı silis olduğunu göstermektedir. Silis dumanı genellikle %90’dan daha fazla SiO₂ içerir ve içeriğinde az miktarlarda demir, magnezyum ve alkali oksitler de bulunmaktadır (Siddique ve Khan 2011).

Pik demir üretiminde demir filizinin içerdiği safsızlıklar, kullanılan kokun külü ve filizin demire indirgenmesini kolaylaştıran kalkerin yanması sonucu oluşan kalıntılardan yüksek fırın cürufu elde edilmektedir. Fırından eriyik halde çıkan cüruf soğutma yöntemine göre tane yapısını almaktadır. Havada yavaş soğutulduğunda kristal yapıya sahip olurken, suda ani soğutulduğunda hemen hemen tamamiyle camsı yapıya sahip olmaktadır. Silis dumanı ise silikon metal veya ferrosilikon alaşım endüstrisinin atığıdır. Baca gazlarıyla fırın dışına çıkan silis dumanı torba filtrelerde toplanmaktadır. Malzemenin hemen hemen tamamı amorf yapıdadır. Cüruflarda CaO, MgO ve SiO₂ toplam miktarının en az %67 olması beklenmektedir (Tokyay 2013). Silis dumanının kimyasal içeriği ise, fırından elde edilmek istenen esas ürüne göre değişmektedir. Silikon metal üretimi için kuvartz, kömür ve ahşap yonga kullanılırken ferrosilikon alaşımların üretimi için bunlara ek olarak demirli malzemeler kullanılmaktadır. Ferrokrom silikon veya silikomanganez alaşımları için ise krom ve mangan da eklenmektedir.

Ferrokrom ve Silikoferrokrom üretimi prosesinde, indirgenemeyen oksitler ile bir miktar SiO₂, ergiyik metal yüzeyinde sıvı bir cüruf tabakası oluşmaktadır ve bu cüruf kalıplara dökülerek atılmaktadır (Yılmaz 2002). Antalya’daki Ferrokrom cürufları, havada yavaş soğutulması nedeniyle kristal yapıdadır ve aktif değildir. Bu cüruf türü “havada soğutulmuş elektrik ark fırını cürufu” (EAF cürufu) olarak isimlendirilmektedir ve genelde agrega olarak kullanılabilir. Bünyesinde kil ve silt bulunmaması, pürüzlü ve poroz bir yüzeye sahip olmasıyla birlikte, iyi adezyon özellik göstermesi üstün özelliklerindendir (Yılmaz ve Süttaş 2008). Ayrıca, cürufun su absorpsiyonu, boşluklu yapısı nedeniyle yüksektir (Katherine ve Eighmy 2000).

Furlani ve Maschio (2016) yaptığı çalışmada çimento yerine ağırlıkça %10, %20, %30 ve %40 pul şeklinde çelik atıklar kullanarak ürettikleri numuneler üzerinde dayanım testi gerçekleştirilmiştir. 28 günlük basınç dayanımı testi sonucunda her ne kadar bütün harçlar yüksek dayanımlı olarak tanımlansa da harç içerisindeki pul şeklindeki çelik atıkların artışı, basınç dayanımında azalmaya sebep olmuştur. Alwaeli ve Nadziakiewicz (2012) ise, çalışmada çelik talaşları kum agrega yerine ağırlıkça %25, %50 ve %75’i kadar yer değiştirerek kullanmışlar ve çıkan sonuçları geleneksel beton ile karşılaştırmışlardır. Sonuç olarak çelik talaşlı betonlar geleneksel betonlara göre basınç dayanımında %25 oranına kadar iyi mukavemet göstermiş ve ulaştığı maksimum

dayanım 43 MPa olmuştur. Bu oran %25'i aştığı zaman mukavemeti bozduğu görülmüştür. Bir diğer çalışma Fuente-Alonso vd. (2017), yüksek fırın cürufu karışımının içerisine metalik lifler katarak performansı arttırmayı amaçlamışlardır. Bu çalışmada, beton olarak 30 kg/m³ (EM1) ve 45 kg/m³ (EM2) dozajlı, cüruf içeren iki farklı numune üretilmiştir. Bu numuneler hem birbirleriyle, hem de 30 kg/m³ metalik lif dozajlı geleneksel beton (P) ve lifsiz cürufu beton (E) ile eğilme dayanımı açısından karşılaştırılmıştır. Çıkan sonuçlar 28. günde P:5.50 MPa, E:6.82 MPa, EM1:6.89 MPa, EM2:7 MPa iken, 90. günde P:5.18 MPa, E:6.90 MPa, EM1:6.92 MPa, EM2:7.18 MPa şeklinde raporlanmıştır. Sonuç olarak, metal lif yüzdesi arttıkça ve cüruf eklendikçe dayanımda artış gözlemlenmiştir. Bir diğer benzer çalışma ise, harçlarda bakır atıkları kullanarak yapılan Onuaguluchi ve Eren (2012)'in yapmış olduğu çalışmadır. Sonuç olarak bakır atıklarının, harçların 90 günlük basınç dayanımını artırdığı belirtilmiş ve farklı türlerdeki metal atıkların da basınç dayanımını iyileştirmede kullanılabileceği fark edilmiştir. Alberti vd. (2017) yapmış olduğu çalışmada, çengelli çelik lifler kullanılarak üretilen betonla geleneksel betonun dayanım yönünden karşılaştırmasını yapmışlar ve basınç dayanımının iyileştirmesinde, yaklaşık %10'luk dayanım artışı sağlamışlardır. Kim J. S. Vd. (2017) yapmış olduğu araştırmada, amorf yapılı mikro çelik lifleri çimento esaslı kompozitlere ekleyerek, çekme dayanımlarını incelemişlerdir. Projede kullanılan amorf yapılı çelik lifler, uzunluk olarak 15 mm, 30 mm ve hacimce %0.75, 1, 1.25, 1.5 oranlarında çimento bazlı kompozit içerisinde kullanmışlardır. Sonuç olarak hacimce %1.5 oranında 30 mm'lik amorf çelik lifli çimento bazlı kompozitin çekme dayanımının en yüksek değeri aldığı görülmüştür. Tüfekçi ve Gökçe (2017) ise, çimentolu kompozitte %2 miktarında çelik lif ve agrega olarak öğütülmüş demir atık kullanılmıştır. Bu çalışmada ise, %2'lik çelik lif ve silis–kuvars karışımından oluşan çimentolu kompozit kontrol numunesi olarak belirlenmiştir. 90. gün basınç dayanımı deneyleri verilerinde, içerisinde demir atık bulunan kompozit, kontrol numuneye göre %3'e kadar daha iyi bir performans artışı göstermiştir.

Metal içerikli liflerin işlenebilirliğe katkısı, Yaka (2011) tarafından yürütülen projede raporlanmıştır. Konya bölgesindeki agrega içeren çimento esaslı kompozitlerin bünyesinde, metal liflerin olması sağlanmıştır. Bu kompozitler içerisindeki lif artışının, işlenebilirliği fark edilir oranda azalttığı gözlemlenmiştir. Eğilme dayanımlarında ise lifler betona olumlu yönde katkı sağlamıştır. 7 ve 28 günlük numunelerin basınç dayanımı sonuçlarında, 300 kg/m³ dozajda, lifsiz beton numunelerine nazaran, lifli beton numunelerinde azalma daha fazla görülmüş ancak diğer 325, 350 ve 400 kg/m³ dozajlı numune gruplarında ise daha çok artış gözlemlenmiştir. En fazla basınç dayanımında artma ise, 325 ve 350 kg/m³ dozajlı numune gruplarında tespit edilmiştir.

Doğan (2008)'in yapmış olduğu çalışmada, silis dumanı katkılı betonların kılcal geçirimsizliği ile ilgili deneyler mevcuttur. Yüzeyden su emme ve kılcal geçirimsizlik özellikleri üzerinde silis dumanı etkinliği, su/bağlayıcı oranının azalmasıyla artmıştır; çünkü düşük su/bağlayıcı oranlarında az olan boşlukların kılcal boyutta olanları silis dumanı tarafından doldurulmakta, agrega – çimento arayüzeyi hem doldurma hem de puzolanik etkileriyle yoğun bir yapıya sahip olmakta ve bu da geçirimsizliği azaltmaktadır.

Özkan (2006)'ın projesinde klinker, granüle yüksek fırın cürufu ve çelikhane cürufu kullanılmıştır. Granüle yüksek fırın cürufunda hacimce %17.54 Al₂O₃ bulunurken, çelikhane cürufunda hacimce %15.3 Fe₂O₃ bulunmakta olduğu raporlanmıştır. Harçlarda granüle yüksek fırın cürufu, harç yaşı arttıkça dayanımı artırırken, çelikhane cürufu harç

yaşı arttıkça dayanımı düşürmüştür. Granüle yüksek fırın cürufu içeren karışımlarda, %50 katkı miktarı dayanımda en iyi sonucu vermiştir.

Yazıcıoğlu vd. (2005) yapmış olduğu çalışmada Elazığ Ferrookrom cürufunu öğütüp, CEM I 42.5 R ile belirli yüzdelerde yer değişimli kullanarak kompozitlerdeki dayanımı ölçmüştür. Kontrol numunesi (%100 çimento bağlayıcı) ile cüruf katkılı kompozitler karşılaştırıldığında, %3 cüruf katkısına kadar basınç dayanımlarında %7-11 oranında artış görülmüştür. En düşük basınç dayanımı maksimum agrega boyutu 4 mm olan kompozit serisinde görülmürken, en yüksek basınç dayanımı da maksimum agrega boyutu 32 mm olan kompozit serisinde görülmüştür. Bu şekilde, agregaların tane dağılımının dayanıma etkisi de araştırmada vurgulanmıştır.

Yousefieh vd. (2017), çelik fiberlerin kuruma büzülmesine etkileri esas olmak üzere, çeşitli deneyler gerçekleştirmişlerdir. Eklenen fiberlerin basınç dayanımına etkisi, fark edilir bir boyutta vuku bulmamıştır. Çelik fiberlerin uç kısımları kanca şeklinde olduğu için, kompozitin kuruma büzülmesine karşı direncini artırmıştır. Hacimce %0.1 çelik fiber içeren betonlardaki çatlakların genişliği, fiber içermeyen betondaki çatlakların genişliğine göre %74'e kadar daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Aynı numunelerin çatlakları uzunluk olarak kıyaslandığında, ise çelik fiberli betonlardaki çatlakların uzunluğu fibersiz betondaki çatlakların uzunluğuna göre %19 oranında daha kısa olduğu tespit edilmiştir. Bu çalışmada yalnızca çatlakların boyutlarında değil meydana geliş süresinde de farklılıklar olduğu görülmüştür. Fibersiz betonlarda ilk çatlak 48 saat sonra gerçekleşirken, çelik fiberli betonlarda 144 saat sonra gerçekleşmiştir. Bu gibi durumların, numunelerin basınç dayanımı değerlerini etkilediği makalede raporlanmış ve çelik fiberlerin dayanımda iyileştirme sağladığı belirtilmiştir.

Binici vd. (2014), katkı olarak öğütülmüş yüksek fırın cürufunu tercih etmiştir. Üretilen numunelerde, hacimce % 2.5, 5, 10 miktarlarında cüruf tatbik edilmiştir. Eğilme ve basınç dayanımı sonuçlarına bakıldığında, referans olarak alınan (cüruf katkısız) numunenin cüruf içeren numunelere göre dayanımı 7. ve 28. günlerde yüksek olmasına rağmen, 180. günde dayanımı düşük çıkmıştır. 180. günde yapılan basınç dayanımı testinde, katkı maddesi olarak eklenen öğütülmüş yüksek fırın cürufunun hacimce her %2.5 artışında, dayanımda 4.4 MPa değerinde artış sağlamıştır. Bu çalışmadan daha önce Binici vd. (2010) gerçekleştirdiği çalışmada, barit, bazaltik pomza, kolemanit ve yüksek fırın cürufu katkılı kompozitler üzerinde basınç dayanımı deneyi uygulanmış ve veriler karşılaştırılmıştır. 28 günlük dayanımı en yüksek olan örnekler yüksek fırın cürufu ve kolemanit katkılı örnekler olmuştur. Bu örneklerin dayanımı 48 – 55 MPa aralığında sonuçlanmış ve dayanım verilerinin, referans numuneden %15 daha yüksek olduğu hesaplanmıştır. 180 günlük basınç dayanımları incelendiğinde, yüksek fırın cürufu ve kolemanit katkılı örneklerin basınç dayanımı ise, 60 – 65 MPa aralığında elde edilmiş ve bu verilerin referans numunenin verilerinden %15 daha fazla olduğu tespit edilmiştir.

Yılmaz (2014), iki farklı cürufu çimentoyla yer değiştirerek kullanmış ve mineral katkı olarak kullanılan bu cürufaların basınç dayanımına etkisini, yüzde su emme miktarlarını tayin etmiştir. İki cürufun da dozajı 70 kg/m³ olarak belirlenmiştir. Yüzde su emme miktarları incelendiğinde 90 günlük sonuçlarda kontrol numunesinin su emme miktarı %1.13, Oyak cürufu örneğin %1.70 ve Karçimsa cürufu örneğin %2.54 olduğu tespit edilmiştir. 90 günlük basınç dayanımı deneyi sonuçlarında ise, kontrol örneği 46.10 MPa, Oyak cürufu örnek 54.17 MPa ve Karçimsa cürufu örnek 47.48 MPa değerlerini

almıştır. Böylelikle, farklı yerlerden temin edilen cürufların dayanıma etkisinin, farklı olduğuna işaret edilmiştir.

Taş vd. (2013) yapmış olduğu çalışmada C25 ve C30 beton karışımında 0–2 mm aralığındaki agrega ağırlığının yarı yarıya oranında azaltılması ve yerine demir talaşı ilave edilmesinin, betonun basınç dayanımına etkisi incelemiştir. Demir talaşı ilavesinin, sertleşmiş beton basınç dayanım değerleri incelendiğinde, C25 betonu için ortalama %9.8, C30 betonu için ortalama %7.2 oranında dayanımı artırdığı tespit edilmiştir.

Kayan vd. (2017), çimentonun ağırlıkça %10'u yerine silis dumanı kullanarak numuneler üretmiştir. 7 günlük basınç dayanımı sonucunda, kontrol numunesi 27.79 MPa değer gösterirken, silis dumanı katkılı numune 32.4 MPa değerini göstermiştir. 28 günlük basınç dayanımı sonuçlarında ise kontrol numunesi 43.19 MPa değerine tekabül ederken, silis dumanı katkılı numune 50.28 MPa değerine tekabül etmiştir. Son olarak 365 günlük basınç dayanımı sonuçlarında kontrol numunesi 51.97 MPa değerini alırken, silis dumanı katkılı numune 54.89 MPa değerini almıştır. Silis dumanı puzolanik özelliğini 28 güne kadar hızlı bir şekilde gösterirken, yaş aldıkça bu özelliğinin yavaşladığı gözlemlenmiştir.

3. MATERYAL ve METOT

Çalışmada, hidrolik bağlayıcı olarak Antalya Bölgesi'nde faaliyet gösteren Göltaş Çimento Fabrikası'nın ürünü olan, TS EN 197-1 standardına uygun CEM I 42.5 R Portland çimentosu ve puzolan olarak Antalya Ferrokrom A.Ş. fabrikasının atığı olan silis dumanı kullanılmıştır. Çimento, laboratuvar ortamında nem almayı engellemek için, herhangi bir nem girişine olanak vermeyecek şekilde plastik örtülerle kaplanarak deneysel çalışmalar süresince muhafaza edilmiştir.

Hidratasyon reaksiyonlarının düzgün bir şekilde gerçekleşebilmesi ve harç karışımlarının işlenebilir olması için su, çimento bağlayıcılı karışımlarda en önemli bileşenlerden biridir. Bu çalışmada, Antalya şebeke suyu, işlem yapılmaksızın olduğu gibi kullanılmıştır.

Karışımlarda kullanılacak olan agrega niteliğindeki bileşenlerin özelliklerindeki homojenliği sağlamak adına tek seferde ve aynı kaynaktan malzeme elde edimi gerçekleştirilmiştir. Agrega olarak kullanılan iki farklı cüruf Antalya Ferrokrom A.Ş. tarafından temin edilirken, paslanmaz çelik atığı ise, İstanbul Sanayi Sitesi'nden tedarik edilmiştir.

Karışımlarda kullanılmış malzemelerin özgül ağırlıkları Le Chatelier balonu ve balon joje ile ağırlıkça ve hacimsel olarak tayin edilmiştir. Karışım hesabına dahil edilmek üzere, cürufun su emme miktarı hesaplanırken BOSCH marka sanayi tipi kurutucu, Abrams konisi ve 0.001 g hassasiyetli nem ölçer cihazı kullanılmıştır. 4 mm, 2 mm, 1 mm, 0.5 mm, 0.25 mm, 0.125 mm açıklıklarına sahip elekler, tabla ve titreşimli zemine sahip olan elek cihazı kullanılarak tane dağılımı ve incelik modülü hesaplanmıştır.

Agregaların gevşek ve sıkışık birim hacim ağırlık değerlerini hesaplayabilmek için silindir bir kap ve şiş kullanılmıştır. Harçların taze birim hacim değerleri deneyi ise, silindir kap yardımıyla gerçekleştirilmiştir.

Harçlar karıştırılırken GEMO marka, dakikada maksimum 125 tur dönebilen, süresi ayarlanabilen mikser kullanılmıştır.

Kürleme koşullarının sağlanabilmesi için, içi kirece doymuş su ile dolu, sıcaklığı 23 ± 2 °C dereceleri arasında ayarlanabilen kür tankı kullanılmıştır.

Sertleşmiş birim hacim ağırlık deneyleri gerçekleştirilirken Arşimet terazisi ve 0.001 gr hassasiyetli, kancalı tartı kullanılmıştır. Arşimet terazisinin kefesine doldurulan suyun 23 ± 2 °C aralığında olmasına dikkat edilmiştir. MST 500 marka etüv kullanılarak numuneler etüv kurusu hale getirilmiştir. Mekanik özellik tayinleri için deplasman kontrollü universal hidrolik presler kullanılmıştır.

3.1. Karışımların Hesaplanması ve Hazırlanması

Harç üretimi için deneme karışımları sonucunda uygun bileşen oranları, dayanım ve işlenebilirlik göz önüne alınarak belirlenmiş ve karışımların karşılaştırılmasında işlenebilirliğin etkisini mümkün olduğunca ortadan kaldırabilmek için akma tablası deneyinde akma çapı belli bir aralıkta tutulmuştur. Çimento dozajı ve su/bağlayıcı oranı

sırasıyla, 400 kg/m³ ve 0.7 olarak tayin edilmiştir. Kullanılan bileşenlerin farklı fiziko-kimyasal özellikleri nedeniyle, gerektiğinde süper akışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Karışıma başlamadan önce, toplam suyun 2/3'ü kadarı mikser kabına doldurulmuştur. İlk olarak dakikada 50 rpm (dakika başına başlığın döndüğü tur miktarı) hızında başlatılmıştır. Mikser çalışmaya başladıktan itibaren, öncelikle dışarıda karıştırılan çimento ve silis dumanı su olan kabın içerisine yavaşça yerleştirilmiştir. Daha sonra, agrega olarak cüruf taneleri eklenerek karıştırmanın ilk 2 dakikanın bitmesi beklenmiştir. Sonraki aşamada, 2 dakika içerisinde metal agregalar kabın içerisine yavaşça eklenmiş ve bittiğinde kalan su ile birlikte süper akışkanlaştırıcı kaba eklenmiştir. Toplam 4 dakika sonunda ise, mikserin hızı 75 rpm kademesine getirilerek, 1 dakika boyunca tüm malzemelerin karışması sağlanmıştır.

Çizelge 3.1. 1. cürufu içeren karışımların bileşen miktarları(kg/m³)

Numune	Çimento	Silis	Paslanmaz Çelik Atığı	1. Cüruf	Su	Süper Akışkanlaştırıcı
1S10R	360.00	40.00	0.00	1577.19	354.36	0.00
1S5R	380.00	20.00	0.00	1582.11	354.59	0.00
1S0R	400.00	0.00	0.00	1587.03	354.82	0.00
1S10P9	360.00	40.00	404.19	1435.24	347.66	6.80
1S10P6	360.00	40.00	269.46	1482.56	349.89	4.00
1S10P3	360.00	40.00	134.73	1529.87	352.13	0.00
1S5P9	380.00	20.00	405.46	1439.72	347.87	6.80
1S5P6	380.00	20.00	270.30	1487.18	350.11	4.00
1S5P3	380.00	20.00	135.15	1534.64	352.35	0.00
1S0P9	400.00	0.00	406.72	1444.20	348.09	6.80
1S0P6	400.00	0.00	271.14	1491.81	350.33	4.00
1S0P3	400.00	0.00	135.57	1539.42	352.58	0.00

Çizelge 3.2. 2. cürufu içeren karışımların bileşen miktarları (kg/m³)

Numune	Çimento	Silis	Paslanmaz Çelik Atığı	2. Cüruf	Su	Süper Akışkanlaştırıcı
2S10R	360.00	40.00	0.00	1634.45	347.18	0.00
2S5R	380.00	20.00	0.00	1639.55	347.39	0.00
2S0R	400.00	0.00	0.00	1644.65	347.60	0.00
2S10P9	360.00	40.00	404.19	1487.35	341.13	6.80
2S10P6	360.00	40.00	269.46	1536.38	343.15	4.00
2S10P3	360.00	40.00	134.73	1585.42	345.16	0.00
2S5P9	380.00	20.00	405.46	1491.99	341.32	6.80
2S5P6	380.00	20.00	270.30	1541.18	343.35	4.00
2S5P3	380.00	20.00	135.15	1590.36	345.37	0.00
2S0P9	400.00	0.00	406.72	1496.63	341.51	6.80
2S0P6	400.00	0.00	271.14	1545.97	343.54	4.00
2S0P3	400.00	0.00	135.57	1595.31	345.57	0.00

Karışımında %10 paslanmaz çelik atık kullanıldığında, uygun işlenebilirlik süper akışkanlaştırıcı kullanıldığı halde ortadan kalkmıştır. Akma tablası deneyinde çimento hamuru kısmı agrega tanelerini uygun biçimde saramamış ve segregasyon gerçekleşmiştir. %9 paslanmaz çelik atık kullanıldığında ise, bu durum kısmen düzelmiştir. Bu yüzden üst limit paslanmaz çelik atıklı numunelerde hacimce %9 kabul edilmiştir. Kontrol numuneleri olarak içerisinde metal atıkların bulunmadığı cüruf içeren harçlar, yukarıda bahsedilen hususlar dikkate alınarak üretilmiştir.

1S10R, 1S5R, 1S0R, 2S10R, 2S5R, 2S0R karışımları kontrol numuneleri olarak belirtilirken, geriye kalan kodlanmış karışımlar metal atık içeren karışımlar olarak adlandırılmıştır. Numunelerin kodlamaları 1 ile başlıyorsa 1. cüruf, 2 ile başlıyorsa 2. cüruf agrega olarak bünyesinde bulunmaktadır.

