

**T.C.
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**YÜKSEK SICAKLIK SONRASI KÜR EDİLEN ALKALİ
İLE AKTİFLEŞTİRİLMİŞ HARÇLARIN DAYANIM
ÖZELLİKLERİ**

**Hazırlayan
Rabia Gizem SERTBAKAN**

**Danışman
Prof. Dr. Okan KARAHAN
Dr. Öğr. Üyesi İsmail İsa ATABEY**

Yüksek Lisans Tezi

**Ocak 2023
KAYSERİ**

**T.C.
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**YÜKSEK SICAKLIK SONRASI KÜR EDİLEN ALKALİ
İLE AKTİFLEŞTİRİLMİŞ HARÇLARIN DAYANIM
ÖZELLİKLERİ
(Yüksek Lisans Tezi)**

**Hazırlayan
Rabia Gizem SERTBAKAN**

**Danışman
Prof. Dr. Okan KARAHAN
Dr. Öğr. Üyesi İsmail İsa ATABEY**

**Ocak 2023
KAYSERİ**

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK

Bu çalışmadaki tüm bilgilerin, akademik ve etik kurallara uygun bir şekilde elde edildiğini beyan ederim. Aynı zamanda bu kural ve davranışların gerektirdiği gibi, bu çalışmanın özünde olmayan tüm materyal ve sonuçları tam olarak aktardığımı ve referans gösterdiğimi belirtirim.

Rabia Gizem SERTBAKAN

“Yüksek Sıcaklık Sonrası Kür Edilen Alkali ile Aktifleştirilmiş Harçların Dayanım Özellikleri” adlı Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi Lisansüstü Tez Önerisi ve Tez Yazma Yönergesi’ ne uygun olarak hazırlanmıştır.

Hazırlayan

Rabia Gizem SERTBAKAN

Danışman

Prof. Dr. Okan KARAHAN

İnşaat Mühendisliği ABD Başkanı

Prof.Dr. Ahmet Alper ÖNER

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım süresince her türlü yardım ve fedakârlığını eksik etmeyenve öğrencileri olmaktan gurur duyduğum danışmanlarım Prof. Dr. Okan KARAHAN ve Dr. Öğr. Üyesi İsmail İsaATABEY'e, başta annem Feyza SERTBAKAN, babam N.Naci SERTBAKAN, kardeşim Sena SERTBAKAN olmak üzere gerek laboratuvar çalışmalarında gerekse bu süreçte bana desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen kuzenlerime ve arkadaşlarıma, laboratuvar çalışmalarımda bana destek olan Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi İnşaat Mühendisliği öğrencilerinden Özgen TAVŞANCI ve Buse Pelin AŞIK'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Rabia Gizem SERTBAKAN

Aralık 2022, KAYSERİ

YÜKSEK SICAKLIK SONRASI KÜR EDİLEN ALKALİ İLE AKTİFLEŞTİRİLMİŞ HARÇLARIN DAYANIM ÖZELLİKLERİ

Rabia Gizem SERTBAKAN

**Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
Yüksek Lisans Tezi, Ocak 2023
Danışman: Prof. Dr. Okan KARAHAN**

ÖZET

Bu çalışmada alkali ile aktive edilmiş yüksek fırın cürufu ve uçucu kül içeren polipropilen lif takviyeli harçların dayanım özelliklerine yüksek sıcaklık sonrası hava kürü koşullarının etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla uçucu kül %0, %25, %50, %75, %100 oranlarında yüksek fırın cürufu ile ikame edilerek alkali ile aktive edilmiş polipropilen lifli ve lif takviyesiz kontrol harçları üretilmiştir. Harçlarda aktivatör olarak %10 oranında sodyum içeren sodyum metasilikat kullanılmıştır. Üretilen harçlar 24 saat 75°C ısıtılma küre tabi tutulmuştur. Bağlayıcının ağırlıkça %0,5, %1,0 ve %1,5 oranlarında lif takviyesi yapılarak uygun lif oranı belirlenmiştir. Harçların yüksek sıcaklık öncesi 1,7,28,56 ve 90 günlük eğilme ve basınç dayanımı değerleri elde edilmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda en uygun lif oranı %0,5 olarak seçilerek yüksek sıcaklık deneyleri gerçekleştirilmiştir. Yüksek sıcaklığa maruz bırakılan polipropilen lifli ve lifsiz kontrol harçları 1,28 ve 90 günlük ilave hava kürüne tabi tutulmuştur. Deneysel çalışma sonucunda lif takviyesi numunelerin yüksek sıcaklık öncesi eğilme ve basınç dayanımlarını arttırmıştır. Ayrıca 400°C ve 600°C yüksek sıcaklık sonrası lifsiz harçlara göre polipropilen lif takviyeli harçların eğilme dayanımları daha yüksek bulunmuştur. Yüksek sıcaklık sonrası 1,28 ve 90 gün süreyle ilave hava kürü, numunelerin eğilme ve basınç dayanımlarında kayda değer bir düşüş veya artışa neden olmamıştır. Yüksek sıcaklık sonrası eğilme ve basınç dayanımı kaybı hemen oluşmuş, 28 ve 90 günde hava kürü ile numuneler genel olarak basınç dayanımlarını korumuşlardır.

Anahtar Kelimeler: Alkali aktivasyon, cüruf, uçucu kül, polipropilen lif, yüksek sıcaklık

STRENGTH PROPERTIES OF ALKALI-ACTIVATED MORTARS CURED AFTER HIGH TEMPERATURE

Rabia Gizem SERTBAKAN

Erciyes University, Graduate School of Natural and Applied Sciences

Master Thesis, Ocak 2023

Supervisor: Prof.Dr. Okan KARAHAN

ABSTRACT

This study investigated the effect of post-fire aircuring conditions on the strength properties of polypropylene fiber-reinforced mortar containing alkali-activated blast furnace slag and fly ash. For this purpose, polypropylene fiber and fiberless control alkali-activated mortars were produced by replacing fly ash with 0%, 25%, 50%, 75%, and 100% blast furnace slag. Sodium metasilicate containing 10% NaOH was used as an activator in the mortars. The produced mortars were thermally cured at 75°C for 24 hours. The optimum fiber ratio was determined by adding fiber at 0.5%, 1%, and 1.5% weight ratios of the binder. Flexural and compressive strength values of 1, 7, 28, 56, and 90 days before high temperature were obtained. As a result of the studies, the most suitable fiber ratio was chosen as 0.5% and high-temperature experiments were carried out. Polypropylene fiber and fiberless control mortars exposed to high temperatures were subjected to 1, 28 and 90 days of additional aircuring. As a result of the experimental study, fiber-reinforced cement increased the flexural and compressive strength of the samples before high temperature. In addition, the flexural strength of polypropylene fiber-reinforced mortars was higher than fiberless mortars after 400°C and 600°C high temperatures. Post-fire air curing for 1, 28 and 90 days did not cause a significant decrease or increase in the flexural and compressive strengths of the samples. Flexural and compressive strength loss occurred immediately after high temperature, and the samples generally preserved their compressive strength with air curing in 28 and 90 days.