3.2. Agreganın Su Emme Miktarı Tayini

Cürufun yüzdesel su emme tayini deneyi, ASTM C128-01 standardına göre yapılmıştır. Öncelikle standartlara uygun şekilde yığını temsil eden belli bir miktar cüruf tam doygun hale gelene kadar 24 saat suda bekletilmiştir. 24 saat sonra suyu süzildükten sonra tabla üzerine yayılmıştır. Sıcak hava akımı üfleyen makine yardımıyla cüruf suya doygun kuru yüzey haline gelene kadar kurutulmuştur. Suya doygun kuru yüzey haline gelip gelmediğini anlamak için kesik huni yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemde cüruf, geniş yüzeyi altta kalacak şekilde kesik huni biçimli metal kalıba gevşek olarak yerleştirilmiştir. Sıkıştırma çubuğu ile 25 defa hafifçe şişlenmiştir. Kesik koni hafifçe çıkarıldığında numune konikliğini yitirene kadar tekrar kurutulmuş ve tekrar kesik koni yöntemi uygulanmıştır. Suya doygun kuru yüzey halindeki cüruf alınıp tartılmış ve etüvde 24 saat bekletilmiştir. 24 saat sonra ise, etüv kurusu cüruf etüvden alındıktan sonra

tartılmıştır. Ardından su emme miktarı hesaplanmıştır. Bu yöntem her iki cüruf için ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir.

$$\%Su\ emme = \left(\frac{W_2 - W_1}{W_1} \right) 100 \quad (3.1)$$

W₁: Sertleşmiş numunenin etüv kurusu ağırlığı (kg)

W₂: Sertleşmiş numunenin suya doygun kuru yüzey ağırlığı (kg)

3.3. Agregaların Tane Büyüklüğü Dağılımı Tayini

Tane büyüklüğü dağılımı tayini TS EN 933-1: 2012 standardına göre yapılmıştır. Yukarıdan aşağıya doğru yerleştirilen eleklerin elek açıklıkları sırasıyla 4, 2, 1, 0.5, 0.25 ve 0.125 mm şeklindedir. Her iki cüruf için, her bir tane aralıklarında, aynı miktarda agrega kullanılmıştır.

Çizelge 3.3. Harçlarda kullanılan cürufların tane boyutu tasarımı

Tane boyutu aralığı	1. ve 2. cürufun her bir karışım içinde ağırlıkça bulunma miktarı (%)
4 mm ve altı, 2mm üstü	%10
2 mm ve altı, 1 mm üstü	%20
1 mm ve altı, 0.5 mm üstü	%30
0.5 mm ve altı, 0.25 mm üstü	%20
0.25 mm ve altı, 0.125 üstü	%15
0.125 mm ve altı	%5

3.4. Harçlardaki Malzemelerin Kristal Yapıları ve Kimyasal Kompozisyonları

X ışını kırınım yöntemi (XRD), her bir kristal fazın kendine özgü atomik dizilimlerine bağlı olarak X ışınlarını karakteristik bir düzen içerisinde kırmasına dayanmaktadır. Her bir kristal faz için, bu kırınım profilleri o kristali tanımlamaktadır. X ışını floresans (XRF) spektrometresi, genel olarak foton ile madde etkileşmesi sonucu meydana gelen karakteristik X ışınlarının ve saçılma fotonlarının incelenmesinde kullanılmaktadır. Harçlarda kullanılan bazı bileşenlerin kimyasal kompozisyonlarını tayin etmek için XRF yöntemi kullanılmıştır. SEM - EDX ile numune yüzeyinin görüntülenerek karakterize edilmesi ve yüzeyinde seçilen alanın yüzde element dağılımının tespiti gerçekleştirilmiştir.

3.5. Agregaların Birim Hacim Ağırlık ve Taneler Arası Boşluk Miktarı Tayini

Bu deney TS EN 1097-3 standardına göre yapılmıştır. Öncelikle cüruf 105 °C sıcaklıkta etüvde sabit kütleye ulaşınca kadar bekletilmiştir. Bir sonraki adımda, 1 lt'lik kabın ağırlığı alınmıştır (M₁). Tartımın ardında, agrega el küreği ile kap kenarından çevresinde dönmeli olarak (ölçü kabı üst yüzeyinden en fazla 5 cm yükseklikten) bir

miktar taşacak şekilde doldurulmuştur. Ölçü kabı, yüzeyindeki fazla agrega cetvel ile dikkatlice sıyrılarak üst yüzey düzlenmiştir. Gevşek agrega ile dolu ölçü kabı tartıda beraberce tartılmıştır (M_2). Sonrasında formülde uygulanarak gevşek yığın yoğunluğu hesaplanmıştır. Deney üç kez tekrar edilmiştir ve ortalaması alınmıştır.

$$\rho_b = \left(\frac{M_2 - M_1}{V} \right) \quad (3.2)$$

ρ_b : Gevşek yığın yoğunluğu (Mg/m^3)

M_1 : Boş ölçü kabı kütlesi (kg)

M_2 : Ölçü kabı ve deney numunesinin kütlesi (kg)

V : Ölçü kabının hacmi (lt)

Sıkışık birim hacmin hesaplanması için kabın öncelikle 1/3'ü doldurulmuş ve 25 kez şişlenmiştir. Cüruf, şişleme çubuğu ile yüzeyin her tarafına yayılacak şekilde fakat kabın tabanına şişleme çubuğu değmeyecek şekilde 25 vuruş yapılarak sıkıştırılmıştır. Sonrasında kabın 2/3'üne kadar doldurulmuş ve şişleme çubuğu ile yüzeyin her tarafına eşit olacak şekilde 25 vuruş yapılarak sıkıştırmaya tabi tutulmuştur. En son kap taşarcasına doldurulmuş ve 25 kez şişleme gerçekleştirilmiştir. Her tabakanın şişlenmesi sırasında evvelki tabakaya kadar şişin girmesi gerekliliği yerine getirilmiştir. Ölçü kabı üst yüzü sıyrılarak düzeltilmiştir ve tartıda tartılmıştır (M_2).

$$\rho_s = \left(\frac{M_2 - M_1}{V} \right) \quad (3.3)$$

ρ_s : Sıkışık yığın yoğunluk (Mg/m^3)

M_2 : Ölçü kabı ve deney numunesinin kütlesi (kg)

M_1 : Boş ölçü kabı kütlesi (kg)

V : Ölçü kabının hacmi (lt)

3.6. Akma Tablası Deneyi

Bu deney TS EN 1015-3 standardına göre yapılmıştır. Deneyden hemen önce yüzeyde serbest su kalmayacak şekilde akma tablası nemlendirilmiştir. Taze harç kesik koniye iki eşit tabaka halinde, spatula yardımıyla doldurulmuştur. İlk tabaka doldurulduktan sonra sıkıştırma çubuğu ile 10 defa şişlenmiştir. Kesik huninin geri kalan kısmı taze harç ile doldurulmuş ve yeniden 10 defa şişlenmiştir. Kalıp üst seviyesinden taşan fazla harç, mala kullanılarak sıyrılıp alınmış ve tabladaki harç kalıntıları temizlenmiştir. Mala yardımıyla kesik koninin üzeri düzleştirilmiş ve harcın taşması engellenmiştir. Sonrasında kesik huni düşey şekilde yukarıya doğru çekilerek alınmıştır. Sonrasında kol 15 saniye içerisinde 15 kez çevrilerek yayılma tablası düşürülmüştür. Düşürme işlemi gerçekleştirildikten sonra üst tablaya yayılan harcın en büyük iki yayılan çapı birbirine dik olacak şekilde ölçülmüştür. Bu ölçümlerin ortalaması alınmış ve böylelikle yayılma çapı elde edilmiştir.

3.7. Taze Harçlarda Birim Hacim Kütle ve Hava Miktarının Ağırlık Yöntemiyle Tayini

Belirli bir hacim içerisine sıkıştırılarak yerleştirilmiş taze harcın birim hacmine isabet eden ağırlığın kg/m^3 olarak ifade edilmesi ve harç içindeki hapsolmuş hava miktarını belirlemek için bu deney yapılmıştır. Bu deney TS EN 1015-7 standardına göre uygulanmıştır. Deneyde, taze harçlar 1 dm^3 hacimli silindir kap içerisine yerleştirilmiştir. Yayılma çapı 140 mm altı çıkan taze harçlar için vibrasyon metodu kullanılmıştır. Öncelikle kalibre edilmiş kap taşana kadar kürek yardımıyla taze harç eklenmiştir. Sonraki aşamada, bir titreşimli tabla üzerine yerleştirilip taze harcın yerleşmesi sağlanana kadar titreşim devam ettirilmiştir. Son olarak 0.01 g hassasiyetli tartıda tartım gerçekleştirilmiştir. Yayılma çapı 140 – 200 mm arası olan taze harçlar için şok metodu kullanılmıştır. Öncelikle kap kepçe yardımıyla yarısına kadar doldurulmuştur. Sonrasında kap sağlam bir yüzeye 10 kez düşmesi sağlanmıştır. Kabın tamamı kürek yardımıyla doldurulmuş ve ardından 10 kez aynı sağlam yüzeye düşmesi yinelenmiştir. Nihai olarak 0.01 g hassasiyetli tartıda tartılmıştır. Yayılma çapı 200 mm üzeri çıkan taze harçlarda ise, kap içerisi kepçe yardımıyla, taze harçla doldurulmuştur. Sonrasında kabın kenarlarından taşan taze harçlar nemli bir bez yardımıyla silinmiştir. En son olarak 0.01 g hassasiyetli tartıda tartımı gerçekleştirilmiştir.

$$\rho_m = \left(\frac{m_2 - m_1}{V} \right) \quad (3.4)$$

ρ_m : Taze harç birim hacim ağırlığı (kg/m^3)

m_1 : Kabın ağırlığı (kg)

m_2 : Kabın ve taze harcın ağırlığı (kg)

V : Kabın Hacmi (m^3)

3.8. Sertleşmiş Harcın Su Emme Miktarı, Kuru Birim Ağırlık, Görünür Birim Ağırlık ve Görünür Boşluk Oranı Tayini

Bu deney ASTM C 642'ye göre yapılmıştır. Bu deney için 100 mm ebatlarındaki küpler kullanılmıştır. Kür tankından çıkarılan küp öncelikle nemli bir bezle silinerek suya doymun kuru yüzey hale getirilmiş ve 0.001 g hassasiyetli tartı tarafından tartılmıştır (W_2). Ardından, aynı tartının altında bulunan kancayla bağlı file sepet içerisine küp yerleştirilmiş ve sertleşmiş harcın sudaki ağırlığı belirlenmiştir (W_3). En son olarak 50°C sıcaklıkta, 72 saat süresince bekletildikten sonra, yeniden aynı terazide havada tartım yapılmıştır (W_1). Formüllere birlikte sonuçlar elde edilmiştir.

$$A = \frac{W_1}{(W_2 - W_3)} \quad (3.5)$$

$$B = \frac{W_1}{(W_1 - W_3)} \quad (3.6)$$

$$C = \left(\frac{W_2 - W_1}{W_2 - W_3} \right) 100 \quad (3.7)$$

$$D = \left(\frac{W_2 - W_1}{W_1} \right) 100 \quad (3.8)$$

A: Kuru birim ağırlık (Mg/m³)

B: Görünür birim ağırlık (Mg/m³)

C: Görünür boşluk oranı (%)

D: Su emme (%)

3.9. Kılcal Su Geçirimsizlik Deneyi

Harçların kılcal su emme katsayısı değerleri 100 mm ebatlı küp numunelerde 1 dk, 64 dk ve 24 saat sürelerde emilen su miktarının ölçülmesiyle saptanmıştır. Suyu temas eden yüzeyi taban kabul edip, yan yüzeylerini parafinleyerek yan yüzeylerden su emilim engellenmiştir. Küp en fazla su içerisine 4 mm kadar batırılmıştır. Suyun sıcaklığı 23±2 °C olarak belirlenmiştir. Su dolu kaplarda 1 dk, 64 dk ve 24 saat olarak bekletilmiştir. Her dakika dolumu sonucu küp harçlar su dolu kaptan çıkarılmış ve nemli bir bezle taban yüzeyindeki su alınmıştır. Böylelikle, taban suya doymuş kuru yüzey hale getirilmiştir. Hemen ardından, 0.01 g hassasiyetli tartıda tartımı gerçekleştirilmiştir. Formülde veriler yerine konularak, kılcal su emme katsayıları elde edilmiştir.

$$K = \frac{Q}{(A\sqrt{t})} \quad (3.9)$$

K: Kılcal su emme katsayısı (cm/sn^{1/2})

Q: Emilen su miktarı (cm³)

A: Suyu temas eden yüzeyin alanı (cm²)

t: Zaman (sn)

3.10. Eğilme Dayanımı Tayini

Eğilme dayanımı deneyi TS EN 1015-11 standardına göre yapılmıştır. Deney öncesi 40x40x160 mm boyutlarındaki numuneler kür tankından çıkarılmıştır. Her bir numune yükleme tablasındaki iki mesnet üzerine ortalayacak şekilde yerleştirilmiş ve mesnetlere ters yönde, numunenin tam ortasından yük uygulanmıştır. Maksimum yük üzerinden formül yerine veriler yerleştirilerek eğilme dayanımı MPa cinsinden hesaplanmıştır.

$$\sigma = \frac{3Fl}{2d_1d_2^2} \quad (3.10)$$

σ : Eğilme dayanımı (MPa)

F: Deney makinesinde kırılma anındaki en büyük yük (N)

l: Yükleme tablası mesnetler arasındaki açıklık (mm)

d_1 : Numunenin genişliği (mm)

d_2 : Numunenin yüksekliği (mm)

3.11. Basınç Dayanımı Tayini

Bu deney TS EN 1015-11 standardına göre yapılmıştır. 40x40x160 mm ortadan ikiye kırıldıktan sonra ayrılan her bir parçaya 40x40 mm boyutlarındaki çelik pres altında kırılncaya kadar yük uygulanmıştır. Makinenin alt ve üst yükleme başlıklarının yükleme esnasında birbirine paralel olması sağlanmıştır. Kırılma anındaki maksimum yük yardımıyla basınç dayanımı değeri MPa cinsinden hesaplanmıştır.

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (3.11)$$

σ : Basınç dayanımı (MPa)

F: Maksimum yük (N)

A: Yükün uygulandığı kesit alanı (mm²)

3.13. Elastisite Modüllerinin Tayini

Elastisite modülü tayini gerçekleştirilirken TS EN 12390-13 standardı göz önünde bulundurulmuştur. Elastisite modülü, yük altında deformasyona uğramış malzemenin yük kaldırıldıktan sonra tekrar eski boyutlarını kazanma özelliğinin ölçüsüdür. Atomik boyut seviyesinde düşünüldüğünde elastisite modülü, atomlar arası bağ enerjisi ile de doğrudan ilişkilidir. Büyük bağ enerjisine sahip katılar büyük elastik modülüne sahip iken, küçük bağ enerjisine sahip katılar ise küçük elastisite modülüne sahiptirler. Elastisite modülü, birim şekil değiştirebilme kabiliyeti ile ters orantılıdır. Elastisite modülü arttıkça malzemenin rijitliği de artar. Basınç deneyi, eğilme deneyi gibi deneylerle hesaplanabilir. Elastisite modülü, gerilme - birim şekil değiştirme eğrisinin elastik bölge kısmında kalan lineer bölge üzerinden hesaplanır. Bu projede elastisite modülleri elde edilirken kiriş yöntemi kullanılmıştır.

Kiriş yöntemi: Deney esnasında gerilme sıfır veya çok azken, gerilme – birim şekil değiştirme eğrisinin başlangıç noktasında bir miktar deformasyon yer almaktadır. Daha sonra gerilme arttıkça, birim şekil değiştirme normal olarak artmaktadır. Bunun sebebi yüklemmeden önce betonun bünyesinde bulunan mikro çatlaklardandır. Yükleme başladığında betonda oturma olmakta ve fazla yük uygulanmadığı halde böyle bir deformasyon oluşmaktadır. Esasen, betondaki hakiki gerilme – birim şekil değiştirme ilişkisi böyle bir oturmadan sonra oluşan ilişkiden ileri gelmektedir. Bu yüzden, hesaplama yapılırken eğrinin başlangıç noktasındaki bu durum göz ardı edilmektedir.

Kiriş yönteminde gerilme – birim şekil değiştirme eğrisi üzerinde bir nokta belirlenmiştir. Bu nokta seçilirken, maksimum gerilme değerinin %40'ına karşılık gelen gerilme değeri göz önüne alınmıştır. Bu noktaya çizilecek kiriş gerilme – birim şekil değiştirme eğrisinin başlangıç noktasından başlatılmamıştır, 5×10^{-5} birim şekil değiştirme değerine karşılık gelen bir noktadan başlatılmıştır. Bu iki nokta arasında çizilen doğrunun eğimi üzerinden elastisite modülü hesaplanmıştır:

$$E = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\epsilon_2 - \epsilon_1} \quad (3.12)$$

σ_1 : 5×10^{-5} değerindeki birim şekil değiştirmesine karşılık gelen gerilme miktarı (MPa)

σ_2 : $(\sigma_{\max}) \times 0.4$ değerine eşit olan gerilme miktarı (MPa)

ϵ_1 : 5×10^{-5} değerindeki birim şekil değiştirme miktarı

ϵ_2 : σ_2 değerindeki birim şekil değiştirme miktarı

3.14. SEM Görüntüleri ve EDX Analizi

Elektron mikroskopları, bir elektron kaynağından salınan elektronların numune yüzeyi ile teması sonucunda elde edilen verilerin, reseptörler tarafından alındıktan sonra işlenmesiyle bu görüntüleri oluşturmaktadırlar. Elektron tabancaları, elektron kaynağı olarak kullanılmaktadır. Elektron tabancası içerisinde bulunan volfram teli, uygulanan voltajla birlikte ısınmasıyla elektron salınımı yapmaktadır. Elektronlar anot plaka aracılığıyla yönlendirilmektedir. Bu elektronlar öncelikle kondansör mercekten, daha sonra objektif merceklerden geçmektedir. Bütün işlemler vakum ortamında gerçekleştiğinden, salınan elektronlar sistemdeki gaz molekülleriyle reaksiyona girmezler. Elektron demeti ile numune arasındaki etkileşimler sonucunda oluşan ikincil elektronlar (Auger elektronları), saçılmış elektronlar ile x ışınları çeşitli dedektörler tarafından algılanmaktadır. Bu veriler daha sonra bilgisayara veri olarak aktarılmaktadır (Ay, 2017).

EDX analizinde ise numune üzerine taramalı elektron demeti gönderilerek işlem gerçekleştirilmektedir. Yüksek enerjili elektronlar, numune yüzeyinden elektron koparmaktadır. Dış kabuktaki elektron x ışınına dönüşerek fazla enerjisini azaltmaktadır. Yayılmış olan x ışınını, yapının hangi element atomuna ait olduğu ve hangi enerji kabuğundan yayımlandığı hakkında bilgiler sunmaktadır. Bu veriler bilgisayarda pikler halinde görünmekte ve sonuç olarak elementel analiz tamamlanmış olmaktadır.

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

4.1. Özgöl Ağırlık Tayini ve Agregaların Birim Hacim Ağırlıkları

Çizelge 4.1- 4.2 üzerinde karışımlarda kullanılmış malzemelerin özgöl ağırlıkları ve birim hacim değerleri gösterilmiştir. Le Chatelier balonu yardımıyla hesaplanan, harçlar içerisinde kullanılmış silis dumanı, CEM I 42.4 R, 1. cüruf, 2. cüruf, paslanmaz çelik atığı malzemelerinin özgöl ağırlıkları sırasıyla 2.38, 3.04, 3.09, 3.15 ve 7.68 g/cm³ değerlerinde tayin edilmiştir. Çizelge 4.1’de görüldüğü üzere, en ağır özgöl ağırlığa sahip olan malzeme metalik karakter özellikli paslanmaz çelik atığıdır. Cürufların, ASTM standartlarına göre özgöl ağırlık değerleri değişmekte ve 2.77 – 3.15 arasında bir değer almaktadır (Yılmaz ve Kök 2008).

Çizelge 4.1. Harçların üretiminde kullanılan malzemelerin özgöl ağırlıkları

Numune	Özgöl Ağırlık (g/cm ³)
Silis dumanı	2.38
CEM I – 42.5 R	3.04
1. cüruf	3.09
2. cüruf	3.15
Paslanmaz çelik atığı	7.68

Çizelge 4.2. Agregaların birim hacim ağırlıkları

Numune	Sıkışık Birim Hacim Ağırlık (g/cm ³)	Boşluk Miktarı (%)
1. cüruf	1.91	38.19
2. cüruf	1.98	37.14
Paslanmaz çelik atığı	0.61	92.06
Numune	Gevşek Birim Hacim Ağırlık (g/cm ³)	Boşluk Miktarı (%)
1. cüruf	1.82	41.10
2. cüruf	1.89	40.00
Paslanmaz çelik atığı	0.47	93.88

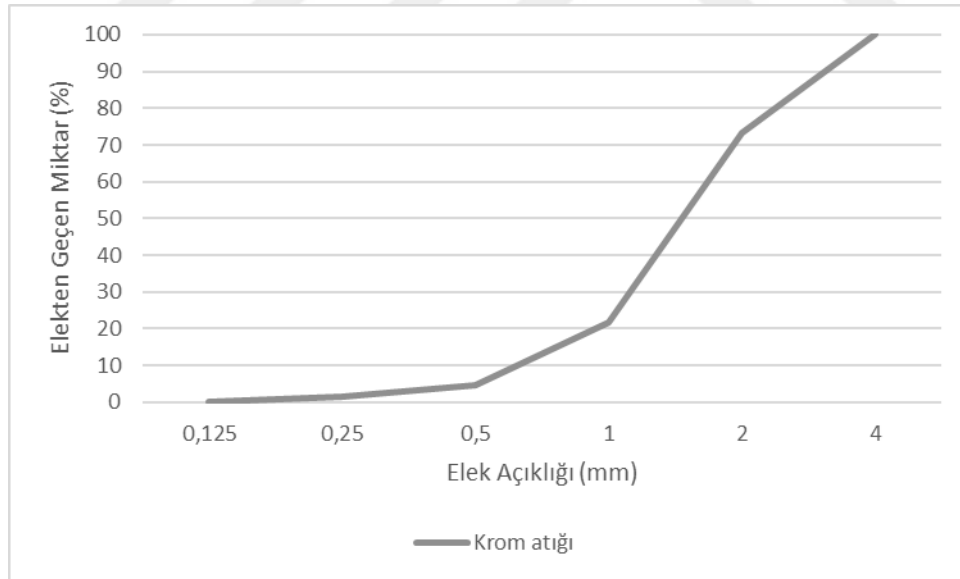
Çizelge 4.2’de görüldüğü üzere 3 dm³’lük bir kap içerisinde gerçekleştirilen birim hacim ağırlık tespiti deneyi sonucunda, kap içerisinde en fazla boşluğu sıkışık haliyle %92.06 oranında paslanmaz çelik atığı gerçekleştirmiştir. Bu atığın geometrik yapısının kıvrımlı olması, bu denli bir boşluk meydana getirmesine sebebiyet vermiştir. 1. cürufun boşluk miktarının 2. cürufa göre daha düşük olduğu görülmekle birlikte, bu iki değer birbirine yakındır.

4.2. Agregaların Tane Dağılımı

Harç içerisinde agrega olarak kullanılan iki farklı cüruf ve paslanmaz çelik atığının tane dağılımı ve elekten geçen miktarı belirten grafiği Çizelge 4.3 - 4.4 üzerinde belirtilmiştir. İki farklı cürufun belirli tane aralıklarında, aynı yüzdelerde miktarları aynı tutularak karışımlara dahil edilmiştir. Böylelikle, tane boyutu dağılımının farklı olmasının harçlara sebebiyet vereceği, mekanik ve fiziksel özelliklere etkisinden kaçınmak hedeflenmiştir.

Çizelge 4.3. Paslanmaz çelik atığının tane dağılımı

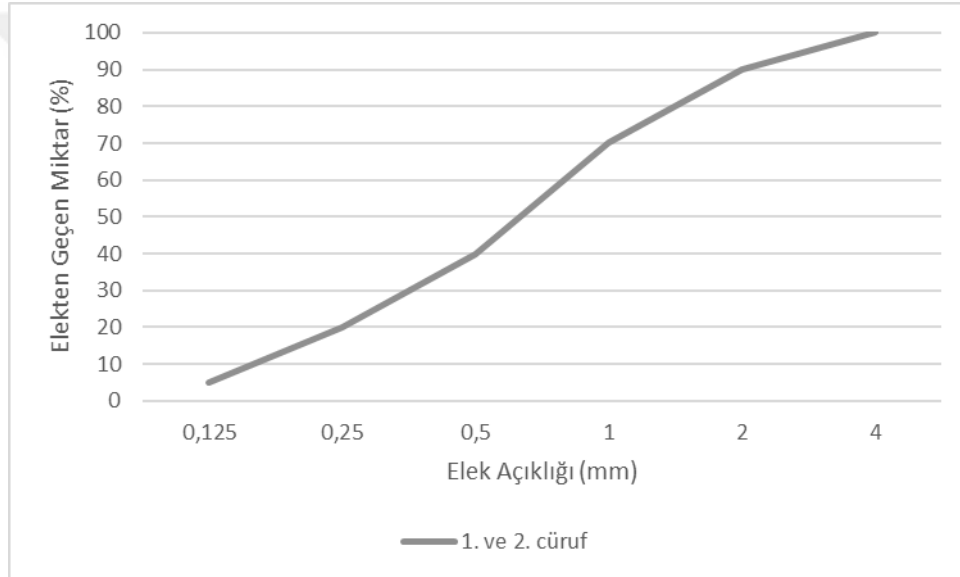
Elek Açıklığı (mm)	Elek Üstünde Yığılımlı Miktar (%)	Elekten Geçen Miktar (%)
4	-	100.00
2	26.79	73.21
1	78.13	21.87
0.5	95.39	4.61
0.25	98.40	1.60
0.125	99.78	0.22
Tabla	100.00	-



Şekil 4.1. Paslanmaz çelik atığının elek analizi grafiği

Çizelge 4.4. 1. ve 2. cürufun tane dağılımı

Elek Açıklığı (mm)	Elek Üstünde Yığılımlı Miktar (%)	Elekten Geçen Miktar (%)
4	-	100.00
2	10.00	90.00
1	30.00	70.00
0.5	60.00	40.00
0.25	80.00	20.00
0.125	95.00	5.00
Tabla	100.00	-

**Şekil 4.2.** 1. ve 2. cürufun elek analizi grafiği

Çizelge 4.3 üzerinde belirtilmiş değerler ele alınarak paslanmaz çelik atığının incelik modülü 3.99 olarak hesaplanmıştır. Çizelge 4.4 içerisinde gösterilen veriler ele alındığında ise, incelik modülü değeri 1. cüruf ve 2. cüruf için 2.75 değerindedir. Paslanmaz çelik atığının tane boyutunun, 4-1 mm aralığında cüruflara göre yüzdece daha fazla olması, incelik modülü değerinin daha büyük hesaplanmasına neden olmuştur.

4.3. XRD ve XRF Sonuçları

Çizelge 4.5 harç içerisinde kullanılmış olan malzemelerin kimyasal içeriğindeki oksit bileşiklerin yüzdece ağırlıklarını açıklamaktadır. İki farklı cüruf arasındaki fark incelendiğinde ilk göze çarpan 2. cürufta CuO, ZnO bileşikleri mevcutken, 1. cürufta bu bileşikler mevcut değildir. Na₂O elementi ise yalnızca 1. cüruf ve silis dumanında mevcuttur. CaO miktarının CEM I 42.5 R içeriğinde %67.7 miktarında bulunması, C-S-H jellerinde kalsiyum miktarının çoğunlukla çimento tarafından sağladığı söylenebilir.

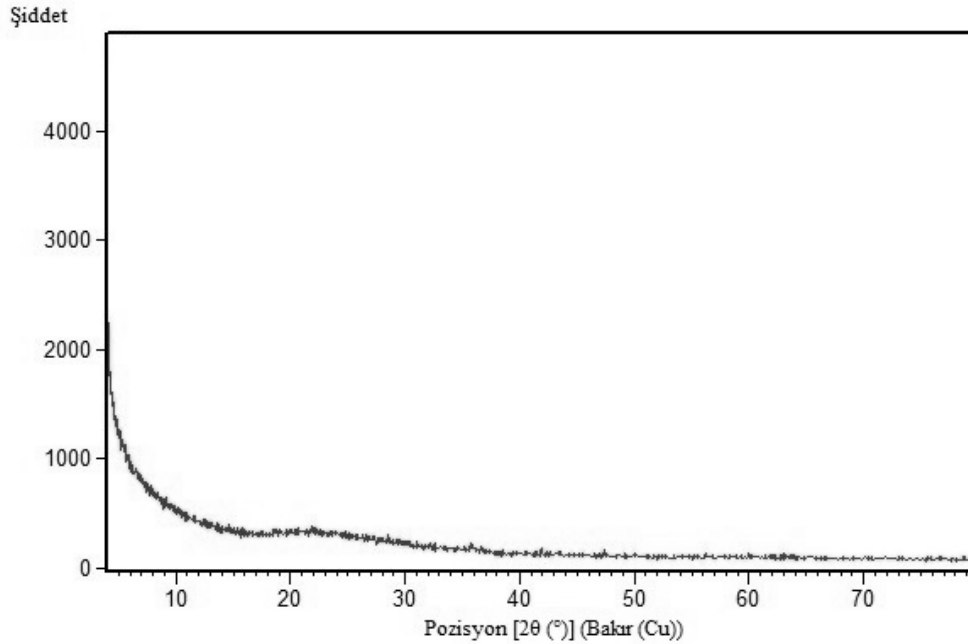
Paslanmaz çelikleri diğer çeliklerden ayıran en önemli özellik krom içeriklerinin çok yüksek (%12) olmasıdır (Kahraman vd. 2002). Artan krom miktarına bağlı olarak da yüksek sıcaklıklarda oksidasyon dirençleri artmaktadır (Weymueller, 1978). Östenitik çelikler esnek ve sıkı bir iç yapıya sahiptir. Östenitik paslanmaz çelikler, alaşımında minimum %10.5 ile %26 arasında krom, minimum %6 ile %36 arası değişen miktarlarda nikel içeren, kimyasal aşınmaya ve yüksek ısıya dayanımı olan gruptur (Soncu, 2008). Bu kategorideki çeliklerin manyetik özellikleri yoktur. XRF sonuçları, çalışmada kullanılan metal atıkları, östenitik paslanmaz çelik grubuna dahil olduğunu işaret etmektedir.

Antalya Etibank Elektrometalurji A.Ş.'den tedarik edilen silis dumanını kullanan Topçu ve Canbaz (2002), yapmış oldukları çalışmada silis dumanı içerisinde %88.8 oranında SiO_2 bulunduğunu söylemişlerdir. Kılınçkale (1996), deney için üretmiş olduğu numunelerde silis dumanı ve yüksek fırın cürufu kullanmıştır. Silis dumanını Etibank Ferrokrom Tesisleri'nden, yüksek fırın cürufunu Karabük Demir Çelik Fabrikası'ndan temin etmiştir. Yapılan XRF analizlerinde, yüksek fırın cürufunda %35.85 oranında SiO_2 , %20.77 oranında Al_2O_3 ve %37.24 oranında CaO bileşikleri saptanmıştır. Silis dumanında ise, %75.54 oranında SiO_2 mevcut olduğu görülmüştür. Bu çalışmalarda sergilenen deneylerin sonuçları dikkate alındığında, benzerlik ve eğilim olarak paralellik olduğu bu projede de gözlenmiştir.

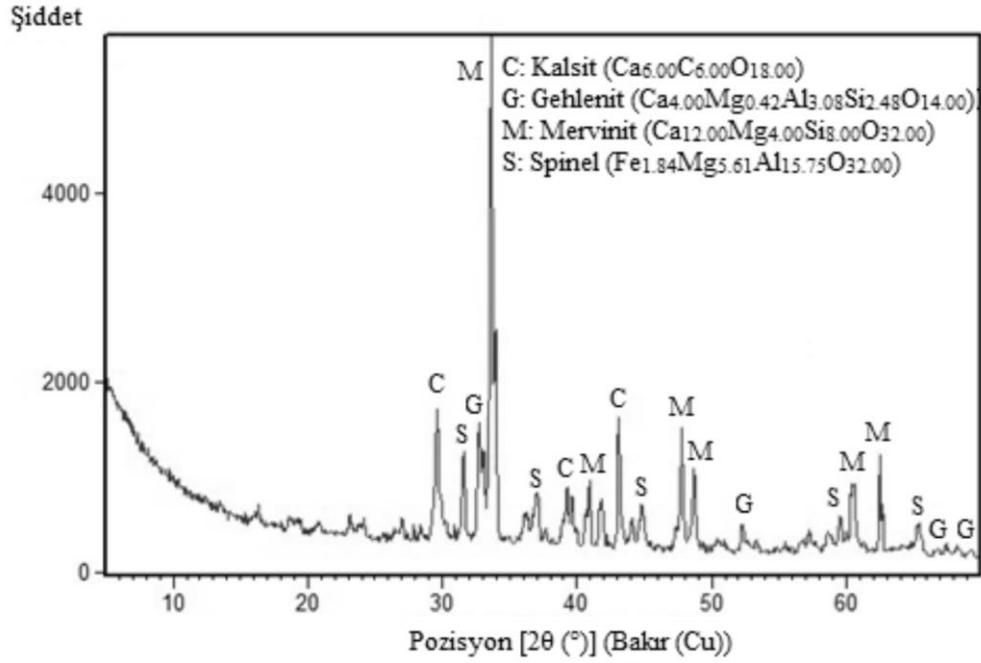
Silis dumanı içeriğinde en fazla %78.02 olmak üzere SiO_2 bulundururken, iki cüruf içeriğinde en fazla CaO bulunmaktadır. Agregat olarak kullanılan 0.063 mm altındaki cürufta CaO miktarı su ile tepkimeye girerek özellikleri iyileştirme yönünde etkide bulunabilmektedir.

Çizelge 4.5. Harç içerisinde kullanılan malzemelerin XRF analizi sonuçları

Oksitler	1. Cüruf	2. Cüruf	Paslanmaz Çelik Atığı	Silis Dumanı	CEM I 42.5 R
MgO	10.640	11.500	0.507	14.320	1.910
Al ₂ O ₃	9.343	7.840	0.666	1.684	4.060
SiO ₂	13.090	27.800	0.868	78.020	18.300
P ₂ O ₅	-	-	0.018	0.024	0.085
SO ₃	0.175	0.269	0.162	0.298	3.740
Cl	0.021	0.026	0.393	0.027	-
CaO	56.490	47.700	0.030	0.193	67.700
Cr ₂ O ₃	6.392	3.350	11.000	1.405	0.075
MnO	0.072	0.061	1.660	0.056	0.037
Fe ₂ O ₃	1.218	0.847	75.900	0.317	2.770
Co ₂ O ₃	-	-	0.594	-	-
NiO	-	-	6.460	-	-
CuO	-	0.128	0.565	-	0.005
ZnO	-	0.083	0.024	0.195	0.006
Na ₂ O	1.390	-	-	2.150	-

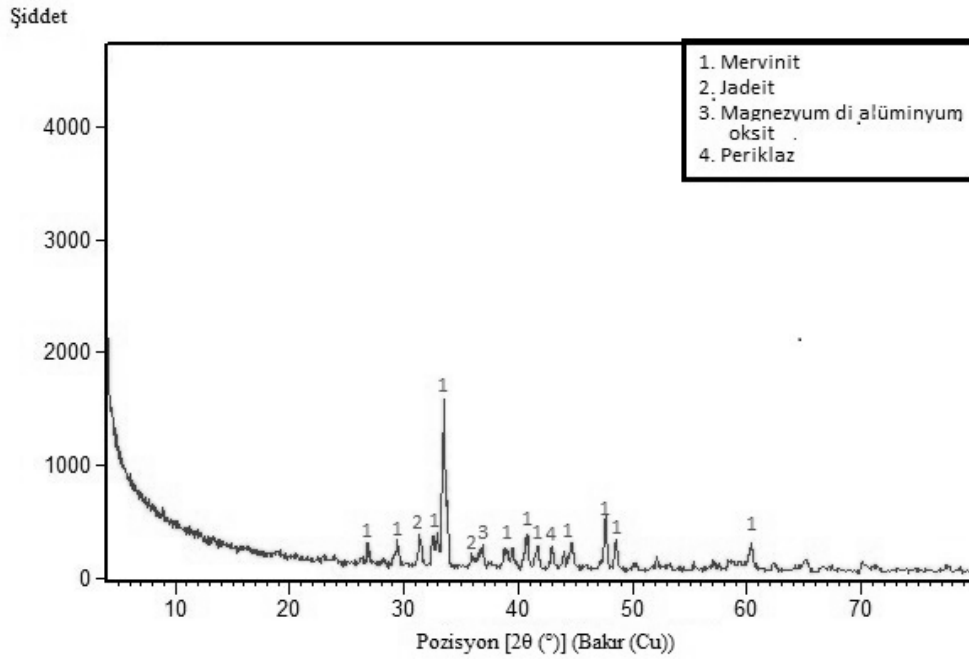
**Şekil 4.3.** Harçlarda kullanılan silis dumanının XRD analizi

Silis dumanının kristalografisi XRD paterninden elde edilen bulgulara göre amorf olmakla birlikte, içerisinde eser miktarda brusit ($\text{Mg}_{1.00}\text{O}_{2.00}$) ve almandin ($\text{Fe}_{24.00}\text{Al}_{16.00}\text{Si}_{24.00}\text{O}_{96.00}$) bulunmuştur.



Şekil 4.4. Harçlarda kullanılan 1. cürufun XRD analizi (Gülmez, 2018)

Yüksek fırın cürufu, büyük oranda cam fazı içerirken, gehlenit, akermanit ve mervinit gibi fazlar minör miktarda mevcut olabilmektedir (Li vd. 2010). Demir-çelik cüruflarında yaygın olarak tanımlanan mineral fazlar, kristobalit, brownmillerit, srebrodolskit, melilit, vustit, spinel, kalsit, kuvars, larnit ve demir metalidir (Piatak vd. 2017). Torres-Carrasco vd. (2015) cürufun, yüksek amorf içerik ile birlikte küçük içerikte gehlenit ve akermanit gibi yüksek yoğunluklu kristal fazları gösterdiğini belirtmişlerdir.



Şekil 4.5. Harçlarda kullanılan 2. cürufun XRD analizi

2. cürufun XRD paterninde mervinit ($\text{Ca}_{12.00}\text{Mg}_{4.00}\text{Si}_{8.00}\text{O}_{32.00}$), Jadeit ($\text{Na}_{4.00}\text{Al}_{4.00}\text{Si}_{8.00}\text{O}_{24.00}$), magnezyum II alüminyum oksit ($\text{Mg}_{8.00}\text{Al}_{16.00}\text{O}_{32.00}$) ve periklaz ($\text{Mg}_{4.00}\text{O}_{4.00}$) tanımlanmıştır. Chen vd. (2015) ise, kullandıkları yüksek fırın cürufunun XRD paterninin amorf olduğu sonucuna ulaşmıştır.

4.4. Taze Harçların Yüzdece Hava Miktarı Tayini

Taze birim hacim (TBH) değerleri Çizelge 4.6’da incelendiğinde, harçların paslanmaz çelik atığı içeriği arttıkça TBH değerlerinde genelde artış görülmüştür. 2. cürufun özgül ağırlığının, 1. cürufa göre büyük olması, taze birim hacim ağırlık değerlerinde etkili olmuş ve 2. cüruf içeren numunelerin TBH’leri daha yüksek çıkmıştır. Paslanmaz çelik ilavesiyle birlikte TBH değerlerinde artış meydana gelse de, kontrol numunelerine kıyasla daha düşük değerler ile sonlanmıştır. Her ne kadar paslanmaz çeliğin özgül ağırlığı, cürufların neredeyse iki katı büyüklüğünde olsa da, sürükledikleri hava itibariyle TBH değerleri düşük seyretmiştir.

Çizelge 4.6. Karışımların taze halde birim hacim ağırlık değerleri ve hava miktarları

Numune	Taze Harç Birim Hacim Ağırlık (kg/m ³)	Taze Halde İçerdiği Hava Miktarı (%)	Numune	Taze Harç Birim Hacim Ağırlık (kg/m ³)	Taze Halde İçerdiği Hava Miktarı (%)
1S10R	2251.49	3.36	2S10R	2290.03	3.65
1S5R	2243.90	3.94	2S5R	2271.70	4.67
1S0R	2226.37	4.93	2S0R	2257.93	5.49
1S10P9	2215.27	15.03	2S10P9	2383.08	9.31
1S10P6	2214.54	12.85	2S10P6	2313.08	9.08
1S10P3	2082.66	14.87	2S10P3	2263.08	8.02
1S5P9	2240.95	14.27	2S5P9	2314.22	12.16
1S5P6	2038.96	19.51	2S5P6	2246.22	11.94
1S5P3	2073.35	15.46	2S5P3	2299.20	6.80
1S0P9	2151.97	17.88	2S0P9	2373.20	10.17
1S0P6	2143.76	15.58	2S0P6	2248.89	9.86
1S0P3	2004.84	18.45	2S0P3	2248.89	9.08

4.5. Taze Harçların Yayılma Çapları

Taze harç üzerinde gerçekleştirilen yayılma çapı deneyi sonucunda, metal atığın içeriği arttıkça çapta azalma gerçekleşmiştir. Silis dumanının etkisi ise yayılma çapını azaltma yönünde tayin edilmiştir. Kontrol numunelerinin, paslanmaz çelik atığı içeren harçlara göre çap değerleri büyük çıkmıştır. Paslanmaz çelik atığı içeren malzemelerin yayılma çapı değerleri kontrol numunelerinin değerlerine eşitlenmeye çalışmak amacıyla süper akışkanlaştırıcı kullanılmıştır; fakat bağlayıcıların ağırlıkça %1.7'si değerinin üzerinde süper akışkanlaştırıcı karışıma eklendiğinde, taze harç bünyesinde segregasyon gerçekleşmiştir. Çizelge 4.7 içeriğinde görüldüğü üzere, 2. cürufun etkisi 1. cürufunkü ile karşılaştırıldığında yayılma çapı değerlerinde azalışı meydana getirmiştir. 1S grubunun paslanmaz çelik içeren karışımlarının yayılma çapları 9 cm ile 19 cm arası değişirken, 2S grubunun paslanmaz çelik içeren karışımlarının yayılma çapları 10.25 cm ile 16.75 cm arası değişmektedir. Kompozitler içerisindeki lif artışının, işlenebilirliği fark edilir oranda azalttığı gözlemlenmiştir (Yaka 2011).

Çizelge 4.7. Taze harçların yayılma çapı değerleri

Numune	Yayılma Çapı (cm)	Numune	Yayılma Çapı (cm)
1S10R	19.00	2S10R	20.00
1S5R	20.5	2S5R	21.00
1S0R	23.50	2S0R	23.50
1S10P9	9.00	2S10P9	10.25
1S10P6	11.25	2S10P6	12.00
1S10P3	16.00	2S10P3	16.75
1S5P9	9.75	2S5P9	10.00
1S5P6	10.75	2S5P6	11.75
1S5P3	16.25	2S5P3	15.50
1S0P9	9.75	2S0P9	11.20
1S0P6	11.25	2S0P6	10.50
1S0P3	16.25	2S0P3	15.00

4.6. Sertleşmiş Harçların Su Emme Miktarı, Kuru Birim Ağırlık, Görünür Birim Ağırlık, Görünür Boşluk Oranı Tayini

Çizelge 4.8 - 4.11 üzerinde görüldüğü üzere silis dumanının karışım içerisindeki içeriği azaldıkça, su emme miktarında artış göze çarparken, görünür boşluk oranında da benzer bir yükseliş dikkat çekmiştir. Silis dumanı tanelerinin özgül yüzey alanının düşük olması nedeniyle sertleşmiş harç içerisinde gözenekleri azalttığı söylenebilir.

Kontrol numunelerinin kuru birim ağırlık değerleri, çimento miktarı arttıkça düşüş göstermiştir. Bu duruma sebep olarak, silis dumanı özgül yüzey alanının büyüklüğü ile birlikte, karışıma giren silis dumanı miktarının da artmasıyla, boşluk hacminin azalması gösterilebilir. 28 günlük, paslanmaz çelik içeren agregalarla üretilen karışımlarda ise, yoğunlukları cüruf yoğunluğuna göre yüksek olmasına rağmen, kontrol karışımlarına göre yığın yoğunluklarında azalış gerçekleşmiştir. Buna neden olarak, paslanmaz çelik miktarıyla birlikte, numunelerin görünür boşluk oranında artışın olduğu söylenebilir. Her ne kadar paslanmaz çelik miktarı artışıyla karışımların kuru birim ağırlıklarında artış gözlemlense de, 28 günlük kür süresi, kontrol numunelerinin kuru birim ağırlıklarından yüksek olmasını sağlayacak kadar, karışımlara yeterli hidrasyon süresi sağlayamamıştır. Bu durumun, 90 günlük karışımların kuru birim ağırlık değerleri incelendiğinde, P9 serisi için geçerli olmadığı tespit edilmiştir.

Literatürde talaş şeklinde olan metal atıklar çoğu zaman agrega ile yer değiştirilmeyerek kullanılmıştır. Bu sebeple de bu atıkları içeren örneklerin kuru birim ağırlıklarında, daima yükseliş görülmüştür. Gao vd. (1997), Alwaeli ve Nadziakiewicz (2012) projelerinin verileri buna örnek gösterilebilir.

Silis dumanının harç bünyesinde artışıyla birlikte su emme oranında düşüş

gerçekleşmiştir. Silis dumanının tane yapısının çimentoya göre ince olması ve harç içerisinde küçük boşlukları daha fazla doldurması mikro filler etkisi olarak belirtilmiş ve su emme miktarında azalışa sebep olduğu belirlenmiştir (Koçkal, 2013). Her ne kadar cürufun azalışıyla birlikte numunelerin boşluklu yapısında artış gerçekleşse de, paslanmaz çelik miktarının artışıyla boşluk miktarında azalış sağlanmıştır.

Her iki grubun kontrol numunelerinin kuru birim ağırlıkları incelendiğinde, 1. gruba ait olan kuru birim ağırlık değerleri, 2. gruba göre daha düşük çıkmıştır. Buna sebep olarak, 2. cürufun 1. cürufa göre özgül ağırlığının daha yüksek olması gösterilebilir.