Keywords: Alkaline activation, slag, fly ash, polypropylene fiber, high temperature

İÇİNDEKİLER

YÜKSEK SICAKLIK SONRASI KÜR EDİLEN ALKALİ İLE AKTİFLEŞTİRİLMİŞ HARÇLARIN DAYANIM VÖZELLİKLERİ

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK	ii
YÖNERGEYE UYGUNLUK.....	iii
KABUL VE ONAY	iv
TEŞEKKÜR.....	v
ÖZET	vi
ABSTRACT.....	vii
İÇİNDEKİLER	viii
TABLolar LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLER LİSTESİ	xi
GİRİŞ	1

1. BÖLÜM

GENEL BİLGİLER ve LİTERATÜR ÇALIŞMASI

1.1. Genel Bilgiler	5
1.1.1. Yüksek Fırın Cürufu	5
1.1.2. Uçucu Kül	8
1.1.2.1 Uçucu Küllerin Sınıflandırılması.....	9
1.1.3. Polipropilen Lif	9
1.1.4. Alkali Aktivasyon.....	10
1.2. Araştırmanın Amacı	13
1.3. Literatür Özeti.....	13

2. BÖLÜM

MATERYAL VE METOT

2.1. Materyal.....	17
2.1.1.Yüksek Fırın Cürufu	17
2.1.2.Uçucu Kül	18
2.1.3.Kum	18
2.1.4. Aktivatör ve Su.....	19
2.1.5. Polipropilen Lif	19
2.2. Ön Deneme Çalışmaları.....	20

2.3. Deneylerin Tasarımı	21
2.4 Harç Üretimi ve Kürü.....	22
2.5. Deney Yöntemleri.....	24
2.5.1.Yayılma Tablası Deneyi.....	24
2.5.2. Birim Ağırlık ve Özgül Ağırlık Deneyi	25
2.5.3. Su Emme Boşluk Oranı Deneyi	26
2.5.4. Eğilme Dayanımı Deneyi	27
2.5.5. Basınç Dayanımı Deneyi.....	28
2.5.6. Yüksek Sıcaklığa Dayanıklılık Deneyi	29
2.5.7. SEM İncelemeleri.....	29

3. BÖLÜM

BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Ön Deneme Çalışmaları Deney Sonuçları	31
3.1.1. Ön Deneme Çalışmaları Eğilme Dayanımı Değerleri.....	31
3.1.2. Ön Deneme Çalışmaları Basınç Dayanımı Değerleri.....	32
3.2. Yayılma Tablası Deney Sonuçları	34
3.3. Birim Ağırlık ve Özgül Ağırlık Deney Sonuçları	35
3.4. Su Emme ve Boşluk Oranı Sonuçları.....	36
3.5. Eğilme Dayanımı Deney Sonuçları.....	38
3.6. Basınç Dayanımı Deney Sonuçları.....	43
3.7.Yüksek Sıcaklık Sonrası Eğilme Dayanımı Deney Sonuçları	47
3.8.Yüksek Sıcaklık Sonrası Basınç Dayanımı Deney Sonuçları.....	55
3.9. Mikroyapı İncelemeleri	64

4. BÖLÜM

TARTIŞMA-SONUÇ ve ÖNERİLER

4.1.Sonuçlar	71
4.2.Öneriler	74
KAYNAKÇA	75
ÖZGEÇMİŞ.....	82

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 1.	Yüksek fırın cürufu kimyasal kompozisyonu (%)	17
Tablo 2.	Sugözü uçucu külü kimyasal özellikleri, %	18
Tablo 3.	Dere kumuna ait elek analizi	18
Tablo 4.	Sodyum metasilikatın kimyasal analizi	19
Tablo 5.	Polipropilen life ait özellikler	19
Tablo 6.	Birinci ön deneme çalışması numune oranları	21
Tablo 7.	Üretilen numunelerin içerik oranları	21
Tablo 8.	Numunelerin birim ağırlık ve özgül ağırlık değerleri	36

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.	Pik demir ve yüksek fırın cürufunun üretim süreci.....	5
Şekil 2.	Puzolanların kimyasal içerikleri.....	6
Şekil 3.	Alkali aktif cüruftan yapılmış konut binaları, Ukrayna	11
Şekil 4.	Brisbane West Wellcamp Havalimanı	12
Şekil 5.	Polipropilen lifin görünümü	20
Şekil 6.	4x4x16 cm boyutlarındaki numune kalıpları	23
Şekil 7.	Kalıplara yerleştirilmiş numuneler	24
Şekil 8.	Yayılma tablası deney düzeneği.....	25
Şekil 9.	Arşimet terazisi	26
Şekil 10.	Eğilme-basma test cihazı	28
Şekil 11.	Yüksek sıcaklık deney cihazı	29
Şekil 12.	SEM cihazı	30
Şekil 13.	Birinci ön deneme çalışması 75°C'de ısıtılarak kuru edilen numunelerin eğilme dayanım değerleri.....	31
Şekil 14.	Birinci ön deneme çalışması 90°C'de ısıtılarak kuru edilen numunelerin eğilme dayanım değerleri.....	32
Şekil 15.	Birinci ön deneme çalışması 75°C'de ısıtılarak kuru edilen numunelerin basınç dayanım değerleri	33
Şekil 16.	Birinci ön deneme çalışması 90°C'de ısıtılarak kuru edilen numunelerin basınç dayanım değerleri	34
Şekil 17.	Yüksek sıcaklık öncesi numunelerin yayılma çapı değerleri	35
Şekil 18.	Polipropilen lif takviyesiz alkali ile aktive edilmiş harçların boşluk-su emme oranları	37
Şekil 19.	%0,5 oranında polipropilen lif takviyeli harçların boşluk-su emme oranları.....	38
Şekil 20.	Yüksek sıcaklık öncesi polipropilen lif takviyesiz harçların eğilme dayanımları.....	39
Şekil 21.	Yüksek sıcaklık öncesi %0,5 oranında polipropilen lif takviyeli harçların eğilme dayanımları	40
Şekil 22.	Yüksek sıcaklık öncesi %1 oranında polipropilen lif takviyeli harçların eğilme dayanımları.....	41

Şekil 23.	Yüksek sıcaklık öncesi %1,5 oranında polipropilen lif takviyeli harçların eğilme dayanımları	42
Şekil 24.	Yüksek sıcaklık öncesi polipropilen lif takviyesiz harçların basınç dayanımları.....	43
Şekil 25.	Yüksek sıcaklık öncesi %0,5 oranında polipropilen lif takviyeli harçların basınç dayanımları	44
Şekil 26.	Yüksek sıcaklık öncesi %1 oranında polipropilen lif takviyeli harçların basınç dayanımları	45
Şekil 27.	Yüksek sıcaklık öncesi %1,5 oranında polipropilen lif takviyeli harçların basınç dayanımları	46
Şekil 28.	400°C yüksek sıcaklık sonrası polipropilen lif takviyesiz harçların eğilme dayanımları	48
Şekil 29.	400°C yüksek sıcaklık sonrası %0,5 oranında polipropilen lif takviyeli harçların eğilme dayanımları.....	49
Şekil 30.	600°C yüksek sıcaklık sonrası polipropilen lif takviyesiz harçların eğilme dayanımları	50
Şekil 31.	600°C yüksek sıcaklık sonrası %0,5 oranında polipropilen lif takviyeli harçların eğilme dayanımları	51
Şekil 32.	800°C yüksek sıcaklık sonrası polipropilen lif takviyesiz harçların eğilme dayanımları	52
Şekil 33.	800°C yüksek sıcaklık sonrası %0,5 oranında polipropilen lif takviyeli harçların eğilme dayanımları	53
Şekil 34.	400°C yüksek sıcaklık sonrası polipropilen lif takviyesiz numuneler...	54
Şekil 35.	600°C yüksek sıcaklık sonrası polipropilen lif takviyesiz numuneler...	54
Şekil 36.	800°C yüksek sıcaklık sonrası polipropilen lif takviyesiz numuneler...	55
Şekil 37.	400°C yüksek sıcaklık sonrası polipropilen lif takviyesiz harçların basınç dayanımları.....	56
Şekil 38.	400°C yüksek sıcaklık sonrası %0,5 oranında polipropilen lif takviyeli harçların basınç dayanımları	57
Şekil 39.	600°C yüksek sıcaklık sonrası polipropilen lif takviyesiz harçların basınç dayanımları.....	58
Şekil 40.	600°C yüksek sıcaklık sonrası %0,5 oranında polipropilen lif takviyeli harçların basınç dayanımları	59

Şekil 41.	800°C yüksek sıcaklık sonrası polipropilen lif takviyesiz harçların basınç dayanımları.....	60
Şekil 42.	800°C yüksek sıcaklık sonrası %0,5 oranında polipropilen lif takviyeli harçların basınç dayanımları	61
Şekil 43.	400°C yüksek sıcaklık sonrası %0,5 polipropilen lif takviyeli numuneler.....	62
Şekil 44.	600°C yüksek sıcaklık sonrası %0,5 polipropilen lif takviyeli numuneler.....	62
Şekil 45.	800°C yüksek sıcaklık sonrası %0,5 polipropilen lif takviyeli numuneler.....	63
Şekil 46.	S100 grubu lifsiz harçların yüksek sıcaklık öncesi ve sonrası SEM görüntüleri	65
Şekil 47.	S100 grubu %0,5 polipropilen lif içeren harçların yüksek sıcaklık öncesi ve sonrası SEM görüntüleri	66
Şekil 48.	S50 grubu lifsiz harçların yüksek sıcaklık öncesi ve sonrası SEM görüntüleri.....	67
Şekil 49.	S50 grubu %0,5 polipropilen lif içeren harçların yüksek sıcaklık öncesi ve sonrası SEM görüntüleri	68
Şekil 50.	S0 grubu lifsiz harçların yüksek sıcaklık öncesi ve sonrası SEM görüntüleri	69
Şekil 51.	S0 grubu %0,5 polipropilen lif içeren harçların yüksek sıcaklık öncesi ve sonrası SEM görüntüleri	70