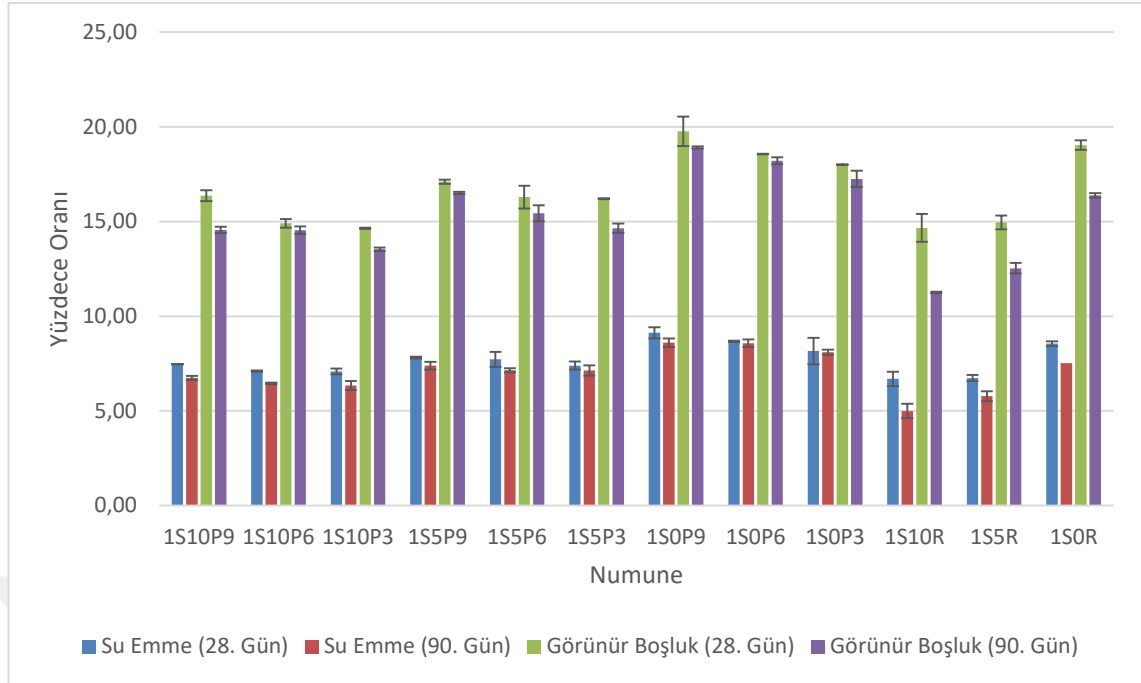
Çizelge 4.8. 28 günlük 1. cüruf içeren harçların yüzdesel su emme, kuru birim ağırlık, görünür birim ağırlık ve görünür boşluk oranı değerleri

Numune	Su Emme (%)	Kuru Birim Ağırlık (Mg/m ³)	Görünür Birim Ağırlık (Mg/m ³)	Görünür Boşluk Oranı (%)
1S10R	6.69	2.23	2.57	14.66
1S5R	6.74	2.22	2.61	14.96
1S0R	8.55	2.19	2.75	19.04
1S10P9	7.46	2.22	2.58	16.37
1S10P6	7.10	2.15	2.47	14.91
1S10P3	7.08	2.06	2.41	14.64
1S5P9	7.81	2.19	2.67	17.11
1S5P6	7.72	2.13	2.52	16.30
1S5P3	7.39	2.05	2.41	16.21
1S0P9	9.12	2.16	2.74	19.77
1S0P6	8.67	2.11	2.62	18.57
1S0P3	8.16	2.01	2.46	18.00

Çizelge 4.9. 90 günlük 1. cüruf içeren harçların yüzdesel su emme, kuru birim ağırlık, görünür birim ağırlık ve görünür boşluk oranı değerleri

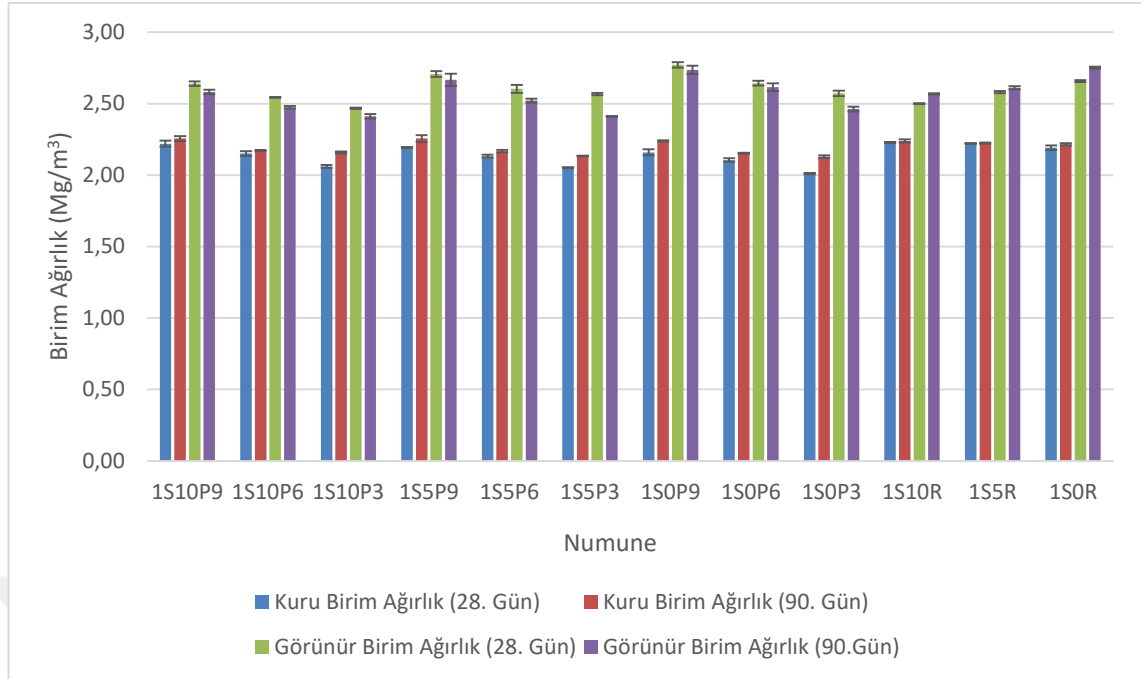
Numune	Su Emme (%)	Kuru Birim Ağırlık (Mg/m ³)	Görünür Birim Ağırlık (Mg/m ³)	Görünür Boşluk Oranı (%)
1S10R	4.99	2.24	2.50	11.25
1S5R	5.77	2.22	2.58	12.53
1S0R	7.53	2.21	2.66	16.38
1S10P9	6.74	2.26	2.64	14.56
1S10P6	6.45	2.17	2.54	14.55
1S10P3	6.34	2.16	2.47	13.53
1S5P9	7.38	2.26	2.71	16.51
1S5P6	7.15	2.17	2.60	15.44
1S5P3	7.14	2.13	2.57	14.65
1S0P9	8.60	2.24	2.77	18.91
1S0P6	8.58	2.15	2.64	18.21
1S0P3	8.11	2.13	2.57	17.25

Çizelge 4.9 üzerinde görüldüğü üzere maksimum su emme ve görünür boşluk oranları sırasıyla %8.60 ve %18.91 ile 1S0P9 numunesine aittir. En yüksek kuru birim ağırlıklar 2.26 Mg/m³ ile 1S10P9 ve 1S5P9'a ait iken, maksimum görünür birim ağırlık 2.77 Mg/m³ ile 1S0P9'a aittir.



Şekil 4.6. 28 ve 90 günlük 1. serinin yüzdece su emme ve görünür boşluk oranları

Paslanmaz çelik içeren numuneler üzerinde gerçekleştirilen deneylerin sonucunda elde edilen veriler Çizelge 4.8 ve 4.9’da gösterilmiştir. 28. gün su emme miktarlarında, 1S10P9, 1S10P6, 1S10P3, 1S5P9, 1S5P6, 1S5P3, 1S0P9, 1S0P6, için kontrol numuneler ile kıyaslandığında sırasıyla, %11.55, %6.18, %5.83, %15.92, %14.60, %9.79, %6.74, %1.43 artış olurken, yalnızca 1S0P3 için %4.56 azalış olmuştur. 1S10P9, 1S10P6, 1S5P9, 1S5P6, 1S5P3, 1S0P9 numunelerinin kontrol numunelere göre yüzdece görünür boşluk oranlarında artış gerçekleşmiş ve bu artışlar sırasıyla, %11.64, %1.67, %14.36, %8.96, %8.35, %3.82 oranında tespit edilmiştir. 1S10P3, 1S0P6 ve 1S0P3 için bu değerlerdeki azalış miktarı %0.16, %2.49 ve %5.46 olarak gözlemlenmiştir. 90 günlük yüzdece su emme miktarları kontrol numuneleri ile karşılaştırıldığında, 1S10P9, 1S10P6, 1S10P3, 1S5P9, 1S5P6, 1S5P3, 1S0P9, 1S0P6 ve 1S0P3 için sırasıyla, %35.06, %29.34, %27.12, %27.88, %23.81, %23.59, %14.31, %13.94, %7.69 artış göstermiştir. Görünür boşluk değerlerinin kontrol numuneler ile kıyaslanması sonucu, 1S10P9, 1S10P6, 1S10P3, 1S5P9, 1S5P6, 1S5P3, 1S0P9, 1S0P6, 1S0P3 için bu oranların değişimi sırasıyla, %29.40, %29.28, %20.30, %31.75, %23.18, %16.89, %15.41, %11.12 ve %5.30 artış şeklinde olmuştur.



Şekil 4.7. 28 ve 90 günlük 1. serinin kuru birim ağırlık ve görünür birim ağırlık değerleri

Paslanmaz çelik içeren harçların üzerinde uygulanan fiziksel deneylerin sonuçları Şekil 17’de gösterilmiştir. 28 günlük kuru birim ağırlık değerleri kontrol numuneleri ile kıyaslandığında ise, 1S10P9, 1S10P6, 1S5P9, 1S5P6, 1S0P9, 1S0P6, 1S0P3 için sırasıyla, %0.38, %3.44, %7.52, %1.26, %3.96, %7.57, %1.47, %3.95, %8.26 azalış tespit edilmiştir. Görünür birim ağırlık değerleri kontrol numuneleri ile karşılaştırıldığında ise, 1S10P6, 1S10P3, 1S5P6, 1S5P3, 1S0P9, 1S0P6, 1S0P3 için sırasıyla, %3.67, %6.12, %3.42, %7.70, %0.54, %4.97, %10.51 oranında azalış hesaplanırken, 1S10P9, 1S5P9 için sırasıyla, %0.54, %2.14 artış hesaplanmıştır. 90 günlük kuru birim ağırlık değerleri kıyaslandığında ise, kontrol numunelerine göre 1S10P9, 1S5P9, 1S5K0 için sırasıyla, %0.76, %1.51, %1.07 artış gerçekleşirken, 1S10P6, 1S10P3, 1S5P6, 1S5P3, 1S0P6, 1S0P3 için sırasıyla, %3.02, %3.62, %2.48, %4.00, %2.79, %3.93 azalış gerçekleşmiştir. 1S10P9, 1S10P6, 1S5P9, 1S5P6, 1S0P9 numunelerinin görünür birim ağırlık değerleri kontrol numuneleriyle kıyaslandığında, sırasıyla, %5.62, %1.74, %4.96, %0.91, %4.24 oranlarında artış gözlemlenirken, bu ağırlık değerlerinde 1S10P3, 1S5P3, 1S0P6, 1S0P3 için sırasıyla, %1.29, %0.51, %0.58, %3.25 oranlarında azalış gözlemlenmiştir.

Çizelge 4.10. 28 günlük 2. cüruf içeren harçların yüzdesel su emme, kuru birim ağırlık, görünür birim ağırlık ve görünür boşluk oranı değerleri

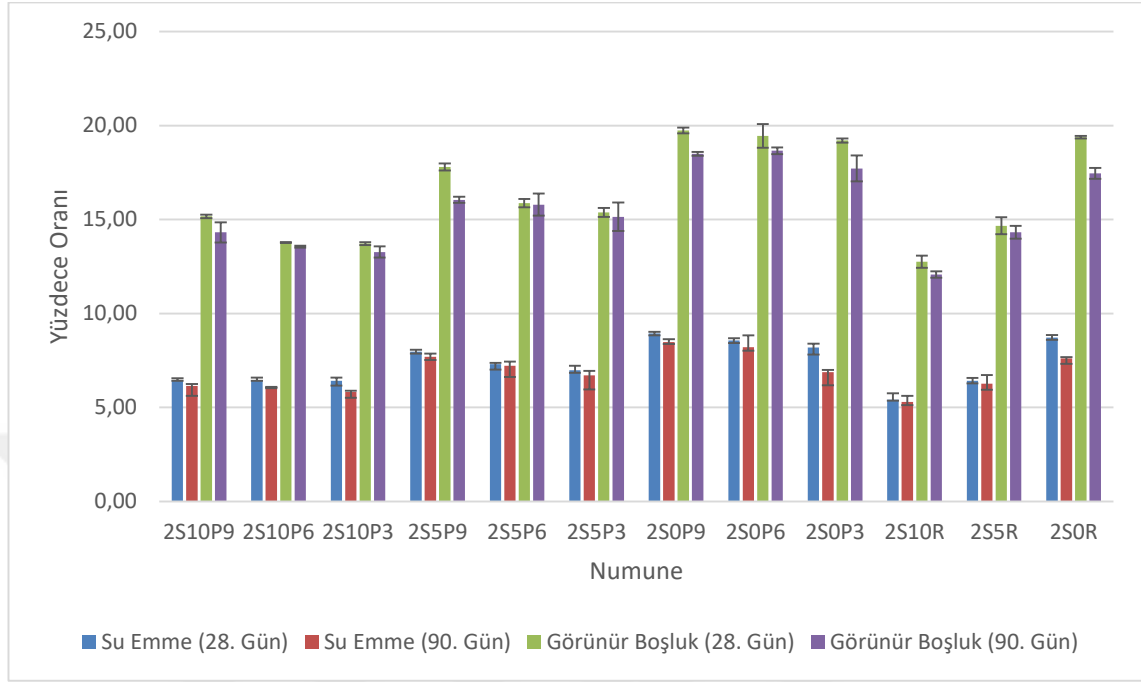
Numune	Su Emme (%)	Kuru Birim Ağırlık (Mg/m ³)	Görünür Birim Ağırlık (Mg/m ³)	Görünür Boşluk Oranı (%)
2S10R	5.42	2.28	2.58	12.75
2S5R	6.42	2.28	2.67	14.67
2S0R	8.72	2.24	2.78	19.39
2S10P9	6.45	2.30	2.65	15.17
2S10P6	6.44	2.21	2.53	13.78
2S10P3	6.41	2.18	2.51	13.72
2S5P9	7.97	2.28	2.80	17.80
2S5P6	7.30	2.19	2.60	15.88
2S5P3	6.99	2.16	2.55	15.38
2S0P9	8.95	2.27	2.81	19.74
2S0P6	8.57	2.18	2.75	19.45
2S0P3	8.18	2.16	2.68	19.21

Çizelge 4.11. 90 günlük 2. cüruf içeren harçların yüzdesel su emme, kuru birim ağırlık, görünür birim ağırlık ve görünür boşluk oranı değerleri

Numune	Su Emme (%)	Kuru Birim Ağırlık (Mg/m ³)	Görünür Birim Ağırlık (Mg/m ³)	Görünür Boşluk Oranı (%)
2S10R	5.30	2.29	2.60	12.08
2S5R	6.27	2.29	2.67	14.32
2S0R	7.61	2.28	2.78	17.45
2S10P9	6.15	2.47	2.91	14.32
2S10P6	6.07	2.23	2.81	13.56
2S10P3	5.82	2.23	2.63	13.27
2S5P9	7.69	2.37	2.88	16.05
2S5P6	7.22	2.20	2.62	15.79
2S5P3	6.71	2.20	2.59	15.15
2S0P9	8.47	2.32	2.82	18.66
2S0P6	8.20	2.28	2.58	18.55
2S0P3	6.88	2.17	2.56	17.72

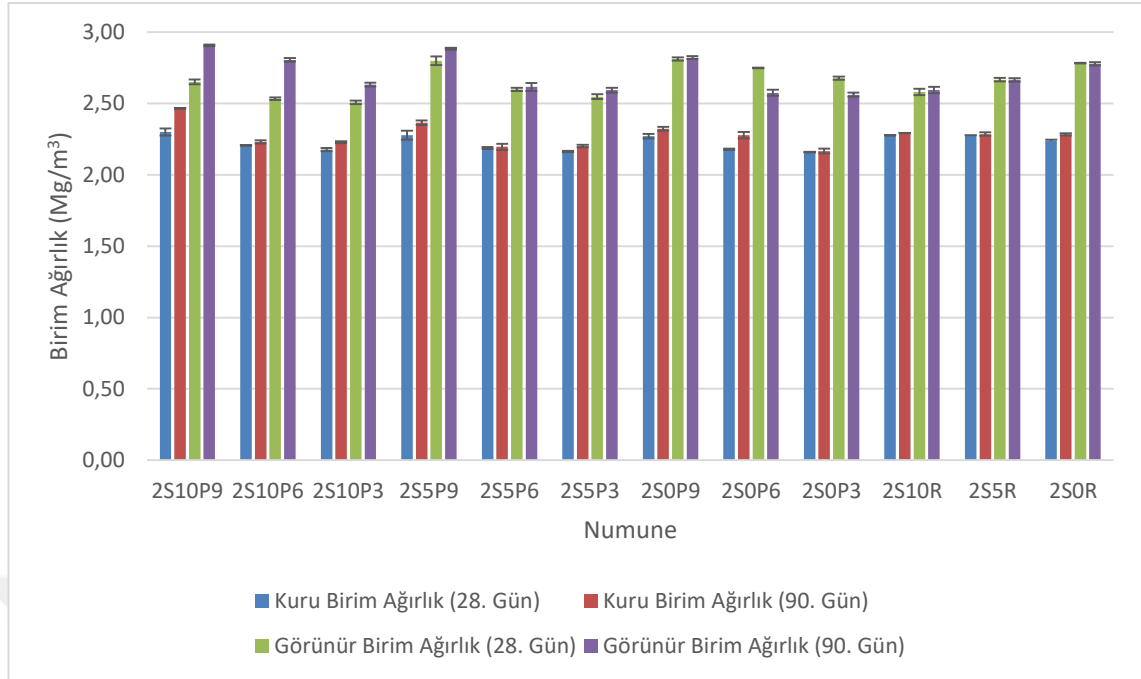
Çizelge 4.11 üzerinde görüldüğü üzere maksimum su emme ve görünür boşluk

oranları sırasıyla %8.47 ve %18.66 ile 2S0P9 numunesine aittir. En yüksek kuru birim ağırlıklar 2.47 Mg/m^3 ile 1S10P9'a ait iken, maksimum görünür birim ağırlık 2.91 Mg/m^3 ile 2SP9'a aittir.



Şekil 4.8. 28 ve 90 günlük 2. serinin yüzdece su emme ve görünür boşluk oranları

Paslanmaz çelik içeren numuneler üzerinde gerçekleştirilen deneylerin sonucunda elde edilen veriler Çizelge 4.10 ve 4.11’de gösterilmiştir. Su emme miktarları, 2S10P9, 2S10P6, 2S10P3, 2S5P9, 2S5P6, 2S5P3, 2S0P9, için kontrol numuneler ile kıyaslandığında sırasıyla, %18.98, %18.89, %18.42, %23.99, %13.71, %8.73, %2.59 artış olurken, 2S0P6, 2S0P3 için %1.72, %6.16 azalış olmuştur. 2S10P9, 2S10P6, 2S10P3, 2S5P9, 2S5P6, 2S5P3, 2S0P9, 2S0P6 numunelerinin kontrol numunelere göre yüzdece görünür boşluk oranlarında artış gerçekleşmiş ve bu artışlar sırasıyla, %18.94, %8.03, %7.57, %21.37, %8.28, %4.87, %1.83, %0.35 oranında tespit edilmiştir. Yalnızca 2S0P3 için bu değerdeki azalış miktarı %0.92 olarak gözlemlenmiştir. 90 günlük yüzdece su emme miktarları kontrol numuneleri ile karşılaştırıldığında, 2S10P9, 2S10P6, 2S10P3, 2S5P9, 2S5P6, 2S5P3, 2S0P9, 2S0P6 için sırasıyla, %16.09, %14.60, %9.92, %22.64, %15.07, %7.05, %11.35, %7.74 artış gösterirken, 2S0P3 için %9.57 azalış göstermiştir. Görünür boşluk değerlerinin kontrol numuneler ile kıyaslanması sonucu, 2S10P9, 2S10P6, 2S10P3, 2S5P9, 2S5P6, 2S5P3, 2S0P9, 2S0P6, 2S0P3 için bu oranların değişimi sırasıyla, %18.35, %12.33, %9.93, %12.05, %10.26, %5.77, %6.00, %6.92 ve %1.53 artış şeklinde olmuştur.



Şekil 4.9. 28 ve 90 günlük 2. serinin kuru birim ağırlık ve görünür birim ağırlık değerleri

Paslanmaz çelik içeren harçların üzerinde uygulanan fiziksel deneylerin sonuçları Şekil 17’de gösterilmiştir. 28 günlük kuru birim ağırlık değerleri kontrol numuneleri ile kıyaslandığında ise, 2S10P6, 2S10P3, 2S5P6, 2S5P3, 2S0P6, 2S0P3 için sırasıyla, %3.11, %4.38, %3.83, %4.94, %2.67, %3.58 azalış tespit edilirken, 2S10P9, 2S5P9, 2S0P9 için %1.03, %0.11, %1.44 artış tespit edilmiştir. Görünür birim ağırlık değerleri kontrol numuneleri ile karşılaştırıldığında ise, 2S10P6, 2S10P3, 2S5P6, 2S5P3, 2S0P6, 2S0P3 için sırasıyla, %1.82, %2.83, %2.55, %4.44, %1.20, %3.80 oranında azalış hesaplanırken, 2S10P9, 2S5P9, 2S0P9 için sırasıyla, %2.72, %4.99, %1.06 artış hesaplanmıştır. 90 günlük kuru birim ağırlık değerleri kıyaslandığında, kontrol numunelerine göre 2S10P9, 2S5P9, 2S5K0 için sırasıyla, %7.56, %3.49, %1.73 artış gerçekleşirken, 2S10P6, 2S10P3, 2S5P6, 2S5P3, 2S0P6, 2S0P3 için sırasıyla, %2.73, %2.80, %3.90, %3.70, %0.24, %5.11 azalış gerçekleşmiştir. 2S10P9, 2S10P6, 2S10P3, 2S5P9, 2S0P9 numunelerinin görünür birim ağırlık değerleri kontrol numuneleriyle kıyaslandığında, sırasıyla, %12.05, %8.13, %1.48, %8.21 oranlarında artış gözlemlenirken, bu ağırlık değerlerinde 2S5P6, 2S5P3, 2S0P6, 2S0P3 için sırasıyla, %1.82, %2.66, %7.31, %7.80 oranlarında azalış gözlemlenmiştir.

4.7. Sertleşmiş Harçların Kılcal Su Emme Katsayısı Tayini

Beton içerisindeki kılcal boşlukların, çelik donatı etrafındaki nem içeriğini belirlemede, ayrıca değişik zararlı bileşiklerin (klor tuzları gibi) beton içinde taşınmasında oldukça önemli bir etkisi olmasından dolayı kılcallık katsayısı çok önemli bir parametredir.