GİRİŞ

Nüfus yoğunluğunun hızlı bir şekilde artması ve toprakların kullanımının kısıtlı olması bakımından yer altı yapılarına veya yüksek binalara duyulan gereksinim gün geçtikçe artmaktadır. Bu tür yapılar yapımı ve servis ömrü süresince yangın hasarları ile karşı karşıya kalmaktadır. Dünya üzerinde artan yangınlar, son yıllarda yapıları ve insan yaşamını tehdit etmektedir [1]. İnşaat sektöründe kullanılan beton, genel olarak yangına dayanıklı bir malzeme olarak bilinmesine rağmen, servis ömrü boyunca yüksek sıcaklıklara maruz kalan betonların kimyasal yapısında ve fiziksel özelliklerinde büyük değişiklikler meydana gelmektedir [2,3]. Genellikle beton 300°C'nin altındaki sıcaklık etkisine maruz kaldığında dayanımında bir azalma olmaz hatta bu durumun yanı sıra bünyedeki suyun buharlaşmasından kaynaklı az da olsa dayanım artışı olabileceği görülmektedir [3]. Ancak 300°C'den sonra betonun yapısı hızla bozulmaktadır [4]. Betonun maruz kaldığı sıcaklık 400°C'nin üzerine çıktığında dayanım ciddi ölçüde azalmaya başlar [5]. Bu azalma kalsiyum-silikat-hidrat jelinin 900°C'de tamamen yok olmasına kadar devam eder [6].

Günümüzde, beton ile kıyaslandığında daha çevreci, sürdürülebilir ve atmosfere salınan karbondioksit miktarını da azaltan, yüksek sıcaklıklarda mekanik performansı koruyabilen, yapı malzemeleri geliştirilmektedir. Bağlayıcı bileşen olarak Portland çimentosu kullanmak yerine, cam tozu, uçucu kül, yüksek fırın cürufü veya metakaolin gibi ürünlerle alkali aktivasyon yöntemi ile kompozit malzemeler üretilmektedir.. Alkali aktivasyon teknolojisi, Portland çimentosuna benzer mühendislik özellikleri ve bazı durumlarda daha iyi termal özellikler göstermesi nedeniyle diğer çalışma alanlarında olduğu gibi inşaat sektöründe de yaygın kullanımı için uygundur [7].

Alkali ile aktive edilmiş malzemeler alanında çalışmalar ilk olarak HansKühl'ün granüle yüksek fırın cürufu ile ilgili 1907 yılında patent alması ve Glukhovsky'nin 1965 yılında bağlayıcı olarak inşaat işlerinde kullanması ile ortaya çıktığı belirtilmektedir [8]

[9]. Alkali ile aktive edilmiş malzemeler düşük karbon ayak izine sahip çimentoya alternatif olarak geliştirilmiştir. Chindaprasirt ve ark. (2018) uçucu küllü alkali ile aktive edilmiş malzemelerin çevresel ve ekonomik olması sebebiyle alternatif mühendislik özelliklerine sahip olduklarını belirtmişlerdir [10]. Sistemin kalsiyum içeriğine bağlı olarak, alkali ile aktive edilmiş malzemeler düşük kalsiyum, orta kalsiyum ve yüksek kalsiyum olmak üzere üç türe ayrılır. Uçucu küllü sistem için, düşük kalsiyumlu uçucu küllerin alkali ile aktive edilmiş malzemelerde kullanım için uygun bir kaynak malzemedir. Ayrıca yüksek kalsiyumlu uçucu külün alkali aktif bağlayıcılar yapmak için uygun bir hammadde olduğu çeşitli çalışmalarda gösterilmiştir [11,12,13].

Alkali ile aktive edilmiş malzemelerin yüksek sıcaklık koşullarındaki performansları hakkında yapılan çalışmalarda açık gözenek yapısı sebebi ile portland çimentosundan daha iyi performans gösterdiğine, 600°C-800°C ve daha yüksek sıcaklıklarda bile çoğu durumda soğumadan sonra basınç mukavemetlerinin arttığı sonucuna varılmıştır [7,14]. Portland çimentolu betonlar, ısıtılma işlemi tabi tutulduğunda zayıf performans sergiler ve sıcaklık 300°C üzerine çıktığında zarar görmeye başlar. Alkali ile aktive edilen bağlayıcılar, yaklaşık 1000°C'lik yüksek sıcaklıklara kadar daha iyi davranış gösterir [15]. Yüksek sıcaklık sonrası kür rejimi ile zarar gören harçlar önemli iyileşme gösterebilmektedir. Çatlakların kapanması, boşlukların veya gözenek boyutunun azalması ile basınç dayanımı artmaktadır [16]. Yangından zarar görmüş betonun malzeme özelliklerinin geri kazanımı, çoğunlukla betondaki bileşenlerin yeniden hidratasyonu nedeniyle yüksek nem koşullarında gözlemlenmektedir. Bu hidratasyon ürünleri çoğunlukla agrega-bağlayıcı hamuru arasında yangına bağlı olarak oluşan ara yüzey boşluklarını doldurur [17].

TS EN 1363-2, ISO 834 ve AS 1530 gibi standartların tamamı malzemelerin yangın testleri için sabit bir deney yöntemi sağlar. Ancak gerçek bir yangın, yapı malzemesinin yanıcılığı, yeri, nemi ve hava akışı gibi farklı durumlarda yangın sonrası farklı davranış gösterir [18].

Alkali ile aktive edilmiş malzemelerin lifler ile birlikte kullanımı, tipik bağlayıcı sistemlerden daha üstün özellik sergilemektedir. Liflerin farklı mekanik özellikleri ve kullanım alanları açısından çok fazla çeşidi vardır. Ancak genel olarak sentetik ve doğal

olmak üzere iki gruba ayrılırlar. Günümüzde plastik malzemelerden tekstil sektörüne kadar geniş kullanım alanına sahip termoplastik polimerler olan polipropilen (PP) lifler sentetik lifler grubunda yer almaktadır. Polipropilen lif (PP) teknik açıdan saf propilen gazının katalizör kullanılmasıyla basınç altına tutularak polimerize olup ortaya çıkmaktadır. Plastik ve tekstil sanayilerde geniş çaplı bir polimer olarak kullanılmaktadır [19]. Literatürde, polipropilen lifin dahil edilmesinin, alkali ile aktifleştirilmiş malzemelerin mekanik özelliklerini geliştirdiğini göstermiştir. Sukontasukkul ve ark. [20] polipropilen lifin %0,5 oranında ilavesinin kontrol gruplarına göre geopolimer harçların mekanik özelliğini iyileştirdiğini ifade etmişlerdir. Chindaprasirt ve ark [10], yüksek kalsiyumlu alkali ile aktive edilmiş uçucu kül hamurunda ağırlıkça %0,5 oranında polipropilen lifin basınç dayanımını olumlu etkilediğini ifade ederken, eğilme dayanımı için uygun lif oranının %1 olduğunu ortaya koymuşlardır. Ayrıca farklı araştırmacılar da uygun polipropilen lif oranının %0,5-%1,0 olduğunda optimum dayanım özelliklerine ulaşıldığını belirtmişlerdir [21,22]. Eidan ve ark. [23] 12 mm uzunluğundaki polipropilen lifin 600°C yüksek sıcaklığa maruz kalan harçlarda 6 mm uzunluğundaki liflere göre daha iyi performans gösterdiğini belirlemişlerdir.

Yangın kaynaklı beton hasarları termo-nem , termo-mekanik ve termo-kimyasal hasarlar olmak üzere üç tipe ayrılır. Her üç tip bozulmada, yangın altındaki beton elemanlarda, çoğunlukla yangının farklı aşamalarında meydana gelebilir [24]. Termo-nem hasarı, nem bloke edildiğinde meydana gelir ve betonda 220°C-320°C civarında bir sıcaklıkta boşluk basıncı oluşur. Termo-mekanik hasarı, dış yüklerden ve termal etkiden kaynaklanır ve 430°C-660°C civarındaki sıcaklıklarda termal gerilmelere neden olur. Son olarak, termo-kimyasal etki, kalsiyum oksidin 700°C'den yüksek sıcaklıklarda ayrışmasından kaynaklanmaktadır. Önceki araştırmalar, polipropilenin dahil edilmesinin betonun hasarını hafiflettiğini göstermiştir. Bangi ve Horiguchi [25] tarafından lif tipi ve geometrisinin yüksek dayanımlı betonun gözenek basıncı üzerindeki etkileri üzerine yapılan çalışmada, 12 mm polipropilen lif içeren betonun hasara karşı 6 mm lif içeren betondan daha iyi bir direnç gösterdiğini belirtmişlerdir. Ju ve ark. [26], 150°C'nin altındaki sıcaklıklarda, polipropilen lifli betonun ağırlık kaybının küçük olduğunu ve 150 ile 350°C arasındaki sıcaklıklarda önemli ölçüde arttığını bulmuşlardır. Ancak alkali ile aktive edilmiş harçlarda farklı sıcaklıklarda aktivatör

farklılığı, aktivatör oranı ve aktive edilen atık özellikleri gibi nedenlerle farklı dayanım değişimleri araştırmacılar tarafından rapor edilmiştir.

Bu çalışmada, alkali ile aktive edilmiş polipropilen lif içeren harçların yüksek sıcaklık sonrası hava kürü koşullarının dayanım özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Yüksek fırın cürufu, uçucu kül ve polipropilen lif içeren harçlar, sodyum metasilikat (Na_2SiO_3) ile aktive edilmiştir. Üretilen harçlar 24 saat 75°C sıcaklıkta ısıl küre tabi tutulmuştur. Üretilen numuneler ile eğilme ve basınç dayanımı deneyleri yapılmıştır. Eğilme ve basınç dayanımı deneyleri sonrasında karışım oranı ve içerikleri belirlenen numuneler 400°C - 600°C ve 800°C yüksek sıcaklığa maruz bırakılmış ve sıcaklık sonrası havada yeniden kür edilmiştir.

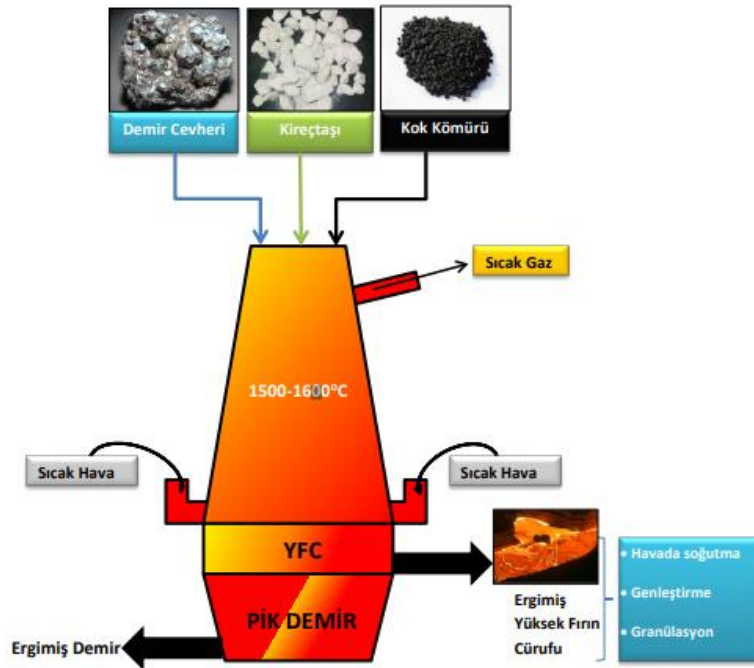
1. BÖLÜM

GENEL BİLGİLER VE LİTERATÜR ÇALIŞMASI

1.1. Genel Bilgiler

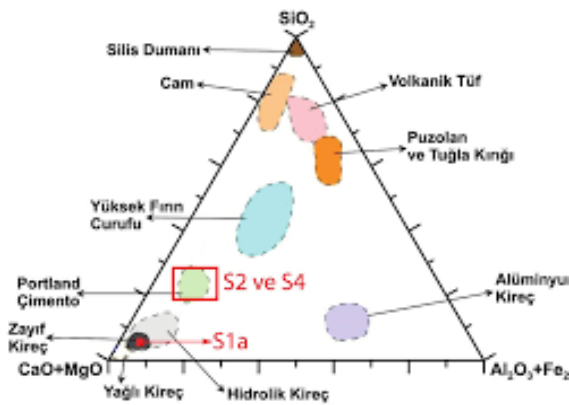
1.1.1. Yüksek Fırın Cürufu

1862 yılında Emil Langen tarafından yapılan araştırmalar sonucunda yüksek fırın cürufunun bağlayıcılık özelliği keşfedilmiştir. Yüksek fırın cürufu çimento 1888 yılında Almanya'da 1896 yılında Amerika'da üretilmeye başlanmıştır. Cüruf bu tarihsel gelişiminden sonra 1950'li yıllarda Amerika, İngiltere, Güney Afrika gibi birçok ülkede beton üretimi için çimento içerisine katılmaya başlanmıştır. Pik demirin ve yüksek fırın cürufunun üretim süreci Şekil 1' de açıklanmıştır [27].



Şekil 1. Pik demir ve yüksek fırın cürufunun üretim süreci [28]

Yüksek fırın cürufu demir üretimi esnasında demir-çelik tesislerinin yüksek sıcaklık fırınlarında açığa çıkan atık ürünüdür. Yaklaşık olarak 1400-1600°C'ye kadar ısıtılan yüksek sıcaklık fırınlarında ham madde olarak demir oksit, yakıt olarak ise kok kömürü kullanılmaktadır. Yakım işleminden sonra fırının alt kısmında erimiş demirin üstünde ise sıvı halde yüksek fırın cürufu bulunmaktadır. Farklı yöntemlerde soğutulan yüksek fırın cürufu, soğuma yöntemlerine göre farklı görünüm ve özelliklerde olmaktadır. Havada soğutma yöntemiyle üretilen cüruf iri kristalli bir yapıdadır. Kırıldıktan sonra yol ve beton agregası olarak kullanılabilir. Soğuma işleminin genişletme yöntemiyle yavaş olarak yapılması halinde gözenekli yapıya sahip olan ve özgül ağırlığı 1100-2200 kg/m³ arasında değişen genişletilmiş yüksek fırın cürufu elde edilir. Bu ürün özgül ağırlığının düşük olması sebebiyle agregalar yerine hafif beton üretiminde kullanılabilir. Granülasyon yöntemiyle hızlı bir soğuma işlemi uygulanan yüksek fırın cürufları ise camsı yapıdadırlar ve bunlar granüle yüksek fırın cürufu olarak adlandırılırlar. Bu cürufların değirmenlerde öğütülmesiyle "öğütülmüş yüksek fırın cürufu" elde edilir [28,29,30]. Sulu ortamda kalsiyum hidroksitle birleştirildiklerinde bağlayıcılık özelliği kazanan fakat kendi başlarına bağlayıcılık özelliği göstermeyen veya çok az gösteren silisli veya silisli-alüminli malzemelere puzolan denilmektedir. Puzolanlar doğal ve yapay olmak üzere iki farklı gruba ayrılabilir. Doğal puzolanlar; diatomlu toprak, traslar ve volkanik küller gibi malzemeler iken, yapay puzolanlar endüstriyel yan ürün olarak elde edilen granüle yüksek fırın cürufu, silis dumanı, uçucu kül gibi malzemelerdir. Puzolanlar betonun özelliklerini iyileştirerek daha yüksek dayanımlara ulaşmasını sağlayabilmektedir [27]. Şekil 2'de puzolanların kimyasal içerikleri piramit şeklinde gösterilmiştir.