Çizelge 4.12 – 4.15 arasındaki çizelgelerde karışımlara ait, belirli dakikalarda hesaplanmış kılcal su emme katsayıları gösterilmiştir. 1 dakikalık kılcal su emme katsayılarına ait bilimsel sapmalar, 24 saat verilerinin değerlerine göre oldukça fazladır. 1 dakikalık sürenin, boşluklar içerisinde yükselmesi için yeterli bir süre olmadığını

düşünmek mümkündür. Bu yüzden 24 saat sonucunda elde edilen datalar, harçların kılcal geçirirmliliği üzerine yorumlanmasında daha isabetli olmuştur. Projede gerçekleştiği gibi Ortega-Lopez vd. (2017) ve De Gutierrez vd. (2005) metalik karakterdeki bileşenlerin kılcal su emme katsayısında azalma sağladığını belirtmişlerdir. Aguilar vd. (1999) silis dumandaki artışla birlikte kılcal su emme katsayısındaki düşüşü, silis dumanı tanelerinin boşluk yapıları dolduracak kadar küçük olmasına bağlamıştır.

Çizelge 4.12. 1. grup sertleşmiş harçların 28 günlük kılcal su emme katsayıları ($\times 10^{-3}$ cm/sn^{1/2})

Numune	K ₁	Standart Sapma (±)	P ₆₄	Standart Sapma (±)	P _{60*24}	Standart Sapma (±)
1S10R	7.88	2.47	3.64	0.54	2.30	0.09
1S5R	3.44	2.68	4.40	0.27	2.38	0.10
1S0R	3.83	2.08	5.40	0.81	3.38	0.40
1S10P9	6.35	1.37	2.71	0.31	1.71	0.11
1S10P6	5.00	1.14	2.75	0.17	1.66	0.12
1S10P3	3.42	1.87	3.02	0.40	1.83	0.07
1S5P9	1.67	1.52	3.13	0.44	1.91	0.23
1S5P6	3.25	0.91	3.22	0.52	1.94	0.22
1S5P3	3.85	1.74	3.47	0.40	2.01	0.20
1S0P9	5.08	4.79	3.91	1.68	2.35	0.61
1S0P6	4.09	0.09	3.93	0.37	2.35	0.27
1S0P3	4.30	3.23	4.09	1.65	3.38	0.53

Çizelge 4.12 metal atıkların, harçların kılcal su emme katsayılarına etkisini incelemek için 28. günde gerçekleştirilen deneylerin verilerini içermektedir. 1 dakikalık kılcal su emme katsayıları kontrol numuneler ile kıyaslandığında, 1S10P9, 1S10P6, 1S10P3, 1S5P9, 1S5P6 için sırasıyla, %19.42, %36.55, %56.60, %51.45, %5.52 oranında azalış gözlemlenirken, 1S5P3, 1S0P9, 1S0P6, 1S0P3 için sırasıyla, %11.92, %32.64, %6.79, %12.27 artış gözlemlenmiştir. Aynı numunelerin 64. dakikadaki kılcal su emme katsayıları kontrol numuneleri ile karşılaştırıldığında ise, 1S10P9, 1S10P6, 1S10P3, 1S5P9, 1S5P6, 1S5P3, 1S0P9, 1S0P6, 1S0P3 için sırasıyla, %25.55, %24.45, %17.03, %28.86, %26.82, %21.14, %27.59, %27.22 ve %24.26 düşüş gerçekleşmiştir. 24 saat sonra, aynı şartlarda yapılan kıyaslamalar sonucu ise, 1S10P9, 1S10P6, 1S10P3, 1S5P9, 1S5P6, 1S5P3, 1S0P9, 1S0P6 için sırasıyla, %25.65, %27.83, %20.43, %19.75, %18.49, %15.55, %30.46, %30.46 oranında azalma tespit edilirken, sadece S0P3 için %0.02 artma hesaplanmıştır.

Çizelge 4.13. 1. grup sertleşmiş harçların 90 günlük kılcal su emme katsayıları ($\times 10^{-3}$ cm/sn^{1/2})

Numune	K ₁	Standart Sapma (±)	P ₆₄	Standart Sapma (±)	P _{60*24}	Standart Sapma (±)
1S10R	4.63	2.96	2.52	0.91	0.86	0.24
1S5R	5.73	2.90	2.77	0.38	1.14	0.15
1S0R	5.27	2.05	4.30	0.99	2.35	0.38
1S10P9	3.17	0.40	2.15	0.04	1.01	0.02
1S10P6	4.20	0.49	2.68	0.14	1.20	0.11
1S10P3	4.25	0.78	2.53	0.26	1.33	0.06
1S5P9	3.93	0.12	2.61	0.07	1.35	0.06
1S5P6	4.38	0.25	2.59	0.06	1.35	0.03
1S5P3	3.66	0.46	2.60	0.18	1.44	0.13
1S0P9	5.22	0.47	3.67	0.76	1.87	0.21
1S0P6	5.89	5.17	3.77	0.61	2.07	0.21
1S0P3	2.18	6.92	3.40	0.71	2.06	0.20

Çizelge 4.13 metal atıkların, harçların kılcal su emme katsayılarına etkisini incelemek için 90. günde gerçekleştirilen deneylerin sonuçlarını vermektedir. 1 dakikalık kılcal su emme katsayıları kontrol numuneler ile kıyaslandığında, 1S10P9, 1S10P6, 1S10P3, 1S5P9, 1S5P6, 1S5P3, 1S0P9, 1S0P3 için sırasıyla, %31.53, %9.29, %8.21, %31.41, %23.56, %36.13, %0.95, %58.63 oranında azalış gözlemlenirken, 1S0P6 için %11.76 artış gözlemlenmiştir. Aynı numunelerin 64. dakikadaki kılcal su emme katsayıları kontrol numuneleri ile karşılaştırıldığında, 1S10P9, 1S5P9, 1S5P6, 1S5P3, 1S0P9, 1S0P6, 1S0P3 için sırasıyla, %14.68, %5.78, %6.50, %6.14, %14.65, %12.33, %20.93 azalış gerçekleşirken, 1S10P6, 1S10P3 için sırasıyla, %6.35 ve %0.40 yükseliş gerçekleşmiştir. 24 saat sonrasında yapılan (aynı şartlarda) kıyaslamalar sonucu ise, 1S10P9, 1S10P6, 1S10P3, 1S5P9, 1S5P6, 1S5P3 için sırasıyla, %17.44, %39.53, %54.65, %18.42, %18.42, %26.32 oranında artış tespit edilirken, 1S0P9, 1S0P6, 1S0P3 için sırasıyla %20.43, %11.9 ve %12.34 düşüş raporlanmıştır.

Çizelge 4.14. 2. grup sertleşmiş harçların 28 günlük kılcal su emme katsayıları ($\times 10^{-3}$ cm/sn^{1/2})

Numune	K ₁	Standart Sapma (±)	P ₆₄	Standart Sapma (±)	P _{60*24}	Standart Sapma (±)
2S10R	3.58	3.15	2.23	0.43	1.61	0.32
2S5R	1.80	1.22	2.87	0.55	1.72	0.12
2S0R	3.50	1.40	3.08	0.14	2.89	0.16
2S10P9	3.79	1.70	2.30	0.37	1.43	0.01
2S10P6	2.29	3.26	2.63	0.12	1.49	0.01
2S10P3	2.61	0.38	2.85	0.93	1.68	0.01
2S5P9	2.82	1.83	2.49	0.19	1.55	1.33
2S5P6	2.02	0.14	3.31	0.92	1.79	0.13
2S5P3	3.82	0.38	3.42	0.38	2.17	0.17
2S0P9	3.17	0.63	2.99	0.29	2.24	0.01
2S0P6	3.74	0.52	4.07	0.69	2.95	0.11
2S0P3	3.87	0.48	4.39	0.43	3.48	0.16

Çizelge 4.14 metal atıkların, harçların kılcal su emme katsayılarına etkisini incelemek için 28. günde gerçekleştirilen deneylerin verilerini içermektedir. 1 dakikalık kılcal su emme katsayıları kontrol numuneler ile kıyaslandığında, 2S10P9, 2S5P9, 2S5P6, 2S5P3, 2S0P6, 2S0P3 için sırasıyla, %5.87, %56.67, %12.22, %112.22, %6.86, %10.57 oranında artış gözlemlenirken, 2S10P6, 2S10P3, 2S0P9 için sırasıyla, %36.03, %27.09, %9.43 azalış gözlemlenmiştir. Aynı numunelerin 64. dakikadaki kılcal su emme katsayıları kontrol numuneleri ile karşılaştırıldığında ise, 2S10P9, 2S10P6, 2S10P3, 2S5P6, 2S5P3, 2S0P6, 2S0P3 için sırasıyla, %3.14, %17.94, %27.80, %15.33, %19.16, %32.14, %42.53 yükseliş gerçekleşirken, 2S5P9, 2S0P9 için sırasıyla %13.24 ve %2.92 düşüş gerçekleşmiştir. 24 saat sonra, aynı şartlarda yapılan kıyaslamalar sonucu ise, 2S10P9, 2S10P6, 2S5P9, 2S0P9 için sırasıyla, %11.18, %7.45, %9.88, %22.49 oranında azalma tespit edilirken, 2S10P3, 2S5P6, 2S5P3, 2S0P6, 2S0P3 için %4.35, %4.07, %26.16, %2.08, %20.42 artma tespit edilmiştir.

Çizelge 4.15. 2. grup sertleşmiş harçların 90 günlük kılcal su emme katsayıları ($\times 10^{-3}$ cm/sn^{1/2})

Numune	K ₁	Standart Sapma (±)	P ₆₄	Standart Sapma (±)	P _{60*24}	Standart Sapma (±)
2S10R	2.64	4.16	3.00	0.74	1.25	0.25
2S5R	10.22	2.82	4.02	1.24	1.52	0.29
2S0R	6.16	1.68	4.84	0.34	2.43	0.42
2S10P9	9.01	6.97	1.85	0.14	1.01	0.10
2S10P6	2.29	2.64	2.42	0.88	1.37	0.36
2S10P3	1.08	2.66	4.45	2.09	1.65	0.53
2S5P9	12.13	2.05	2.38	0.21	1.39	0.41
2S5P6	2.39	5.85	3.69	1.47	1.72	0.64
2S5P3	3.15	2.67	5.27	0.95	2.05	0.50
2S0P9	11.0	3.92	3.69	0.77	2.16	0.32
2S0P6	4.14	1.81	5.25	0.86	2.33	0.31
2S0P3	1.06	1.57	5.38	0.77	2.92	0.25

Çizelge 4.15 metal atıkların, harçların kılcal su emme katsayılarına etkisini incelemek için 90. günde gerçekleştirilen deneylerin sonuçlarını vermektedir. 1 dakikalık kılcal su emme katsayıları kontrol numuneler ile kıyaslandığında, 2S10P6, 2S10P3, 2S5P6, 2S5P3, 2S0P6, 2S0P3 için sırasıyla, %13.26, %59.09, %76.61, %69.18, %32.79, %82.79 oranında azalış gözlemlenirken, 2S10P9, 2S5P9, 2S0P9 için %241.29, %18.69, %78.57 artış gözlemlenmiştir. Aynı numunelerin 64. dakikadaki kılcal su emme katsayıları kontrol numuneleri ile karşılaştırıldığında, 2S10P9, 2S10P6, 2S5P9, 2S5P6, 2S0P9 için sırasıyla, %38.33, %19.33, %40.80, %8.21, %23.76 azalış gerçekleşirken, 2S10P3, 2S5P3, 2S0P6, 2S0P3 için sırasıyla, %48.33, %31.09, %8.47 ve %11.16 yükseliş gerçekleşmiştir. 24 saat sonrasında yapılan (aynı şartlarda) kıyaslamalar sonucu ise, 2S10P6, 2S10P3, 2S5P6, 2S5P3, 2S0P3 için sırasıyla, %9.60, %32.00, %13.16, %34.87, %20.16 oranında artış tespit edilirken, 2S10P9, 2S5P9, 2S0P9, 2S0P6 için sırasıyla %19.20, %8.55, %11.11 ve %4.12 azalış gözlemlenmiştir.

4.8. Sertleşmiş Harçlarda Eğilme Dayanımı Tayini

Çizelge 4.16 – 4.17 ve Şekil 4.10 – 4.11 üzerinde harçların eğilme dayanımı verilerini göstermektedir. 1 serisi 28 günlük eğilme dayanımı değerleri incelendiğinde en yüksek dayanımı 1S10P9 karışımı 12.20 MPa ile elde ederken, en düşük dayanımı 1S0R karışımı 6.99 MPa ile elde etmiştir. 2 serisinin 28 günlük eğilme dayanımı değerleri incelendiğinde ise en yüksek dayanımı 12.91 MPa ile 2S10P9 elde ederken, en düşük dayanımı 7.79 MPa ile 2S10R elde etmiştir. 90 günlük verilerde her iki seride de en yüksek eğilme dayanımı S10P9 karışımına aittir.

Eğilme dayanımında basınç dayanımına göre elde edilen belirgin düşüşlerin sebebi ise deneylerin numune yükleme proseslerinin birbirinden farklı olmasından kaynaklanmaktadır. Eğilme dayanımı tespit edilirken yük, numunenin tam ortasından doğrusal bir mesnetle uygulanmaktadır. Yük doğrusal bir alanda, yani daha küçük bir alanda numune yüzeyine tatbik edildiğinden, numune bu sürede şekil değişimi yapmadan eğilme dayanımına ulaşmaktadır.

Yaş ile birlikte numunelerin eğilme dayanımlarına artış gerçekleşmiştir. Bunun nedeni olarak zamanla hidrasyon ürünlerinin numune bünyesinde artışı söylenebilir.

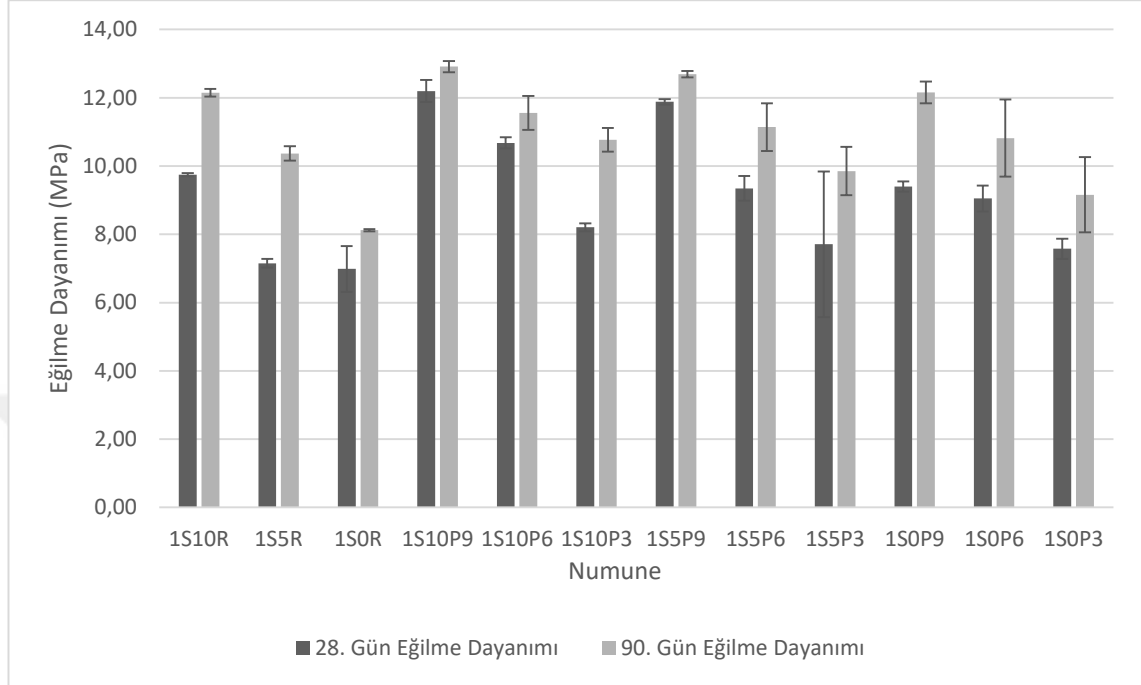
Şimşek vd. (2004) yapmış oldukları araştırmada silis dumanı ve süper akışkanlaştırıcı içeren harçların mekanik özelliklerini incelemişlerdir. 28 ve 90 günlük numunelerde silis dumanı oranı arttıkça, her yaş için eğilme dayanımı göreceli olarak artmıştır. Harçların 28 günlük eğilme dayanımları, silis dumanı miktarına bağlı olarak paralel bir yükseliş göstermiştir. %5 ve % 10 silis dumanı içeren harçların eğilme dayanımındaki bu yükselmeler, % 5 - 9 aralığında gerçekleşmiştir. Song ve Hwang (2014) ve Gao vd. (1997) çelik lif miktarıyla birlikte eğilme dayanımı değerlerinde yükseliş gerçekleştiğini çalışmalarında belirtmişlerdir. Eğilme mukavemetindeki artışın nedeninin, matris çatlamasından sonra, lifle matris arasındaki arayüzeyde çatlama gerçekleşene kadar liflerin yükü taşıyabilmesi olduğuna çalışmalarında değinmişlerdir.

Çizelge 4.16. 1. grup sertleşmiş harçların 28 ve 90 günlük eğilme dayanımı verileri

Numune	28. Gün Eğilme Dayanımı (MPa)	Standart Sapma ($\pm$)	90. Gün Eğilme Dayanımı (MPa)	Standart Sapma ($\pm$)
1S10R	9.75	0.15	12.15	0.32
1S5R	7.15	0.38	10.37	1.13
1S0R	6.99	0.30	8.12	1.10
1S10P9	12.20	0.05	12.91	0.11
1S10P6	10.68	0.12	11.56	0.21
1S10P3	8.21	0.67	10.77	0.03
1S5P9	11.88	0.33	12.69	0.17
1S5P6	9.35	0.16	11.14	0.50
1S5P3	7.71	0.12	9.85	0.34
1S0P9	9.40	0.08	12.16	0.09
1S0P6	9.05	0.36	10.82	0.70
1S0P3	7.58	2.13	9.16	0.71

28 günlük 1 serili numunelerin eğilme dayanımlarında kontrol numunelerine göre, 1S10P9, 1S10P6, 1S5P9, 1S5P6, 1S5P3, 1S0P9, 1S0P6, 1S0P3 için sırasıyla, %25.13, %9.54, %66.08, %30.65, %7.74, %34.58, %29.53, %8.46 oranında artış hesaplanırken, sadece 1S10P3 için %15.82 azalış hesaplanmıştır. 90 günlük 1 serili numunelerin

çoğunluğunda ise, kontrol numunelerine göre eğilme dayanımlarında yükseliş elde edilmiştir. Bu artışlar, 1S10P9, 1S5P9, 1S5P6, 1S0P9, 1S0P6, 1S0P3 için sırasıyla, %6.29, %22.37, %7.42, %49.73, %33.21 ve %12,81 miktarlarında hesaplanmıştır. 1S10P6, 1S10P3, 1S5P3 için sırasıyla %4.86, %11.34, %5.00 oranında azalma olmuştur.

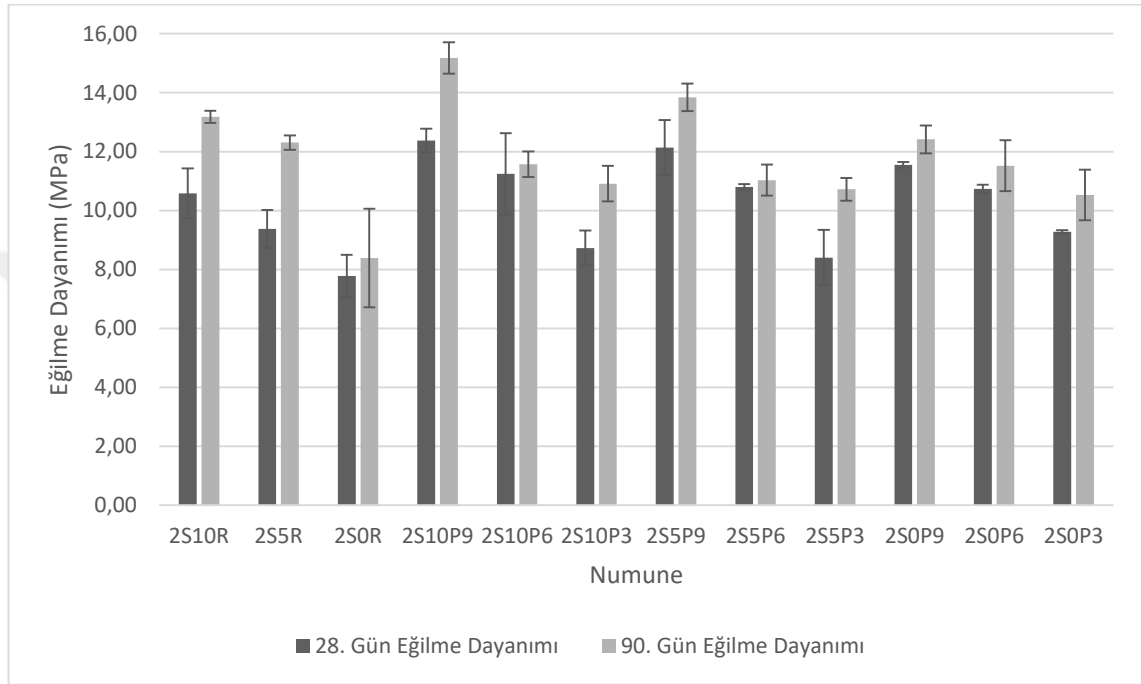


Şekil 4.10. 1S serisi harçların eğilme dayanımı değerleri

Çizelge 4.17. 2. grup sertleşmiş harçların 28 günlük eğilme dayanımı verileri

Numune	28. Gün Eğilme Dayanımı (MPa)	Standart Sapma ($\pm$)	90. Gün Eğilme Dayanımı (MPa)	Standart Sapma ($\pm$)
2S10R	10.59	0.10	13.18	0.47
2S5R	9.38	0.14	12.31	0.87
2S0R	7.79	0.04	8.39	0.86
2S10P9	12.38	0.84	15.18	0.21
2S10P6	11.24	0.64	11.57	0.24
2S10P3	8.73	0.72	10.91	1.67
2S5P9	12.14	0.40	13.84	0.54
2S5P6	10.81	1.38	11.03	0.43
2S5P3	8.40	0.59	10.72	0.60
2S0P9	11.55	0.93	12.42	0.47
2S0P6	10.73	0.09	11.52	0.87
2S0P3	8.15	0.94	10.53	0.86

28 günlük 2 serili numunelerin eğilme dayanımlarında kontrol numunelerine göre, 2S10P9, 2S10P6, 2S5P9, 2S5P6, 2S0P9, 2S0P6, 2S0P3 için sırasıyla, %16.93, %6.21, %29.49, %15.24, %48.32, %37.85, %19.25 oranında artış hesaplanırken, 2S10P3, 2S5P3 için sırasıyla, %17.52, %10.40 azalış hesaplanmıştır. 90 günlük 2 serili numunelerde ise, kontrol numunelerine göre eğilme dayanımlarında 2S10P9, 2S5P9, 2S0P9, 2S0P6, 2S0P3 için sırasıyla, %15.15, %12.46, %48.04, %37.40, %25.57 miktarlarında artış tespit edilirken, 2S10P6, 2S10P3, 2S5P6, 2S5P3 için sırasıyla %12.23, %17.20, %10.36, %12.89 azalış tespit edilmiştir.



Şekil 4.11. 2S serisi harçların eğilme dayanımı değerleri

4.9. Sertleşmiş Harçlarda Basınç Dayanımı Tayini

Her bir karışımın 6 farklı numunesi üzerinde deneyin uygulanmasıyla elde edilen veriler, gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi çizilirken, yalnızca bir tanesi temsil edecek şekilde belirlenmiş ve Şekil 4.12- 4.15 grafikleri üzerinde gösterilmiştir.