Şekil 2. Puzolanların kimyasal içerikleri [28]

Yapılan çalışmalar sonucunda yüksek fırın cürufunun bağlayıcılık özelliği olduğu 1862 yılından itibaren bilinse de şemada gösterildiği gibi yüksek fırın cürufunun, yüksek miktarda bünyesinde barındırdığı SiO_2 ve Al_2O_3 puzolanik özellik göstermesine sebep olmaktadır. Tek başına bağlayıcılık özelliği bulunmayan veya çok az bulunan minerallere; hazır betonun içine mineral katkı olarak ikame edilerek, çimento ile birlikte kullanılarak yada bir kimyasal ile aktive edilerek bağlayıcılık özelliği kazandırılır [28].

Çimentonun hidratasyon reaksiyonu sonucunda oluşan temel ürünlerden kalsiyum-silika-hidrat (C-S-H) jeli çimentonun bağlayıcılık özelliği ve dayanım kazanmasını sağlar. Reaksiyon sonucunda oluşan diğer ürünler ise kalsiyum hidroksit (Ca(OH)_2) ve diğer hidratlardır. Bu reaksiyonun ardından yüksek fırın cürufunun kalsiyum hidroksit ile hidratasyonu sonucunda ise bağlayıcılık özelliği yüksek olan C-S-H jeli oluşmaktadır. Ca(OH)_2 'in dayanıma olumlu etkisi olmamasının yanı sıra agrega ile çimento hamuru arasındaki aderansı zayıflatır. C-S-H jeli ise betonda dayanımı sağlamaktadır. Yüksek fırın cürufu içeren betonların hidratasyonu sonucunda Ca(OH)_2 'in miktarı azalırken C-S-H jelinin oluşumu artar [28].

Yüksek fırın cürufunun çimentoyla karşılaştırıldığında farklılık gösteren birkaç özelliğinden bahsetmek gerekirse bunlardan ilk olarak göze çarpan, cürufun renginin çimentoya oranla daha açık renkte olmasıdır. TS EN 197-1'e göre 5 ana tipte çimento sınıfı vardır. Bunlardan klinker oranı %5-%64 arasında değişen CEM III-Yüksek Fırın Cürufu Çimentosunda yüksek oranda bulunan cüruf, uçucu kül, silis dumanı vb. diğer mineral katkılara göre çimentoya en yakın hidrolik bağlayıcılık özelliğe sahiptir [28].

Yüksek fırın cürufunun beton ve çimentoda gerek puzolan olarak gerekse agrega amaçlı kullanıldığı birçok çalışma vardır. Yüksek fırın cürufunun kimyasal içeriğinde kil ve silt bulunmamasının yanı sıra yüzeyinin pürüzlü olması yüksek fırın cürufunu diğer puzolanlardan ayırarak aderansının yüksek olmasını sağlamaktadır. Ayrıca yüksek donma-çözünme ve soyulma direnci ile düşük su emme yüzdesi yüksek fırın cürufunun avantajları arasındadır [27].

Yüksek fırın cürufu çimentoda C_3S oluşumu Portland çimentosu ile karşılaştırıldığında daha azdır. Bu durum yüksek fırın cürufu çimento ile üretilen numunelerde erken yaş dayanımının daha düşük çıkmasına sebep olmaktadır, C_2S oluşumuna bağlı olarak 90-

150 günlük dayanımlar karşılaştırıldığında yüksek fırın cürufu Portland çimentosuna oranla daha yüksek dayanım değerlerine sahip olduğu görülmektedir [31].

Yüksek fırın cürufu su ile bir araya geldiğinde çok az da olsa bağlayıcılık özelliği gösteren bir malzemedir. Ancak bununla birlikte çimento ile karşılaştırıldığında hidratasyon hızı ise oldukça düşüktür. Yüksek fırın cürufunun Portland çimentosu veya alkalilerle birlikte kullanılması hidratasyon hızını artırmaktadır [32].

Yüksek fırın cürufunun kimyasal aktivasyonunda kullanılan aktivatörler alkaliler ve sülfatlar olmak üzere iki ana gruba ayrılabilir. Bu aktivatörler cürufun pH değerini yükselterek camsı yapısının bozulmasına ve bağlayıcı jellerin oluşmasına sebep olmaktadır [33].

1.1.2. Uçucu Kül

Yirminci yüzyıl itibariyle artan sanayileşme ve endüstriyel gelişim sonucunda medeniyetler büyük gelişim sağlarken, insan hayatı da büyük ölçüde kolaylaşmıştır. Ancak bunun yanında endüstriyel atıklar çevreye ciddi zarar vermektedir. Dünyada her yıl ortalama 600 milyon ton uçucu kül açığa çıkmaktadır [34]. Açığa çıkan bu atıklar uygun şekilde depolanmaz ve atıkların geri dönüşümü sağlanmazsa çevre kirliliği ve insan sağlığı açısından birçok olumsuz sonuç doğurmaktadır. Endüstriyel bir atık olan uçucu kül, betonun özelliklerini iyileştirmek ve çevre kirliliğinin önüne geçmek için inşaat sektöründe kullanılmaya başlanmıştır [35].

Uçucu kül, termik santralde çok ince halde öğütülen linyit yada taş kömürün yakılması sonucunda oluşur. Baca gazları tarafından taşınıp havaya karışması engellenerek mekanik ve elektro statik yöntemler kullanılarak uygun koşul ve yerde depolanır [34].

Termik santrallerde ince öğütülmüş kömürün yakılması sonucunda üç farklı kül çeşidi elde edilebilmektedir.

- İri taneli olan, baca gazları ile taşınamayan ve kazan zeminine düşen “taban külü”
- Siklon tipi ocaklarda yakılan kömürün suda soğutulup uzaklaştırılması sonucu ile elde edilen “ham kül” ve

- Çok ince taneli olup baca gazları ile taşınan “uçucu kül” dır [34].

Puzolanlar doğal ve yapay olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. Uçucu küller ise yapay puzolan sınıfında yer almaktadırlar. Ana bileşenleri silis ve alümin olan puzolanlar ortamda nem bulunması durumunda hidrate olmuş kireçle kimyasal reaksiyona girerek bağlayıcılık özelliği kazanırlar. Çimento ve puzolanın reaksiyonu sonucunda zamanla bağlayıcı hamurdaki serbest kireç miktarı azalmaktadır. Belli bir süre sonunda puzolan içeren beton hamurlarında Portland çimento hamurlarına göre daha az miktarda serbest kireç ve daha fazla kalsiyum silika hidrat (C-S-H) bulunmaktadır. Bu sayede puzolanlı betonlarda daha çok bulunan C-S-H jeli dayanımda artış ve boşluk yapısında azalmaya neden olmaktadır [36].

1.1.2.1 Uçucu Küllerin Sınıflandırılması

ASTM C618 standardına göre F ve C olmak üzere iki sınıfa ayrılan uçucu küllerden, F sınıfı uçucu küller bitümlü kömürden üretilirler. Toplam $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ yüzdesi %70’den fazla ve CaO oranı %10’un altında uçucu küllerdir. Düşük kireçli uçucu kül olarak da adlandırılırlar. C sınıfı uçucu küller linyit veya yarı bitümlü kömürden üretilirler. Toplam $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ yüzdesi %50’den fazla ve CaO oranı %10’un üstünde olan uçucu küllerdir. Yüksek kireçli uçucu kül olarak da adlandırılırlar. TS EN 197-1’e göre ise uçucu küller silissi (V) ve kalkersi (W) olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. V sınıfı (silissi) uçucu küller, küresel taneciklerden meydana gelen, ince toz halde çoğunluğu puzolanik özellikte olup, SiO_2 ve Al_2O_3 ’den oluşan, geri kalanı Fe_2O_3 ve diğer bileşenleri içeren küllerdir. Bu uçucu kül sınıfında CaO oranının %10’dan az, SiO_2 miktarının %25’den fazla olması gerekmektedir. W sınıfı uçucu küller hidrolik ve/veya puzolanik özelliktedirler. İnce toz halinde bulunurlar. CaO, SiO_2 ve Al_2O_3 ’a bileşenlerini oluştururken, geri kalanı Fe_2O_3 ve diğer bileşenleri içeren küllerdir. Bu küllerde, CaO oranının %10’dan SiO_2 oranının ise %25’den fazla olması gerekmektedir [34,37,38].