1S serisi 90 günlük basınç dayanımı değerleri incelendiğinde en yüksek dayanımı 1S10R karışımı 39.27 MPa ile sahip olurken, en düşük dayanımı 1S0P3 karışımı 22.53 MPa ile gerçekleşmiştir. 2S serisi 90 günlük basınç dayanımı değerleri incelendiğinde ise en yüksek dayanımı 34.19 MPa ile 2S10P9 elde edilirken, 24.95 MPa ile en düşük dayanımı 2S0P3 olarak tayin edilmiştir.

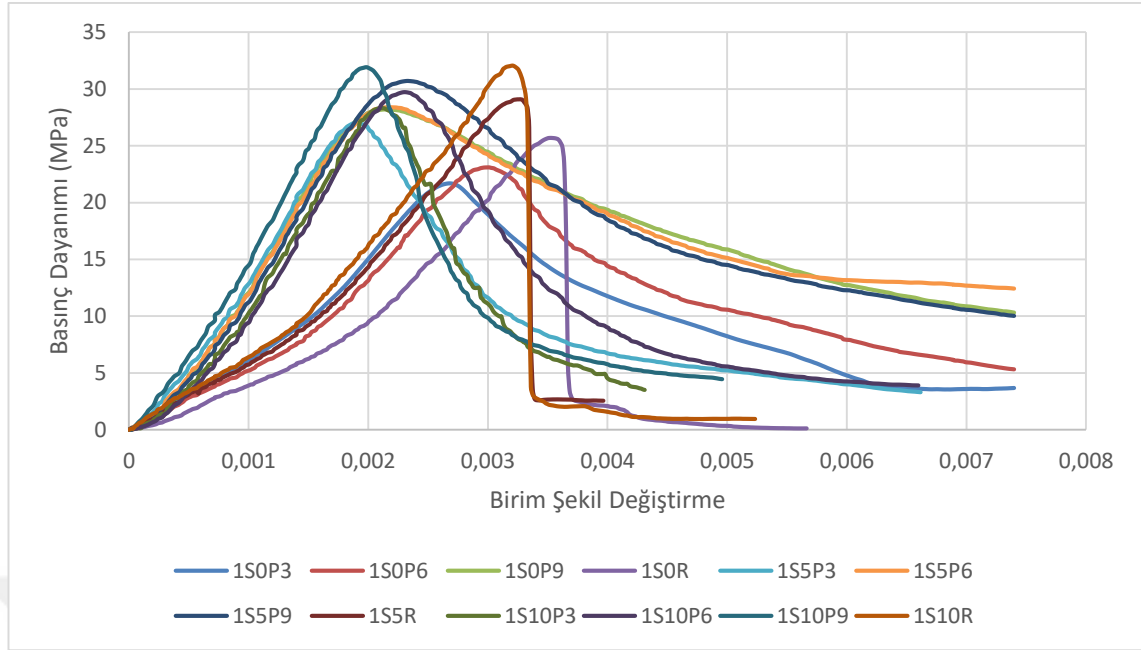
Harç içerisine silis dumanı eklenmesi sonucu 1S5R ve 1S10R numunelerinin 28 günlük sonuçları esas alınarak incelendiğinde, değişim miktarı sırasıyla, +%25.95 ve +%13.29 olarak hesaplanmıştır. Bu durum, 90 günlük deney sonuçlarına bakıldığında, sırasıyla, +%4.77 ve +%3.82 olarak görülmüştür. 2S10R ve 2S5R karışımlardaki değişiklik 28 gün sonunda sırasıyla %15.26, %14.36 oranında artış hesaplanmış, 90. gün ise %5,88 ve %5,56 oranında yükseliş hesaplanmıştır.

Agrega olarak cürufun, kullanılan paslanmaz çelik atıklarına göre, dayanım değerlerini iyileştirme yönünde yarar sağladığı söylenebilir. Harç bünyesinde mevcut paslanmaz çelik miktarı arttıkça basınç dayanımı değerleri artmıştır; fakat metal artışı kontrol numunelerine kıyasla dayanımda düşüşe yol açmıştır. 28 günlük 1S10P9, 1S10P6, 1S10P3, 1S5P6, 1S5P3, 1S0P6, 1S0P3 için bu düşüşler sırasıyla, %1.43, %8.38, %12.57, %2.65, %7.30, %10.17 ve %15.47 miktarında gerçekleşmiştir. Aynı yaşa sahip 1S5P9 ve 1S0P9 karışımlarında ise, %5,52 ve %9,49 oranında az bir kazanım sağlanmıştır. 2. seriye ait numunelerin 28 günlük basınç dayanımı değerlerinde verim elde edilememiştir. Kontrol numunelere göre azalışları, 2S10P9, 2S10P6, 2S10P3, 2S5P9, 2S5P6, 2S5P3, 2S0P9, 2S0P6, 2S0P3 için sırasıyla, %8.19, %12.38, %20.68, %14.31, %18.74, %23.12, %6.34, %9.13 ve %18.50'dir.

Her ne kadar 90 güne kadar, hidratasyon ürünlerinin numune bünyesindeki artışıyla birlikte dayanım yükselişi sağlansa da, kontrol numunelerindeki değişim oranı metal içerikli numunelerde gözlemlenmemiştir. Bahsedilen azalma verileri, 1S10P9, 1S10P6, 1S10P3, 1S5P9, 1S5P6, 1S5P3, 1S0P9, 1S0P6, 1S0P3 için sırasıyla, %12.93, %18.85, %23.71, %10.44, %24.76, %28.32, %15.00, %35.58 ve %39.90'dır. 2S10P9, 2S10P6, 2S10P3, 2S5P9, 2S5P6, 2S5P3, 2S0P9, 2S0P6, 2S0P3 için ise, sırasıyla, %20.59, %24.75, %29.27, %22.67, %29.48, %32.42, %19.32, %25.95, %30.83 miktarında olmuştur.

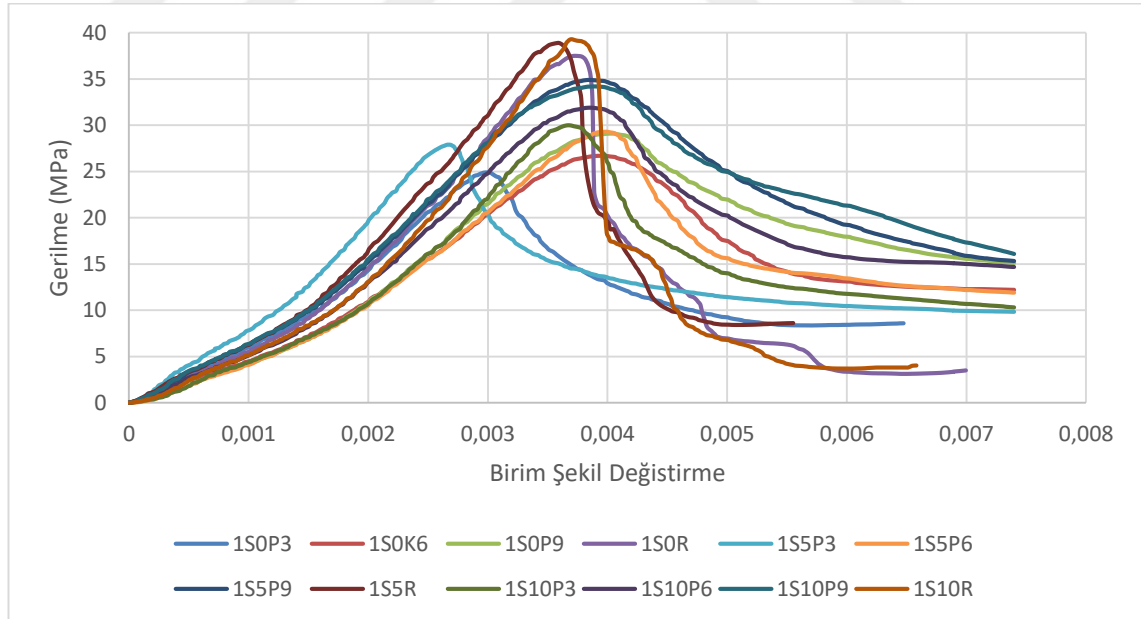
Çizelge 4.18. 1. cüruf içeren sertleşmiş harçların 28 ve 90 günlük basınç dayanımı sonuçları

Numune	28. Gün Basınç Dayanımı (MPa)	Standart Sapma ($\pm$)	90. Gün Basınç Dayanımı (MPa)	Standart Sapma ($\pm$)
1S10R	32.39	1.74	39.27	0.98
1S5R	29.14	0.86	38.92	0.55
1S0R	25.72	1.09	37.49	1.30
1S10P9	31.93	1.32	34.19	1.19
1S10P6	29.68	1.19	31.87	2.38
1S10P3	28.32	2.90	29.96	0.67
1S5P9	30.74	1.76	34.85	0.97
1S5P6	28.37	3.03	29.28	1.59
1S5P3	27.01	0.77	27.90	0.93
1S0P9	28.16	1.39	31.86	0.84
1S0P6	23.10	1.89	24.15	3.96
1S0P3	21.74	1.24	22.53	1.36



Şekil 4.12. 28 günlük 1 serisi harçların gerilme–birim şekil değiştirme değerleri

Şekil 4.12. üzerinde görüldüğü üzere, 1S0R numunesinin birim şekil değiştirme değeri 0.003514 mm iken, kontrol numunelerine silis dumanının eklenmesiyle birlikte bu değerde azalma olmuştur.



Şekil 4.13. 90 günlük 1 serisi harçların gerilme–birim şekil değiştirme değerleri

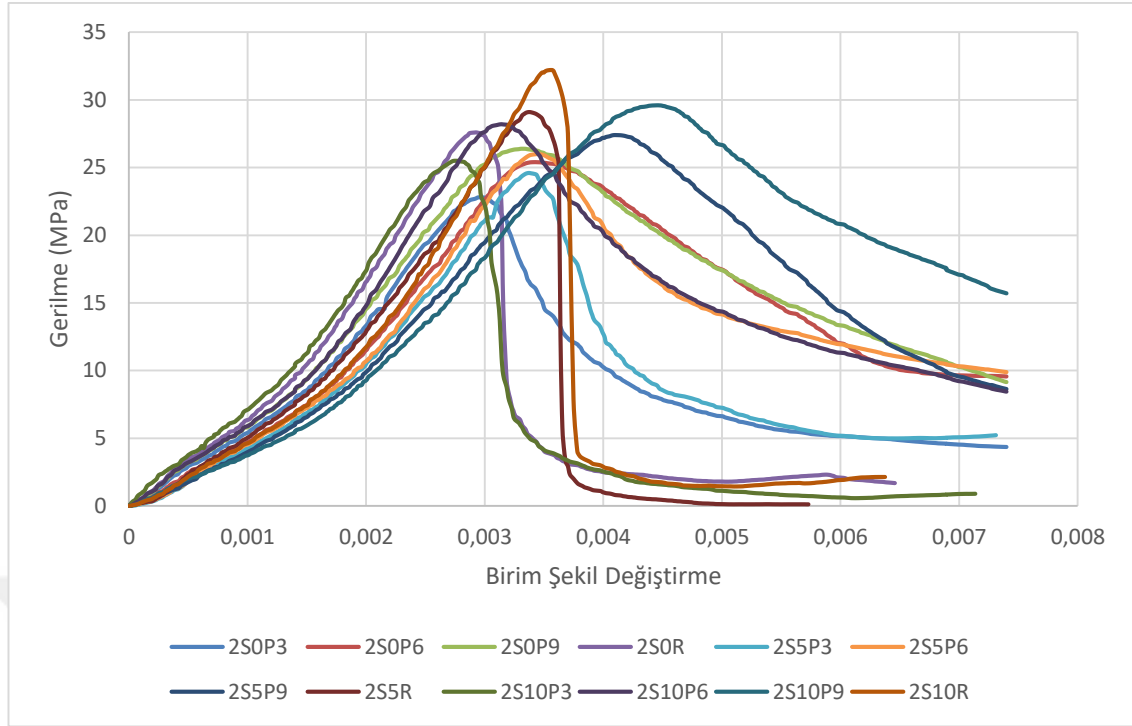
90 günlük, silis dumanı içermeyen 1S0 serisi incelendiğinde metal atık ile birlikte birim şekil değiştirme oranında artış gözlemlenmiştir. Silis dumanlı karışımlarda ise, P3 kodlu numunelerin daha erken kırıldığı tespit edilmiştir. 2S10 serisinde paslanmaz çelik atıklarının artışıyla birlikte, daha sünek davranışların ortaya çıktığı, Şekil 4.13'teki

eğrilerin x eksenlerine bakılarak söylenebilir.

Çizelge 4.19. 2. cüruf içeren sertleşmiş harçların 28 ve 90 günlük basınç dayanımı sonuçları

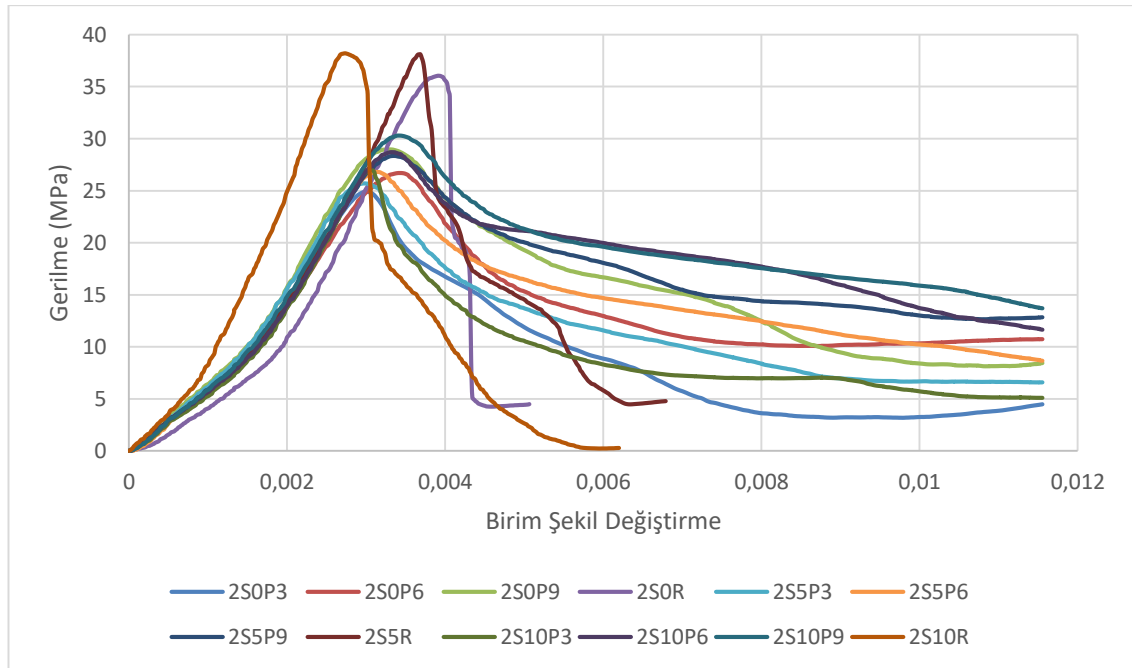
Numune	28. Gün Basınç Dayanımı (MPa)	Standart Sapma ($\pm$)	90. Gün Basınç Dayanımı (MPa)	Standart Sapma ($\pm$)
2S10R	32.21	1.54	38.19	0.71
2S5R	31.96	2.33	38.07	1.96
2S0R	27.94	1.57	36.07	1.23
2S10P9	29.57	2.29	30.33	1.26
2S10P6	28.22	1.07	28.74	1.56
2S10P3	25.55	3.19	27.01	2.21
2S5P9	27.38	0.72	29.44	0.64
2S5P6	25.97	0.82	26.85	0.77
2S5P3	24.57	2.19	25.73	0.79
2S0P9	26.17	1.71	29.10	0.58
2S0P6	25.39	0.62	26.71	0.80
2S0P3	22.78	1.83	24.95	1.43

Furlani ve Maschio (2016), pullu morfolojik yapıya sahip olan metalleri agregayla yer değiştirme yöntemi kullanılarak numunelerini hazırlamışlardır. Basınç dayanımı testine tabi tutulan bu numunelerde, metal atık miktarı arttıkça dayanımda düşüş görülmüştür. Alwaeli (2016) ise, çelik talaşlar ve pul morfolojisine sahip (metal içerikli) atıkları çimento esaslı kompozit karışımlar üretmiş ve karışımları basınç dayanımına tabi tutmuştur. Çelik talaşların artışıyla birlikte dayanım değerlerinde yükseliş elde edilmiştir.

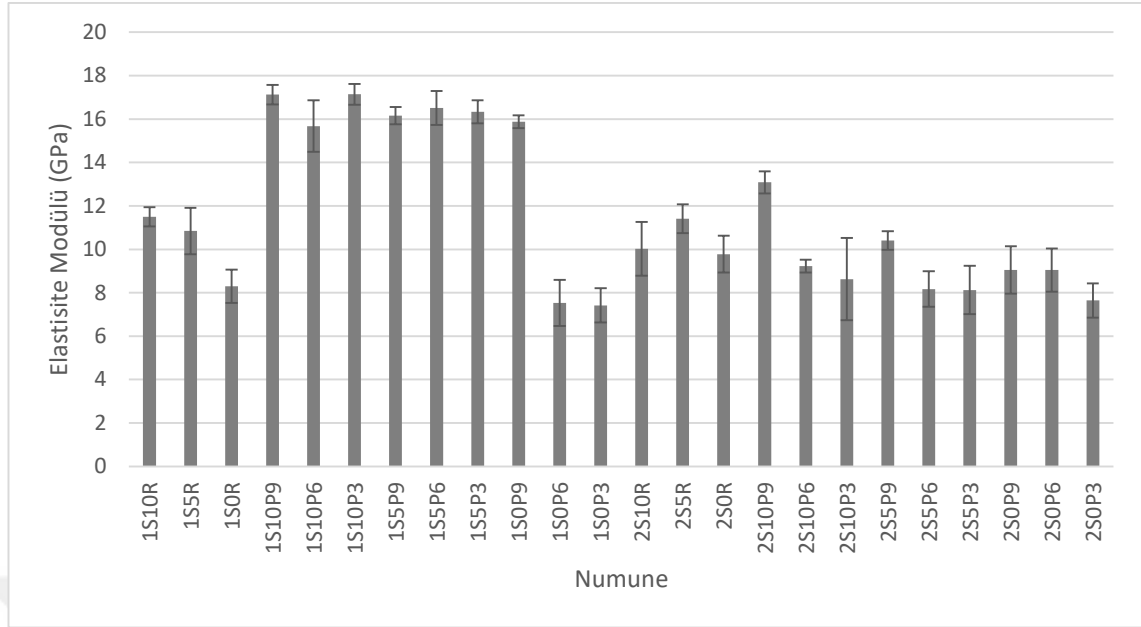


Şekil 4.14. 28 günlük 2 serisi harçların gerilme–birim şekil değiştirme değerleri

Silis dumanı oranının harçlarda artışıyla birlikte birim şekil değiştirme oranında artış Şekil 4.14 üzerinde görülebilmektedir. Paslanmaz çelik katkısıyla birlikte, harçlar belirli bir yük altında daha sünek davranışlar sergilemiştir. 90 günlük kontrol numuneler, 28 günlük numunelere göre yük altında daha rijit bir davranış sergilemiştir.

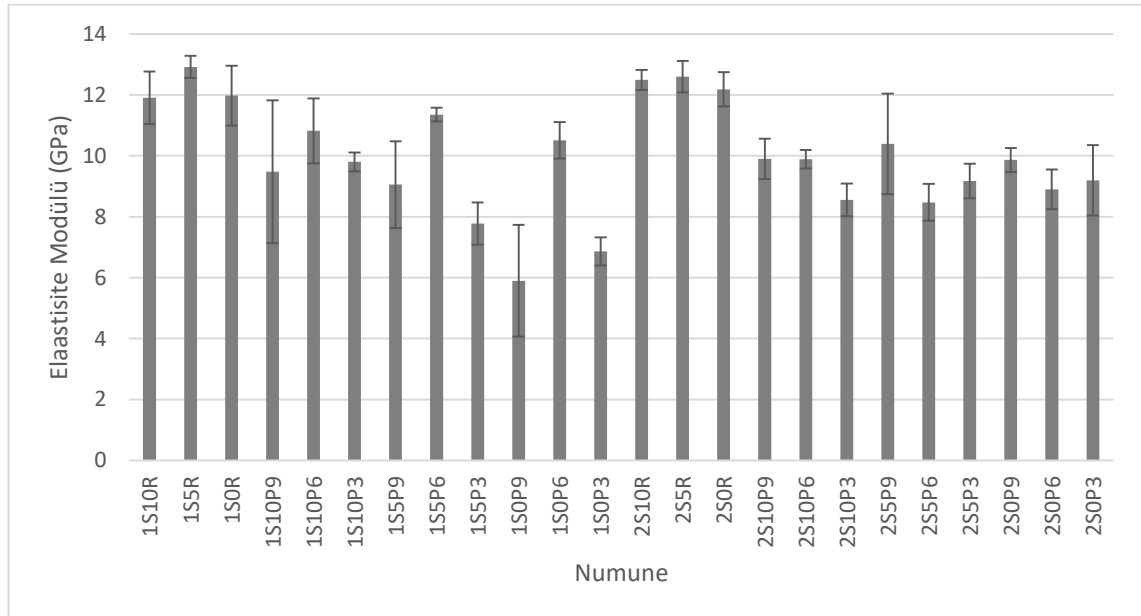


Şekil 4.15. 90 günlük 2 serisi harçların gerilme–birim şekil değiştirme değerleri



Şekil 4.16. 28 günlük harçların elastisite modülü değerleri

28 günlük numuneler üzerinde gerçekleştirilen basınç dayanımı testi sonucunda elde edilen elastisite modülü değerlerinde, kontrol numunelerine göre 1S0P6, 1S0P3 için sırasıyla, %9,23, %10.64 oranında azalış hesaplanmıştır. 2 serisinde ise 2S10P6, 2S10P3, 2S5P9, 2S5P6, 2S5P3, 2S0P9, 2S0P6, 2S0P3 için sırasıyla %7.89, %13.90, %8.86, %28.39, %28.82, %7.48, %7.48, %21.76 düşüş meydana gelirken, yalnızca 2S10P9 için %21.76 yükselme gerçekleşmiştir. Silis dumanının harç içerisinde bulunmasıyla, numunelerin elastisite modüllerinde meydana gelmiştir.