1.1.3. Polipropilen Lif

Günümüzde yol yapımından havaalanı inşaatına kadar birçok alanda betonun dayanımını artırmak ve mekanik özelliklerini iyileştirmek için çelik, polipropilen, cam vb. lifler kullanılmaktadır. Lifler doğal ve yapay olmak üzere iki gruba ayrılırlar. Doğal

lifler su buharını ve sıcaklığı kolayca emerken sıcaklık karşısında yumuşamazlar ve boylarında değişiklik görülmez. Doğal liflere bambu lifleri, keten lifler ve metal lifler örnek olarak gösterilebilir. Betona ilave edilen en yaygın metal lif çelik liflerdir. Yapay lifler ise kuru çekme, yaş çekme gibi işlemlerden geçirilerek üretilmektedir. Cam lifler, polimer lifler yapay liflere örnek olarak gösterilebilir. Polipropilen lifler polimer lifler grubuna girmektedir. Polipropilen lifler tekstil ve otomotiv sanayi, tıp ve inşaat sektörü gibi birçok alanda kullanılmaktadır Polipropilen lifler inşaat sektöründe betonun eğilme ve basınç dayanımını artırmak, gevrek kırılmayı önlemek ve sünekliliği artırmak amacıyla kullanılmaktadır [19]. Lif ilavesinde dikkat edilmesi gereken en önemli husus liflerin harcın içine homojen bir şekilde karışmasını sağlamaktır. Harç içine homojen şekilde dağılan lifler, betonun içinde çatlak oluşmasını ve oluşan çatlakların ilerlemesini önleyerek üretilen betonun daha dayanıklı olmasını sağlamaktadır. Bunun yanı sıra betonun eğilme ve çekme dayanımına da olumlu katkısı olduğu bilinmektedir [39].

Polipropilen lif takviyesi taze harçların işlenebilirlik özelliklerini olumsuz yönde etkilerken sertleşmiş harçlar üzerinde yapılan deneyler sonuçlarında geçirgenliği, emicilik katsayısını ve su penetrasyonunu azaltırken eğilme ve basınç dayanımını artırdığı gözlenmiştir [40].

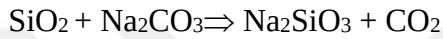
1.1.4. Alkali Aktivasyon

Alkali aktivasyon ile ilgili çalışmalar 1900'lü yılların başlarında başlasa da 1939 yılında Feret ve 1940 yılında Purdon'un cüruf üzerinde yaptıkları çalışmalarla tarihte alkali aktivasyon süreci önemli ilerlemeler kaydetmiştir. Davidovits'de alkali aktivasyon üzerine yaptığı çalışmalarla literatüre önemli katkılarda bulunmuştur. 1979 yılında kireç taşı ve sinterleşmiş kaolinitin ürünleri ile dolomit benzeri alüminosilikatları kullanarak yeni bir bağlayıcı geliştirmiştir. Alkali aktivasyonun sınıflandırılmasında ilerleyen yıllarda hammadde içeriği dikkate alınmıştır [41].

Klasik Portland çimentosu ve alkali ile aktive edilmiş bağlayıcı arasındaki en belirgin fark, Portland çimentosunun priz alması için sadece su ile karıştırılması yeterli olurken; aktivasyon reaksiyonunda ise, suya ilaveten bir alkali bileşenin karışıma eklenmesi gerekmektedir. Bu nedenle, karışım yapımında kullanılan alkali çözeltilerin özelliklerinin bilinmesi ve karışım içeriğinin belirlenmesi önemlidir [42]

Alkali ile aktive edilmiş malzemeler üretiminde yaygın olarak kullanılan aktivatörler sodyum hidroksit, sodyum metasilikat, sodyum silikat, sodyum karbonat, potasyum hidroksit, sodyum sülfattır. Sodyum sülfat ve sodyum karbonat doğal kaynaklardan elde edilirken, sodyum hidroksit ve sodyum silikat üretim yoluyla elde edilir. Sodyum silikatların içeriğindeki su oranı arttıkça yoğunlukları azalmaktadır [41]. Sodyum metasilikatın üretimi sodyum hidroksit ve sodyum silikat ile ya da diğer bir yöntem olan silika kumu ile sodyum karbonatın 1400°C sıcaklıkta birleştirilmesi ile gerçekleştirilir.

Bu üretimin kimyasal reaksiyonu aşağıdaki gibidir.



Sodyum metasilikat kokusuz ve beyaz olan inorganik formda silisik asit bir tuzdur. Erime noktası yaklaşık olarak 1090°C, donma noktası 0°C'den daha düşüktür. Yoğunluğu ise 2,61 g/ml'dir. Suyu ve neme karşı duyarlı olup güçlü bir alkali özelliğe sahiptir. Deterjan, yapıştırıcı ve antifriz imalatından seramik endüstrisine kadar pek çok alanda kullanılmaktadır [43].

Ukrayna Mariupol'da 1960 yıllarında yapılan ve Şekil 3'te gösterilen konutların inşasında demir-çelik cürufunun alkali ile aktivasyonu sonucu elde edilen bağlayıcı kullanılmıştır. Tasarım dayanımı olarak 7,5 MPa kullanılsada 2012 yılında konuttan alınan örnekler basınç dayanımı deneyine tabi tutulmuştur ve deney sonucunda 14 MPa basınç dayanımı değeri bulunmuştur [44].



Şekil 3. Alkali aktif cürufattan yapılmış konut binaları, Ukrayna [44]

Avustralya'da inşa edilen halka açık Brisbane West Wellcamp Havalimanı'nın yapımı Kasım 2014'te tamamlanmış ve faaliyete geçmiştir.Şekil 4'te gösterilen bu proje, en büyük geopolimer beton projesi olması sebebiyle mühendislikte çok önemli bir yere sahiptir.Brisbane West Wellcamp Havalimanı yaklaşık 40.000 m³ (100.000 ton) çimentosuz geopolimer beton ile inşa edilmiştir.Wagners firması tarafından geliştirilen ve Dünya Dostu Beton (EFC) olarak bilinen geopolimer betonunun sahip olduğu yüksek eğilme çekme dayanımı, düşük büzülme ve işlenebilirlik özellikleri bu yapıya çok uygun olduğunu göstermektedir [45].



Şekil 4.Brisbane West Wellcamp Havalimanı

Alkali ile aktive edilen betonların uygulama alanları;

1. Duvar blok elemanı üretimi
2. Prefabrik yapı inşaatı
3. Gaz beton uygulamaları
4. Yüksek sıcaklığa dayanıklı beton yapımı
5. Yapısal betonlar
6. Döşeme yapımı, temel yapımı
7. Petrol kuyuları
8. Beton büz boru yapımı [41]

1.2. Araştırmanın Amacı

Çalışmanın temel amaçları;

- ❖ Yüksek fırın cürufu ve F sınıfı uçucu külün alkali ile aktive edilmiş harçlara polipropilen lif ilavesi ile birlikte yüksek sıcaklık sonrası hava kürü işleminden sonra dayanım özelliklerinin araştırılması,
- ❖ Endüstriyel ve sanayi atıklarının geri dönüşümü sağlanarak küresel ve çevresel sorunların azaltılması,
- ❖ İnşaat sektöründe güçlü bir alternatif bağlayıcının üretilmesi ve çimento üretiminde açığa çıkan karbon miktarının azaltılarak yakıt tasarrufunun sağlanabilmesi.
- ❖ Yüksek sıcaklık sonrası kür işlemine tabii tutulan yüksek fırın cürufu, uçucu kül ve polipropilen lif içeren alkali ile aktive edilmiş harçların avantaj ve dezavantajlarının belirlenmesi.
- ❖ Alkali ile aktive edilen harçlarda istenilen dayanım ve dayanıklılık değerlerinin elde edilmesinin ardından harçların sektörde kullanımının önünün açılabilmesi amacıyla uygun üretim parametrelerinin belirlenmesini sağlamaktır.

1.3. Literatür Özeti

Son yıllarda artan yapılaşmanın insan hayatını kolaylaştırmasının yanında çevreye olumsuz olarak yansıyan birçok problemi de doğurduğu bilinmektedir. Bunun yanı sıra uygun şekilde depolanmayan geri dönüşümü yapılmayan atıklar insan sağlığını olumsuz etkilemekte ve çevre kirliliğine sebep olmaktadır. Yapılan pek çok çalışmada çimentoya alternatif çevreci bağlayıcılar üretilmesi amaçlanmıştır. Bununla beraber alternatif bağlayıcıların, betonun servis ömrü boyunca en az bir veya daha fazla maruz kaldığı yüksek sıcaklığa karşı davranışının nasıl olduğu da incelenmektedir. Bu doğrultuda yapılan bazı çalışmalar ve çalışmaların sonuçları incelenmiştir.

Chindaprasirt ve ark. (2021) [46] alkali ile aktifleştirilmiş polipropilen lif takviyeli uçucu kül hamurunu incelemişlerdir. Uçucu kül miktarının %0-0,5 – 1,0-1,5 oranlarında polipropilen lif karışıma ikame edilmiştir. 10 molar NaOH, Na₂SiO₃/NaOH oranı 2 ve

su/bağlayıcı oranı 0,60 olarak belirlemişlerdir. Uçucu kül hamuru 200°C, 400°C, 600°C ve 800°C yüksek sıcaklığa maruz bırakıldıktan sonra eğilme ve basınç dayanımı değerlerini ölçmüşlerdir. Hamurun basınç dayanımını iyileştirmede en iyi oranın %0,5 polipropilen lif ilavesinde eğilme dayanımı için ise optimum polipropilen lif oranının %1 olduğunu gözlemlemişlerdir. 400 °C'ye maruz bırakılan hamurun eğilme dayanımlarında %8- %12 arasında kayıp oluşmuştur. Sıcaklık artışı macunun mekanik özelliklerini olumsuz etkilemiştir ve ağırlık kaybını artırmıştır. Özellikle 600-800°C arası yüksek sıcaklık sonrası jel gözenekleri önemli ölçüde azalmış hatta neredeyse yok olmuştur. Bunun yanı sıra büyük kılcal gözenekler ve hava boşluklarında büyük artışlar meydana gelmiştir. Alkali ile aktive edilmiş macunun ağırlık ve basınç dayanım kayıpları termo-nem hasarından kaynaklanmakta ve termo-mekanik hasar ile desteklenmektedir.

Kuranlı ve ark. (2022) [47] cüruf ve uçucu kül esaslı geopolimer betonları polipropilen, çelik ve poliamid olmak üzere 3 farklı lif türü ile güçlendirmişlerdir. Üretilen betonların basınç, çekme, eğilme ve kuruma büzülmesi davranışlarını incelemişlerdir. 300°C, 600°C 900°C yüksek sıcaklığa ve 250 döngü donma-çözülme testlerine tabii tutularak dayanıklılık özelliklerini gözlemlemişlerdir. Ayrıca matris kompozisyonunu anlamak için mikro yapısal analizlerini yapmışlardır. Fiber takviyesinin betonun bazı mukavemet özelliklerini iyileştirdiği ancak bazı özellikler için etkisiz olduğu görülmüştür. Betonların basınç dayanımına olumlu etkisi sadece çelik lif takviyesi ile gerçekleşmiştir. Polipropilen ve çelik liflerin eğilme dayanımını önemli ölçüde iyileştirdiği, tokluk değerini sırasıyla %1469 ve %566 oranında artırırken poliamid elyaf takviyeli geopolimer serisinde bu değer %46 ile oldukça düşük olduğunu deneyler sonucunda gözlemlemişlerdir. Özellikle 900°C sonrası polipropilen ve çelik fiber takviyeli betonlar daha yüksek mukavemet göstermişlerdir. Donma-çözülme testinden sonra çok önemli bir fark gözlemlemişlerdir.

Poon ve ark. (2021) [6] çimentolu harçların içerisine farklı oranlarda uçucu kül, cüruf ve silis dumanı ilave ederek numuneler üretmişlerdir. Ürettikleri numuneleri 600°C ve 800°C yüksek sıcaklık sonrası havada ve suda kür ettikten sonra 7, 28 ve 56 günlük basınç dayanımlarını ölçmüşlerdir. Yaptıkları araştırmalar sonunda yüksek sıcaklık sonrası numunelerin basınç dayanımının büyük oranda düştüğünü ancak havada ve suda

ikinci bir kür işleminden sonra numunelerin basınç dayanımında az da olsa bir artış olduğunu gözlemlemişlerdir.

Marjanovic' ve ark. (2015) [48] alkali ile aktive edilen harçlarda ağırlıkça %0, %25, %50, %75 ve %100 seviyelerinde uçucu kül cüruf ile yer değiştirmişlerdir. Çalışma sonuçlarına göre, uçucu kül/cüruf oranının artması eğilme dayanımı/basınç dayanımı oranlarının uçucu kül içeriği ile arttırdığını belirlemişlerdir.

Pan ve ark. (2018) [49]sodyum hidroksit, sodyum silikat ve sodyum metasilikat karışımı aktivatör kullanarak ürettikleri %100 cüruf ve %100 uçucu kül içeren harçların eğilme dayanımlarını birbirine yakın bulurken %50 cüruf-%50 uçucu kül içeren harçların eğilme dayanımlarının en düşük dayanım olduğunu belirlemişlerdir.

Daha önceki çalışmalarda, alkali ile aktive edilen harçların cüruf [16] ve uçucu kül [17] ile normal kür özellikleri incelenmiştir. Ayrıca sodyum metasilikatin aktivatör olarak kullanılması ile ilgili çalışmalar olsa da [18] sodyum hidroksit ve sodyum silikatin kullanımı kadar yaygın değildir. Bu çalışmada ise alkali ile aktive edilmiş cüruf+uçucu kül harçlarının yüksek sıcaklık sonrası hava kürü ile dayanımında oluşan değişim araştırılmıştır. Bu amaçla farklı oranlarda bir araya gelen cüruf uçucu kül bileşimi harçlara 400°C, 600°C ve 800°C sıcaklığa maruz bırakılarak ortam sıcaklığında 1 ve 28 gün sonraki dayanım değişimleri belirlenmiştir.

Almaz çalışmasında alkali ile aktive edilmiş yüksek fırın cürufu ve uçucu kül içeren harçların dayanım ve dayanıklılık özelliklerini araştırmıştır. Uçucu kül, yüksek fırın cürufu ile %0, %20, %40, %60, %80 ve %100 oranlarında yer değiştirerek, bağlayıcı miktarının %8, %10 ve %12 oranlarında Na⁺ içeren harçlar üretmiştir. Üretilen harçlara 75°C, 90°C ve 105°C'de 24 saat ısıl kür işlemi uygulamıştır. Alkali ile aktive edilmiş numunelere eğilme ve basınç dayanımı, işlenebilirlik, yüksek sıcaklığa dayanıklılık ve kılcal su emme deneyleri yapmıştır. Yapılan çalışma sonucunda numunelerdeki cüruf içeriğinin artması basınç dayanımını artırmış, su emme ve boşluk oranını ise azaltmıştır. Bunun yanı sıra uçucu kül içeriğinin artması ise işlenebilirlik, karbonatlaşma derinliği ve kuruma büzülmesi özelliklerini iyileştirmiştir [27].

Pekdemir (2020) [19] çalışmasında lif takviyesiz kontrol numunesinin yanında %0,25, %0,50, %0,75, %1,0, %1,25, %1,5 hacim oranlarında polipropilen lif takviyeli betonlar

üretmiştir. Ürettiği 1 ve 28 günlük beton numunelerine eğilme ve basınç dayanım deneyleri uygulamıştır. Düşük oranlarda ve kısa uzunlukta polipropilen lif takviyesinin taze beton kıvamına belirgin bir etkisi olmadığını belirlemiştir. Bununla birlikte basınç dayanımında ortaya çıkan düşüşün ve eğilmede çekme dayanımındaki artışın ise sınırlı kaldığı görülmüştür.