Şekil 4.17. 90 günlük harçların elastisite modülü değerleri

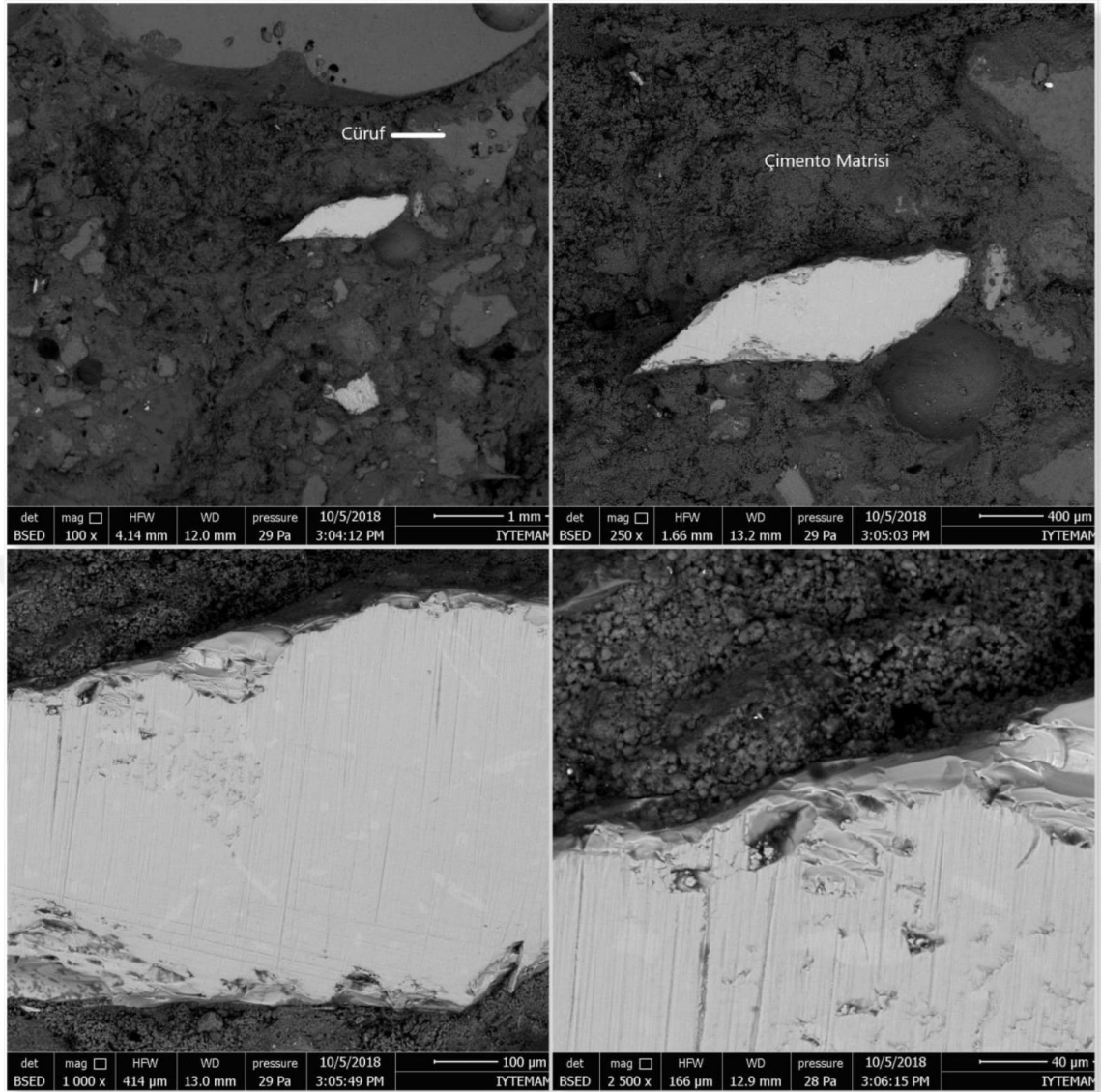
90 günlük karışımların elastisite modülleri kontrol numuneler ile kıyaslandığında elastisite modülü değerlerinde azalmanın olduğu görülebilir. Bu durumda 90. gün verileri doğrultusunda, paslanmaz çelik mevcudiyetinin, yük altındaki harçlarda, kontrol numunelerine göre daha sünek bir davranış göstermesini sağladığı söylenilebilir. 90 günlük numuneler üzerinde gerçekleştirilen basınç dayanımı testi sonucunda elde edilen elastisite modülü değerlerinde, kontrol numunelerine göre 1S10P9, 1S10P6, 1S10P3, 1S5P9, 1S5P6, 1S5P3, 1S0P9, 1S0P6, 1S0P3 için sırasıyla, %20.40, %9.12, %17.69, %29.90, %12.12, %39.81, %50.74, %12.25, %42.68 oranında ortalama bir artış hesaplanmıştır. 2 serisinde ise, 2S10P9, 2S10P6, 2S10P3, 2S5P9, 2S5P6, 2S5P3, 2S0P9, 2S0P6, 2S0P3 için sırasıyla %20.74, %20.84, %31.52, %17.53, %32.74, %27.15, %19.05, %26.96, %24.52 düşüş tespit edilmiştir.

4.10. Sertleşmiş Harçlarda SEM Görüntüleri ve EDX Sonuçları

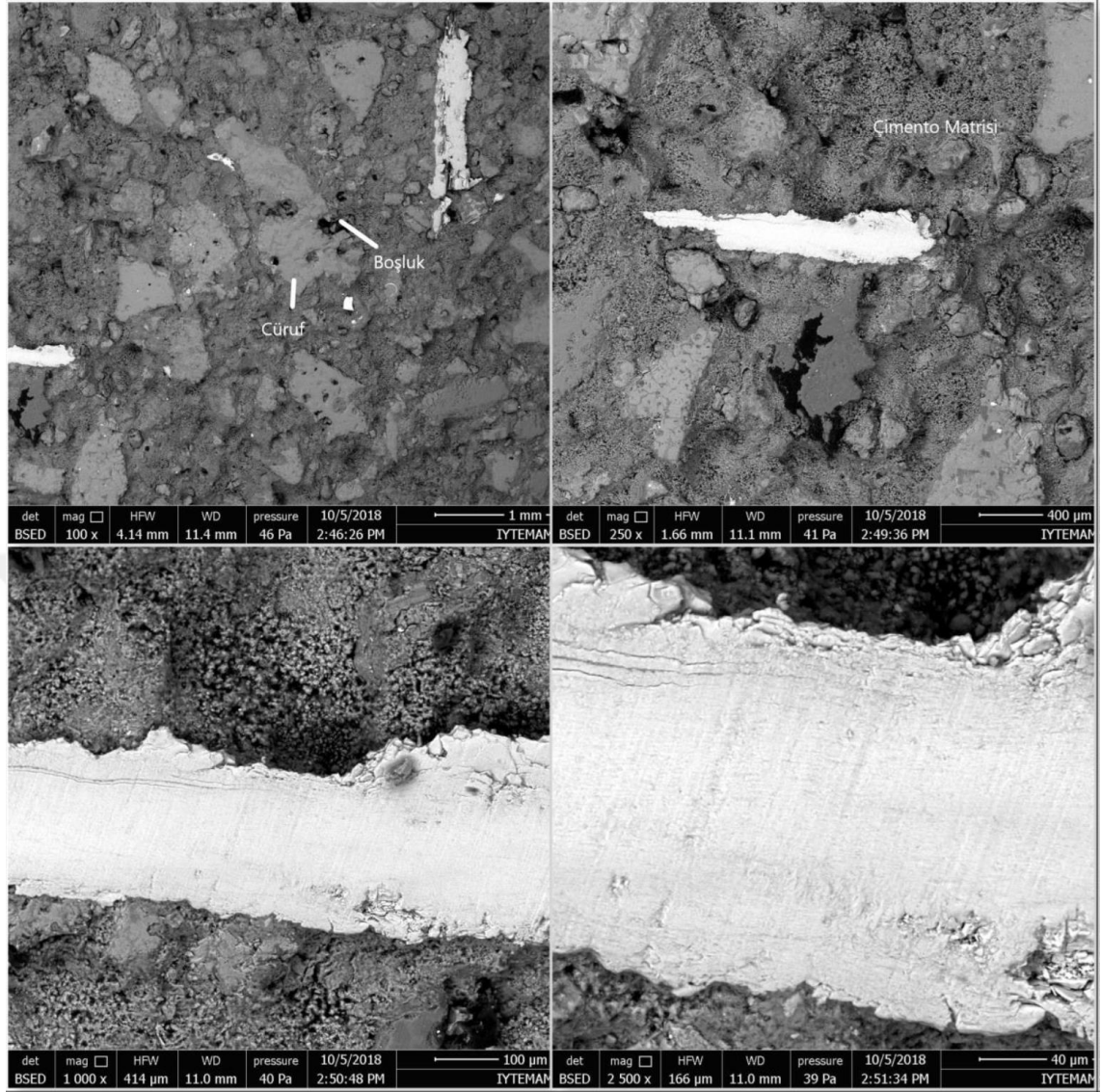
Sertleşmiş harçların iç yüzey kısmından, karışımı temsil edecek şekilde alınmış numuneler üzerinde gerçekleştirilen SEM görüntüleri Şekil 4.18 – 4.21 üzerinde sunulmuştur. Oluşturulan kolajlardaki yakınlaştırma miktarları soldan sağa, yukarıdan aşağıya yönünde sırasıyla 100x, 250x, 1000x ve 2500x olarak belirlenmiştir. 2500x miktarında yakınlaştırma sonucu elde edilen verilerde paslanmaz çelik ve çimento matrisi arasında oluşan ara yüzeyi rahatlıkla görebilmek mümkündür.

SEM görüntüleri incelendiğinde, çimento hamurunun metal içerikli agregalarla aderansının, cüruf agregalara göre daha yüksek olduğu söylenebilir. Metal atıkların EDX çıktıları, beklenen elementel içeriğin XRF ve XRD sonuçlarıyla paralel olduğunu göstermiştir. Çimento hamur matrisinin EDX spektrumları incelendiğinde, elde edilen elementler ağırlıkça C, O, Ca, Si, N elementleridir. Furlani ve Mascio (2016) çalışmalarındaki SEM görüntüleri incelendiğinde, benzer çıktıların elde edildiği saptanmıştır. Dayanım deneyleri sonrasında kırılan yüzeylerden de alınan SEM görüntüleri kırılmanın matris kısmında gerçekleştiğine dair bulgular sunmuştur.

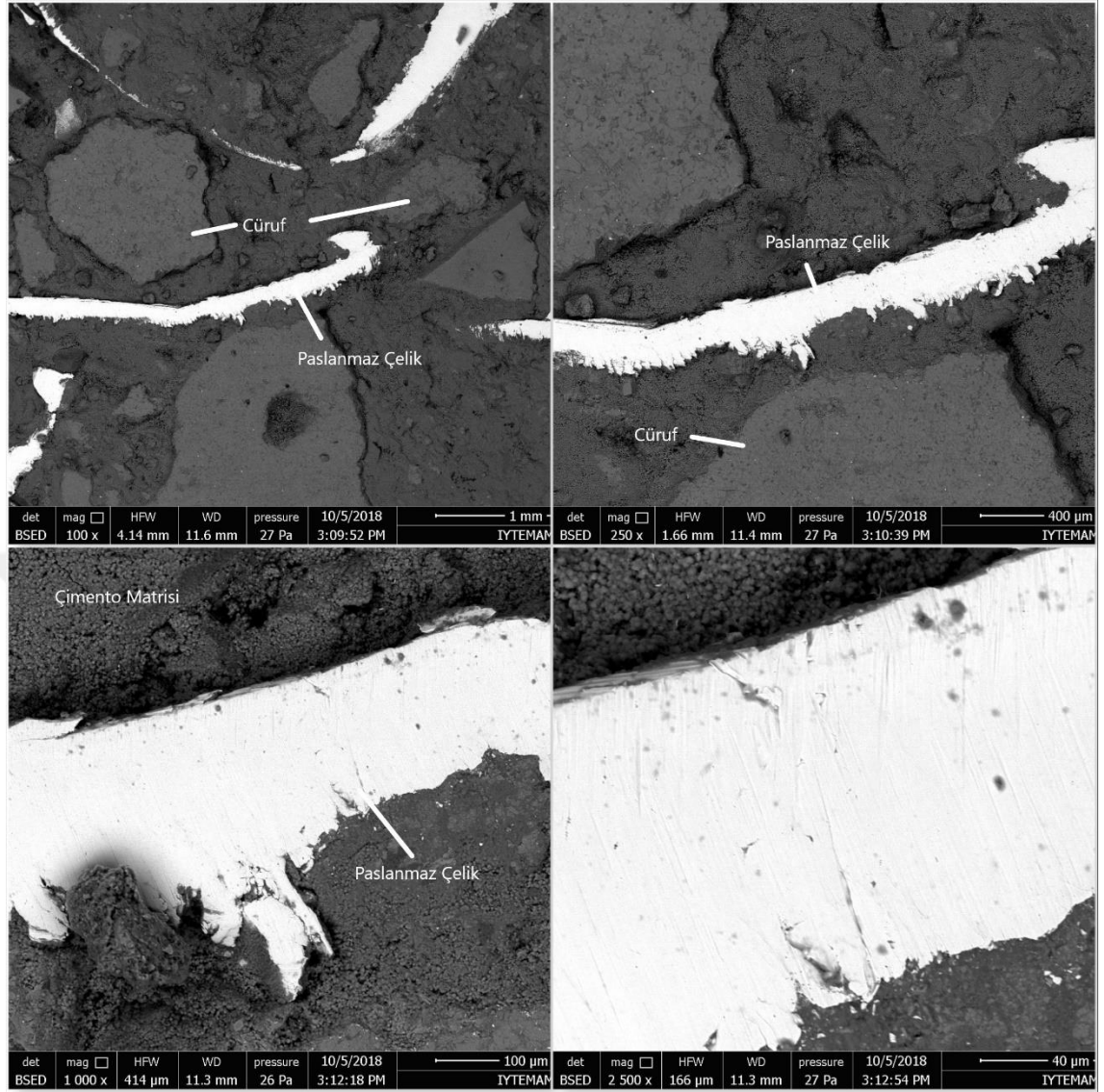
Şekil 4.18 incelendiğinde silis dumanı içermeyen harçlarda boşluklu yapının Şekil 4.19'daki silis dumanı içeren boşluklu yapıya göre daha çok mevcudiyeti rahatlıkla görülebilir. Şekil 4.20 ve Şekil 4.21 görüntülerinde paslanmaz çelik atığının geometrik olarak ince ve uzun olduğu göze çarpmaktadır.



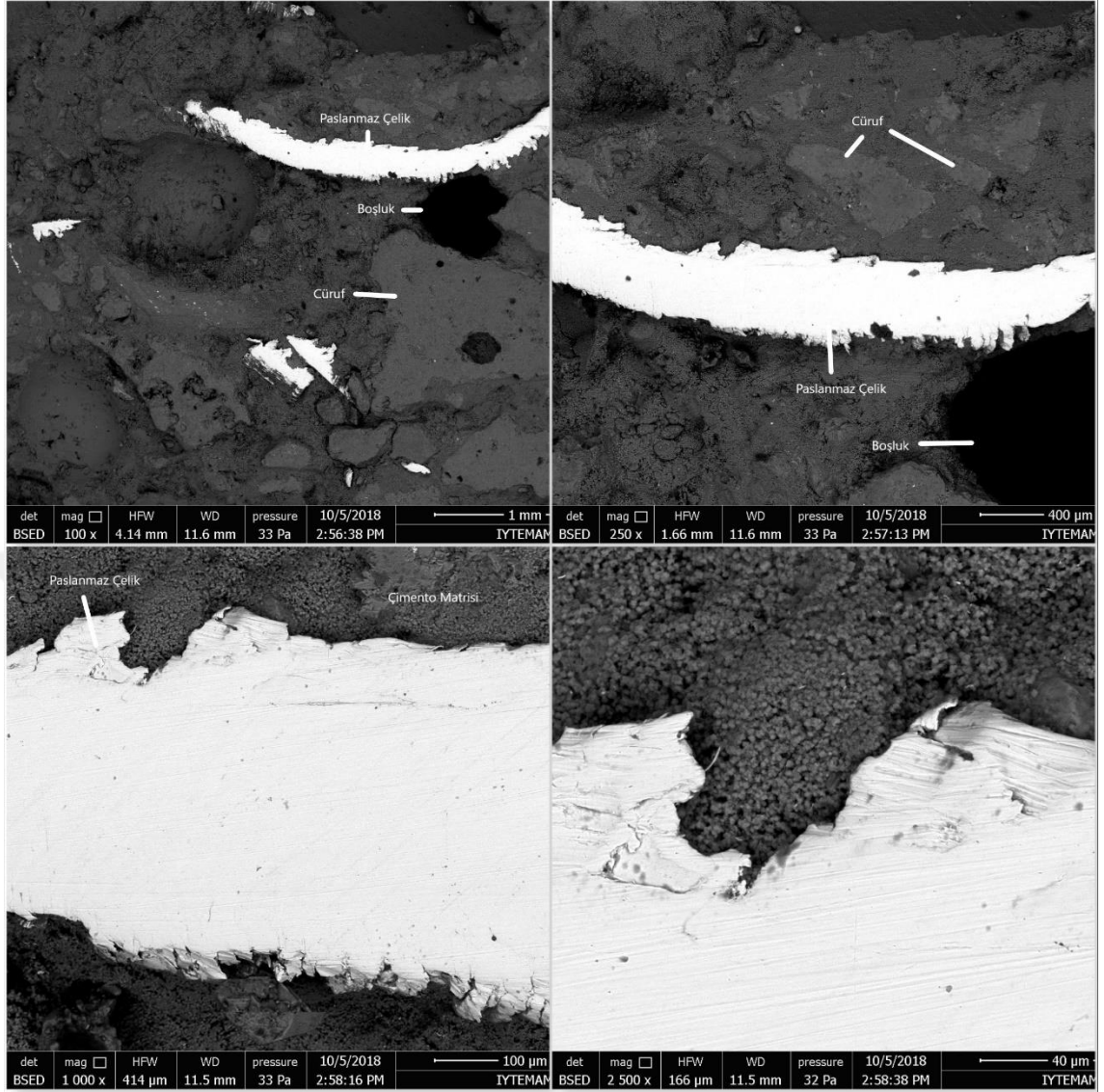
Şekil 4.18. 2S0R numunesinin SEM görüntüleri



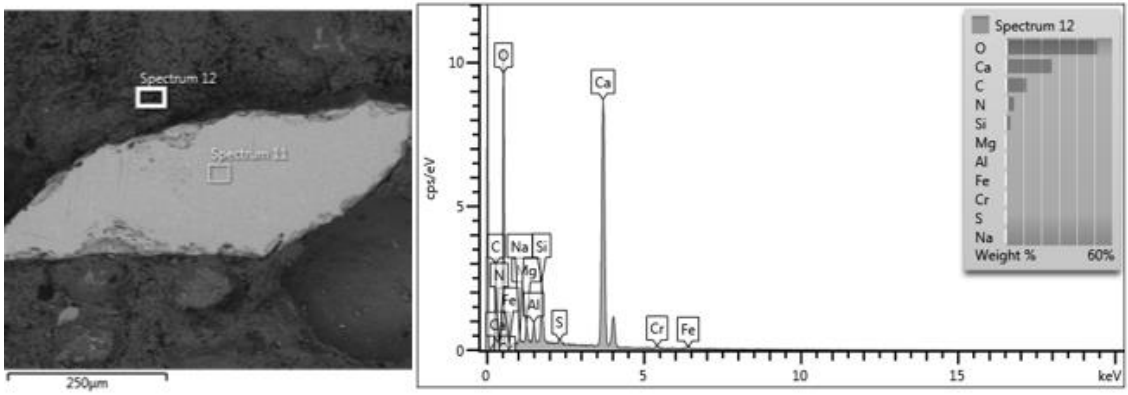
Şekil 4.19. 2S10R numunesinin SEM görüntüleri



Şekil 4.20. 2SOP9 numunesinin SEM görüntüleri

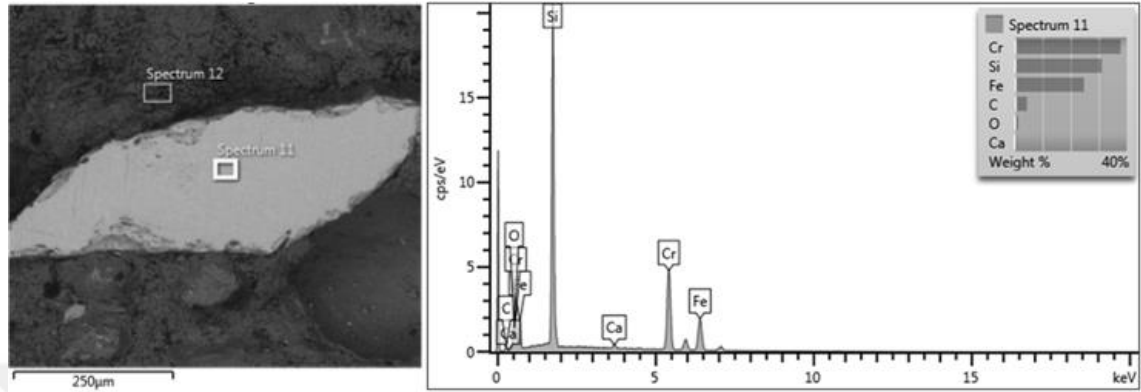


Şekil 4.21. 2S10P9 numunesinin SEM görüntüleri



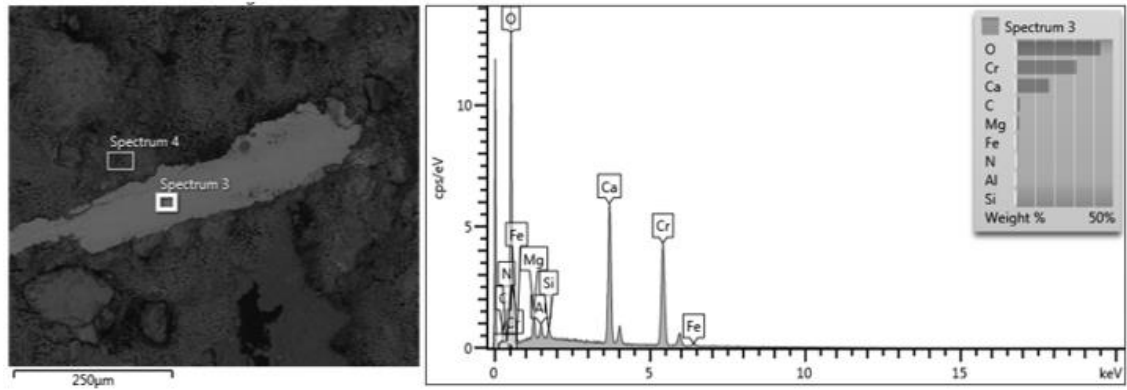
Şekil 4.22. 2S0R numunesine ait SEM görüntüsü ve seçilen bölgedeki EDX spektrumları

2S0R numunesinin spektrum 12 bölgesinde yapılan analizi sonucunda, enerji dağılımlı spektrometri kullanılarak yüzey alanından elde edilen bileşiğin ağırlıkça elementel miktarları sırasıyla Ca:N:Si:Mg=25.95:4.71:2.72:0.83 olarak saptanmıştır.



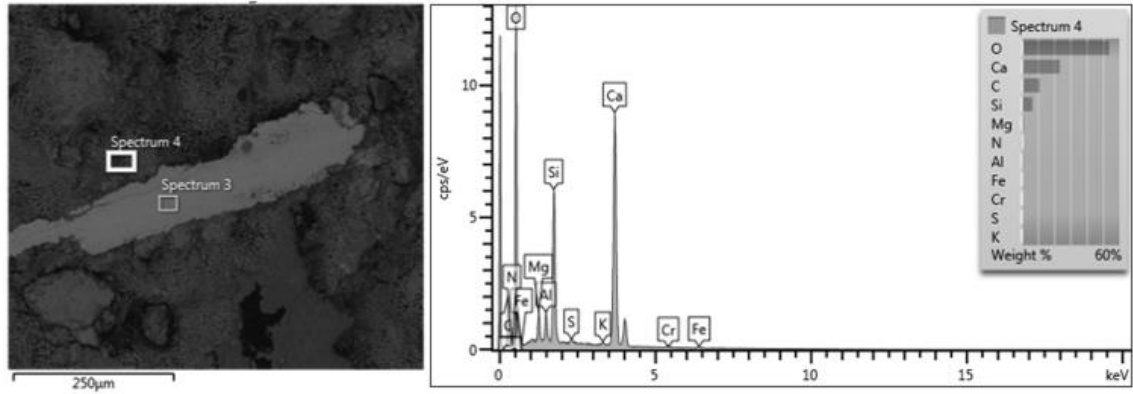
Şekil 4.23. 2S0R numunesine ait SEM görüntüsü ve seçilen bölgedeki EDX spektrumları

S0R numunesinin spektrum 11 bölgesinde yapılan SEM analizi sonucu, enerji dağılımlı spektrometri kullanılarak yüzey alanından elde edilen bileşiğin ağırlıkça elementel miktarları sırasıyla Cr:Si:Fe:C=37.82:31.11:24.71:4.43 olarak bulunmuştur.



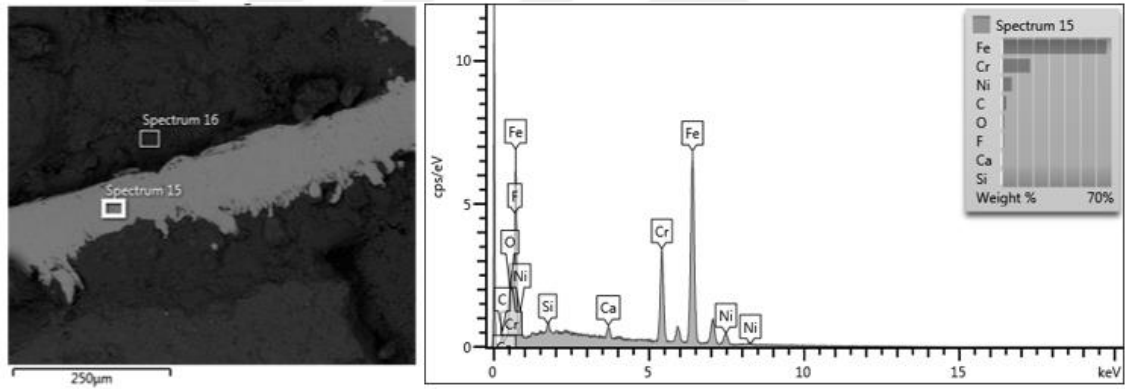
Şekil 4.24. 2S10R numunesine ait SEM görüntüsü ve seçilen bölgedeki EDX spektrumları

2S10R numunesinin spektrum 3 bölgesinde yapılan SEM analizi sonucu, enerji dağılımlı spektrometri kullanılarak yüzey alanından elde edilen bileşiğin ağırlıkça elementel miktarları sırasıyla O:Cr:Ca=43.56:31.35:17.30 sonucuna varılmıştır.



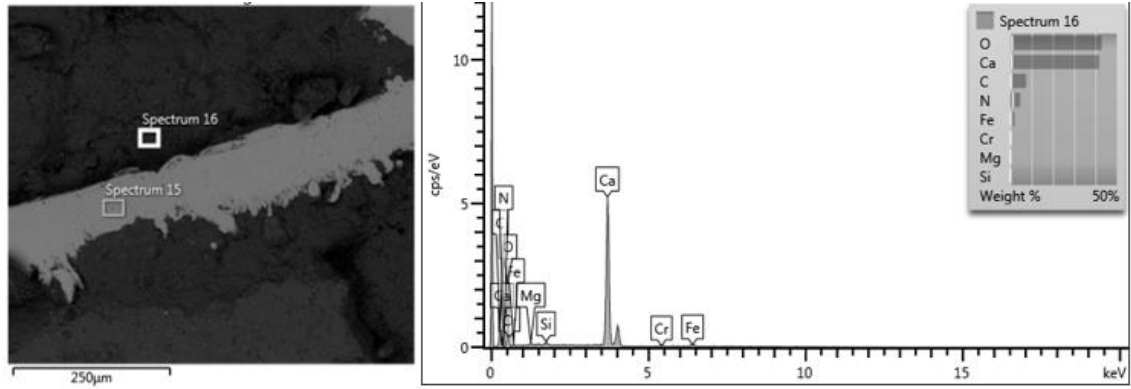
Şekil 4.25. S10R numunesine ait SEM görüntüsü ve seçilen bölgedeki EDX spektrumları

S10R numunesinin spektrum 4 bölgesinde yapılan analiz sonucunda, enerji dağılımlı spektrometri kullanılarak yüzey alanından elde edilen bileşiğin ağırlıkça elementel miktarları sırasıyla Ca:Si:Mg:Al=23.54:6.65:1.35:1.17 olarak bulunmuştur. 4 numaralı spektrumda Si ve Ca elementleri, çimento hamuru içerisindeki bağlayıcı yapı olan C-S-H jellerinde görülmektedir.



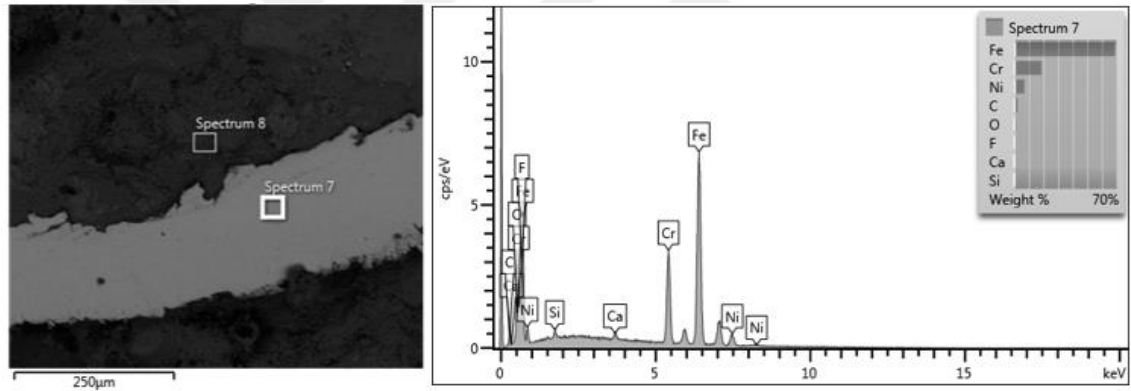
Şekil 4.26. 2S0P9 numunesine ait SEM görüntüsü ve seçilen bölgedeki EDX spektrumları

2S0P9 numunesinin spektrum 15 bölgesinde yapılan SEM analizi sonucu, enerji dağılımlı spektrometri kullanılarak yüzey alanından elde edilen bileşiğin ağırlıkça elementel miktarları sırasıyla Fe:Cr:Ni=66.87:18.33:6.56 olarak saptanmıştır.



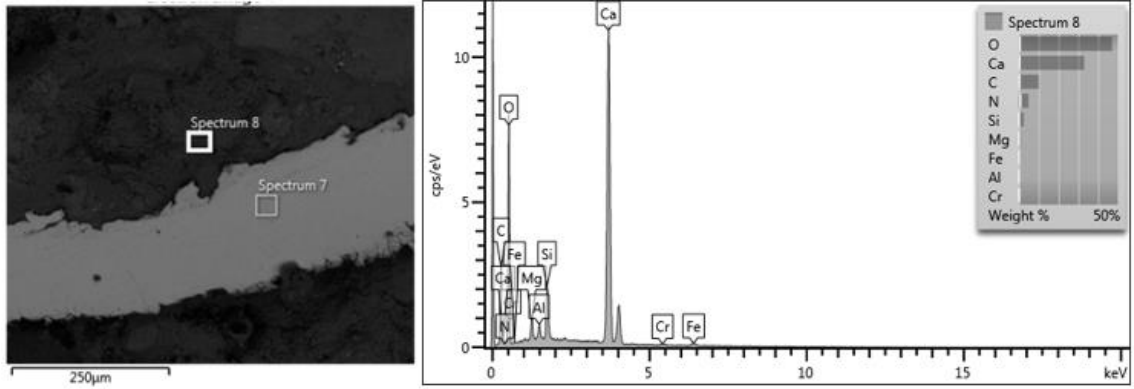
Şekil 4.27. 2S0P9 numunesine ait SEM görüntüsü ve seçilen bölgedeki EDX spektrumları

2S0P9 numunesinin spektrum 16 bölgesinde yapılan SEM analizi sonucu, enerji dağılımlı spektrometri kullanılarak yüzey alanından elde edilen bileşiğin ağırlıkça elementel miktarları sırasıyla Ca:N:Fe:Cr=41.70:4.65:1.94:0.62 olarak tespit edilmiştir.



Şekil 4.28. 2S10P9 numunesine ait SEM görüntüsü ve seçilen bölgedeki EDX spektrumları

2S10P9 numunesinin spektrum 7 bölgesinde yapılan SEM analizi sonucu, enerji dağılımlı spektrometri kullanılarak yüzey alanından elde edilen bileşiğin ağırlıkça elementel miktarları sırasıyla Fe:Cr:Ni=68.89:18.57:6.95 olarak bulunmuştur.



Şekil 4.29. 2S10P9 numunesine ait SEM görüntüsü ve seçilen bölgedeki EDX spektrumları

2S10P9 numunesinin spektrum 8 bölgesinde yapılan SEM analizi neticesinde, enerji dağılımlı spektrometri kullanılarak yüzey alanından elde edilen bileşiğin ağırlıkça elementel miktarları sırasıyla Ca:Ni:Si:Mg=32.97:4.81:2.38:0.95 olduğu sonucuna varılmıştır.

5. SONUÇLAR

Değişik oranlarda ve geometrik yapıda metal lifli çimento esaslı kompozitler bugüne kadar yapı malzemeleri alanında kullanılmaktadır. Özellikle silis dumanı ve cüruf, betonun ve harçların bileşeni olarak kullanıldığı birçok çalışmaya literatürde rastlamak mümkündür. Bu tez çalışmasında, piyasada bulunan metal liflerin yerini alması amacıyla, paslanmaz çelik atıkları kullanılmıştır. Bu atıkların harçlar üzerindeki belirli fiziksel ve mekanik özelliklerine etkisi incelenmiş ve performansta iyileşme elde edildiği için ekonomik anlamda da kazanım sağlanmıştır.

İki farklı cürufun agrega olarak kullanılması sürdürülebilirlik adına bir çalışma olarak bu tezde yer almıştır. Agrega olarak kullanılan, kimyasal içerikleri farklı iki cürufun harçlar üzerindeki etkisinin yadsınamayacak sonuçlara ulaştıracağı bu çalışmayla savunulabilir.

Paslanmaz çelik atıkların harç içerisinde bir bileşen olarak bulunma miktarı arttıkça, eğilme dayanımı değerlerindeki artış miktarında paralellik hesaplanmıştır. Buna sebep olarak çimento matrisinin metal parçacıkların etrafına yerleşmesi ve aderans etkisi gösterilebilir. Numunelerin bünyesindeki lifli yapı, belirli bir yük altında kırılma davranışı olarak sünek davranmasını sağlamaktadır.

Silis dumanının numune bünyesindeki boşluklu yapıyı azaltmasından dolayı ve hidrasyon sonucu oluşturduğu jellerin yardımıyla, silis dumanı mevcudiyetinin artması numunelerin dayanım değerlerinde artış sağlamıştır. Özgül yüzey alanının çimentoya göre daha yüksek olması, su ile tepkimelerde daha reaktif hale gelmesini sağlamıştır. Silis dumanı bu sebeple, harçların dayanımla ilgili özelliklerinde, çimentoya göre daha kısa sürede katkıda bulunmuştur.

Silis dumanının bağlayıcı olarak bulunduğu harçlarda su emme miktarında azalış gerçekleşmiştir. Su yalıtımının önemli olduğu yapılarda silis dumanı içeren numunelerin kullanımı ekonomik ve işlevsellik anlamında olumlu bir kullanım alanı oluşturabilir.

Numunelerin kılcal geçirimsizlik özellikleri üzerinde silis dumanının etkisi yüksektir. Bunun nedeninin silis dumanının harç bünyesindeki gözenekleri doldurmasıdır. Sertleşmiş numuneler üzerinde gerçekleştirilen yığın yoğunluk deneyleri sonucu elde edilen görünür boşluk oranındaki azalışın, silis dumanındaki artışla ters orantıda olması buna neden olarak sunulabilir.

Harç içerisinde paslanmaz çelik miktarının artışı sertleşmiş numunelerde açık gözeneklilik miktarında artışa neden olmuştur. Bu tür harçlar, çevreden gelen saldırılara karşı daha açık durumda olabileceğinden, kullanım yerleri ona göre seçilmelidir.

Paslanmaz çelik atıkları ile birlikte harçların elastisite modülü değerlerinde azalma gözlemlenmiştir. Sünek yapı malzemelerine ihtiyaç duyulan yerlerde projedeki gibi metal atıklar kullanılabilir.

Paslanmaz çelik atıklarının yanı sıra, metal işleme sanayinin yan ürünü olan diğer atıklar da buna benzer çalışmalarda kullanılabilir. Bu atıkların farklı kimyasal ve morfolojik yapılarda olmasının etkilediği sonuçların, bilimsel çalışmalara ve üretime

katkı sağlaması mümkündür. Bu tür karışımların sadece fiziksel, mekanik özellikleri için değil, elektromanyetik özellikleri için de projeler geliştirilerek yeni bilgilere ulaşmak olasıdır. Atık malzemelerin yeniden değerlendirilerek, yeni kullanım alanlarının meydana gelmesi, üretimde maliyetleri düşürmesi endüstri tarafından destek görecektir ve bu tür çalışmalara daha çok yatırım yapılacaktır.



6. KAYNAKLAR

- Aguilar, M.T.P, Gomes A.M., Cetlin P.R. and Friche G.H.S. 1999. Proc. II International Conference on High Performance Concrete,58, Ramado, Brazil.
- Alberti, M. G., Enfedaque, A. and Gálvez, J. C. 2017. Fibre reinforced concrete with a combination of polyolefin and steel-hooked fibres. *Composite Structures*, 171(1): 317-325.
- Alwaeli, M., 2016. The implementation of scale and steel chips waste as a replacement for raw sand in concrete manufacturing. *Journal of Cleaner Production*, 137(1): 1038-1044.
- Alwaeli, M. and Nadziakiewicz, J. 2012. Recycling of scale and steel chips waste as a partial replacement of sand in concrete. *Construction and Building Materials*, 28(1): 157-163.
- Ay, O. 2017. 1: <http://www.kuark.org/2017/04/taramali-elektron-mikroskobu-sem-eds-analizi> [Son erişim tarihi: 08.01.2020].
- Chen, Y., Wang, Y., Zhang, H. B., Li, X., Gui, C. X. and Yu, Z. Z. 2015. Enhanced electromagnetic interference shielding efficiency of polystyrene/graphene composites with magnetic Fe₃O₄ nanoparticles. *Carbon*, 82(1): 67-76.
- Chung, D.D.L. 2002. Review improving cement-based materials by using silica fume. *Journal of Materials Science*, 37(1): 673-682.
- De Gutiérrez, R. M., Diaz, L. N. and Delvasto, S. 2005. Effect of pozzolans on the performance of fiber-reinforced mortars. *Cement And Concrete Composites*, 27(5): 593-598.
- Doğan, Ü. A. 2008. Beton bileşim parametrelerinin geçirimsizlik özellikleri ve gömülü çelik donatı korozyonuna etkisi. Doktora tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 172 s.
- Fuente-Alonso, J. A., Ortega-López, V., Skaf, M., Aragón, Á. and San-José, J. T. 2017. Performance of fiber-reinforced EAF slag concrete for use in pavements. *Construction and Building Materials*, 149(1): 629-638.
- Furlani, E. and Maschio, S. 2016. Steel scale waste as component in mortars production: An Experimental Study. *Case Studies in Construction Materials*, 4(1): 93-101.
- Gao, J., Sun, W. and Morino, K. 1997. Mechanical properties of steel fiber-reinforced, high-strength, lightweight concrete. *Cement and Concrete Composites*, 19(4): 307-313.
- Gülmez, N. 2018. Bağlayıcı ve agrega olarak kullanılan endüstriyel atıkların geopolimer harçların özellikleri üzerine etkisi. Doktora tezi, Akdeniz Üniversitesi, Antalya, 172 s.
- Kahraman, N., Gülenç, B. ve Hüseyin, A. 2002. Ark kaynak yöntemi ile birleştirilen ostenitik paslanmaz çelik ile düşük karbonlu çeliğin mekanik özelliklerinin incelenmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 17(2): 75-85.
- Katherine H. and Eighmy T. T. 2000. Scanning european advances in the use of recycled

- materials in highway construction, Scanning Trip Summary Report, USA.
- Kayan, Y., Ayhan, E. ve Doğruyol, M. 2017. mineral katkıların beton karışımında kullanılması, *Bilim ve Gençlik Dergisi*, 5(1): 114-120.
- Kılınçkale F.M. 1996. Çeşitli Puzolanların puzolanik aktivitesi ve bu puzolanlarla üretilen harçların dayanımı, *İMO Teknik Dergi*, 91(1): 1217-1229.
- Kim, J. S., Cho, C. G., Moon, H. J., Kim, H., Lee, S. J. and Kim, W. J. 2017. experiments on tensile and shear characteristics of amorphous micro steel (AMS) fibre-reinforced cementitious composites. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 11(4): 647-655.
- King, D. 2012. The effect of silica fume on the properties of concrete as defined in concrete society report 74, cementitious materials. 37th Conference on Our World In Concrete & Structures, p. 23, 29-31 August, Singapore.
- Kockal, N. U. 2013. Effects of elevated temperature and re-curing on the properties of mortars containing industrial waste materials. *Transactions of Civil Engineering*, 37(1): 67-76
- Onuaguluchi, O. ve Eren, Ö. 2012. Recycling of copper tailings as an additive in cement mortars. *Construction and Building Materials*, 37(1): 723-727.
- Özkan, Ö. 2015. Çelikhane ve yüksek fırın cürufu katkılı portland çimentosunun özellikleri. *Teknik Dergi*, 17(83): 3893-3902.
- Papa, E., Medri, V., Kpogbemabou, D., Moriniere, V., Laumonier, J., Vaccari, A. 2016. Porosity and insulating properties of silica-fume based foams. *Energy Build*, 131(1): 223–232.
- Pedro, D., de Brito J. and Evangelista L. 2017. Evaluation of high-performance concrete with recycled aggregates: Use of densified silica fume as cement replacement. *Construction and Building Materials*, 147(1): 803-814.
- Santosh, P.H., Dwivedi, A.K. and Chatterjee, A.M. 2017. Optimize properties of concrete with silica fume. *MAYFEB Journal of Materials Science*, 2(1): 1-4.
- Siddique, R. and Khan M.I. 2011. Supplementary Cementing Materials. Springer, Berlin, 365 p.
- Soncu, M. 2008. GX 10 CrNiMoNb 18-10 östenitik paslanmaz çeliğin asidik çözeltilerdeki korozyon özelliklerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, 132 s.
- Song, P. S. and Hwang, S. 2004. Mechanical properties of high-strength steel fiber-reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 18(9): 669-673.
- Şimşek, O., Asena, D. U. R. ve Yaprak, H. 2004. Silis dumanı ve süperakışkanlaştırıcı katkılı harçların özellikleri. *Politeknik Dergisi*, 7(2): 169-179.
- Taş, H. H., Çoban, Ö. ve Topbaşlı, B. 2013. Endüstriyel demir talaşı atığının betonun bazı mekanik özelliklerine etkisi. *SDU International Technologic Science*, 5(1):1-11.
- Tokay, M. 2013. Betonda uk, gyfc ve sd'nin rolü: mevcut bilgi birikimi. Beton 2013 Hazır Beton Kongresi, ss. 201-238, 21-23 Şubat, İstanbul Fuar Merkezi, İstanbul
- Topçu, İ. B. ve Canbaz, M. 2002. Silis dumanlı betonların ara yüzeylerinin incelenmesi.

- ECAS2002 Uluslararası Yapı ve Deprem Mühendisliği Sempozyumu, ss. 469-476 ODTÜ, Ankara.
- Tufekci, M. M and Gokce, A. 2017. Development of heavyweight high performance fiber reinforced cementitious composites (HPFRCC)–Part I: mechanical properties. *Construction and Building Materials*, 148(1): 559-570.
- Vaclavik V., Dirner, V., Dvorsky, T. and Daxner, J. 2012. The use of blast furnace slag. *Metalurgija*, 51(4): 461-464.
- Weymueller, C., R. 1978. Welding the austenitic stainless steels. *Welding Design and Fabrication*, 51(6):82-87.
- Yaka, S. 2011. Konya bölgesi agregaları ile çelik lif kullanılarak üretilen yol betonlarının mekanik özelliklerinin incelenmesi. Yüksek Lisans tezi, Selçuk Üniversitesi, Konya, 90 s.
- Yazıcıoğlu, S., Gönen, T. Ve Çobanoğlu, Ö. C. 2005. Elazığ ferrokrom cürufunun betonun basınç dayanımı ve çarpma enerjisi üzerine etkisi. *Fırat Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilim Dergisi*, 17(4):681-686.
- Yılmaz, A. 2002 Antalya Ferrokrom İşletmesi'nin elektrik-ark fırını cüruflarının ve baca tozu atıklarının asfalt betonunda kullanılabilirliğinin araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Akdeniz Üniversitesi, Antalya, 76 s.
- Yılmaz, A. ve Süttaş, İ. 2008. Ferrokrom cürufunun yol temel malzemesi olarak kullanımı. *İMO Teknik Dergi*, 294(1):4455-4470.
- Yılmaz, M. ve Kök, B. V. 2008. Ferrokrom cürufu kullanımının bitümlü sıcak karışımların mekanik özelliklerine etkisi. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 12(3): 186-194.
- Yousefieh, N., Joshaghani, A., Hajibandeh, E. and Shekarchi, M. 2017. Influence of fibers on drying shrinkage in restrained concrete. *Construction and Building Materials*, 148(1): 833-845.

ÖZGEÇMİŞ

TOLGA ZİYA KOCAER

tolgakocaer@gmail.com



ÖĞRENİM BİLGİLERİ

Yüksek Lisans 2017-2020	Akdeniz Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Antalya
Lisans 2008-2013	İstanbul Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, İstanbul

ESERLER

Ulusal bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitaplarında basılan bildiriler

- 1- Kocaer T. Z., Kockal N. U. (2019). Permeability properties of heavy weight mortars. ISADET 2019 Conf. (Tam Bildiri)
- 2- Kockal N.U., Kocaer T. Z. (2019). Effects of using metal granules on strength and stiffness. MSAM 2019 Conf. (Tam Bildiri)
- 3- Kocaer T. Z., Kockal N. U. (2019). Drying shrinkage of mortars containing metal waste. ECSAC 2019 Conf. (Tam Bildiri)

Projeler

- 1- “Değişik oranlarda metalik karakterde agrega içeren harçların özelliklerinin araştırılması” BAP Araştırma Projesi, FYL-2019-4438, Araştırmacı, 2020

2- “Sıva harçlarının elektromanyetik özelliklerinin iyileştirilmesinde yoğunluğu yüksek atık malzeme kullanımı” TÜBİTAK 3001 – Başlangıç ArGe Projelerini Destekleme Programı, 216M078, Bursiyer, 2017-2020