Şensever (2021) [32] çalışmasında çimentolu kontrol numuneleri ile birlikte %3 ve %6 konsantrasyonundaki NaOH, KOH aktivatörleri ile aktive edilen lif takviyesiz ve her aktivatör cinsi için hacimce %0,5, %1, %1,5 oranlarında çelik ve polipropilen lif içeren yüksek fırın cürufu harçlar hazırlamıştır. Üretilen harçları 250°C yüksek sıcaklığa maruz bırakarak mekanik özelliklerini incelemiştir. Deneysel çalışma sonucunda lifli harçların, lifsiz harçlara göre daha iyi mekanik performans gösterdikleri ve lif oranı arttıkça işlenebilirliğin azaldığı görülmüştür.

Çimentolu harçlarda yüksek sıcaklık sonrası ilave hava kürü ile ilgili Karahan (2011) [50] çalışmasında 400°C yüksek sıcaklık sonrası hemen kırılan numunelerin basınç dayanımı yaklaşık 54 MPa iken 7 gün ilave hava kürü sonunda 43 MPa'a düştüğünü belirlemiştir. Bu durumun 600°C ve 800°C için de geçerli olduğunu belirterek dayanım kayıpları oluştuğunu belirtmiştir.

Kaya ve ark. (2018) [51] Uçucu küllü geopolimer harçların çimentolu kontrol harçlarına göre daha iyi performans gösterdiğini belirtmişlerdir.

Çelikten ve Canbaz (2020) [52] cüruf içeren lifli alkali ile aktive edilmiş harçların 200°C ve 400°C gibi düşük sıcaklıklarda dayanım artışı belirlemişlerdir.

Başka bir çalışmada Çelikten ve ark. (2019) [53] yüksek fırın cürufu ve uçucu kül bazlı alkali ile aktive edilmiş harçların Portland çimento harçlarına göre 800 °C'ye kadar yüksek sıcaklıklara daha dayanıklı olduğunu vurgulamışlardır.

Yurt (2020) [54] çalışmasında, yüksek fırın cürufunun yüksek dayanımlı çimentosuz beton üretiminde kullanılabilirliğini ortaya koymuştur.

2. BÖLÜM

MATERYAL VE METOT

Yapılan çalışmada yüksek fırın cürufu, uçucu kül, polipropilen lif, granül sodyum metasilikat, dere kumu ve içilebilir çeşme suyu kullanılmıştır. Uygun kür sıcaklığı, polipropilen lif oranı, harç karışımında kullanılacak malzeme miktarları ve çeşitleri yapılan ön deneme çalışmaları sonucunda belirlenmiştir. Üretilen numunelere işlenebilirlik, birim ağırlık ve özgül ağırlık, eğilme ve basınç dayanımı, su emme ve boşluk oranı, yüksek sıcaklık direnci deneyleri yapılmış ve içyapıları incelenmiştir.

2.1. Materyal

2.1.1. Yüksek Fırın Cürufu

Deneyisel çalışmalarda, Hatay ili İskenderun ilçesindeki İSDEMİR Demir Çelik Fabrikasının atığı olan granül haldeki yüksek fırın cürufunun, Adana Çimento Sanayi T.A.Ş' de öğütülmesiyle elde edilmiş toz hali kullanılmıştır. Numune isimlendirilmesinde S olarak kısaltılmıştır ve içeriğindeki yüksek fırın cürufu oranına göre harçlar numaralandırılmıştır. Yüksek fırın cürufu 45 μ m'dan daha ince olup, özgül ağırlığı 2,90 g/cm³'tür [27].

Tablo 1. Yüksek fırın cürufu kimyasal kompozisyonu (%)

Kimyasal Özellikler	Yüksek Fırın Cürufu
SiO ₂	37,11
CaO	36,76
Al ₂ O ₃	10,48
MgO	7,11
BaO	0,22
TiO ₂	0,63
Fe ₂ O ₃	1,43
K ₂ O	0,79
SO ₃	1,05
Diğer	4,42
Kızdırma Kaybı	2,35

2.1.2.Uçucu Kül

Deneysel çalışmalarda, Adana ili Yumurtalık ilçesi Sugözü köyünde bulunan Sugözü Termik Santrali'nde ithal kömür yakıldıktan sonra elde edilen F sınıfı uçucu külü kullanılmıştır. Uçucu külün özgül ağırlığı $2,29 \text{ g/cm}^3$ 'tür. Uçucu küle ait özellikler Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Sugözü uçucu külü kimyasal özellikleri, %

Kimyasal Özellikler	Sugözü Uçucu Külü
SiO ₂	59,92
Al ₂ O ₃	20,88
Fe ₂ O ₃	8,74
K ₂ O	2,12
Na ₂ O	1,02
MgO	1,89
CaO	1,62
SO ₃	0,17
Diğer	3,64
Kızdırma Kaybı	2,10

2.1.3.Kum

Deneysel çalışmalarda, maksimum tane boyutu 4 mm'den küçük olan ve Nevşehir bölgesinden temin edilen dere kumu kullanılmıştır. Kumun özgül ağırlığı 2,67, su emme oranı %1,98'dir Dere kumunun elek analizi Tablo 3'de verilmiştir.

Tablo 3. Dere kumuna ait elek analizi

Elek Çapı, mm	Geçen, %
4,00	99,10
2,00	65,10
1,00	40,20
0,50	21,30
0,25	9,90
0,13	3,70
0,06	0,90

2.1.4. Aktivatör ve Su

Deneysel çalışmalarda, Tekkim Kimya Sanayi firmasından temin edilen granül şeklinde sodyum metasilikat (Na_2SiO_3) aktivatör olarak kullanılmıştır. Deneysel çalışmalarda Nevşehir şebekesinden içilebilir musluk suyu kullanılmıştır. Sodyum metasilikatın kimyasal analizi Tablo.4'te verilmiştir.

Tablo 4.Sodyum metasilikatın kimyasal analizi

Spesifikasyon	Saflık	Sodyum Oksit (Na_2O)	Silika (SiO_2)	Demir (Fe)	Suda Çözünmeyen	pH
Değerler (%)	≥ 95	48,0-51,0	44,4-47,4	$\leq 0,1$	$\leq 0,5$	≥ 12

2.1.5. Polipropilen Lif

Lifli beton üretiminde polipropilen lifler çelik liflere alternatif olarak kullanılmaktadır. Deneysel çalışmalarda, Betonfiber BF12 firmasından temin edilen, yoğunluğu $0,91 \text{ g/cm}^3$, uzunluğu 12 mm olan doğal beyaz polipropilen lif kullanılmıştır. Polipropilen life ait özellikler Tablo.5'te verilmiştir. Şekil 5'de ise deneysel çalışmalarda kullanılan polipropilen lifler gösterilmiştir. Bu liflerin en önemli avantajlarından biri de beton tasarımını ve eğilme şeklini değiştirmeden beton dayanımını artırmasıdır.

Tablo 5. Polipropilen life ait özellikler

Özgül Ağırlık	$0,91 \text{ g/cm}^3$
Uzunluk	12 mm
Çekme Mukavemeti	450/700 Mpa
Elastisite Modülü	3000-3500 Mpa
ErimeNoktası	162°C
Yanma Noktası	593°C



Şekil 5. Polipropilen lifin görünümü

2.2. Ön Deneme Çalışmaları

Yapılan çalışmalarda en uygun karışım oranlarının belirlenebilmesi ve yüksek dayanımlı harçlar üretilmesi için bir takım ön deneme çalışmaları yapılmıştır. Yapılan ön çalışmalarda harçların kür sıcaklıkları, su içerikleri, kimyasal bileşenlerinin yanı sıra kum/bağlayıcı oranları değiştirilmiştir.

Birinci Ön Deneme Çalışması

Yapılan ilk deneme çalışmasında su/bağlayıcı oranı 0,40 ve kum/bağlayıcı oranı 3 olarak seçilmiştir. Karışımlarda 120 g sodyum metasilikat kullanılmıştır. Bu değer sodyum(Na) içeriği bakımından 450 g bağlayıcının %10'una karşılık gelmektedir. Uçucu kül ve yüksek fırın cürufu %0, %25, %50, %75 ve %100 oranlarında birbirleriyle yer değiştirmek suretiyle 5 farklı harç üretilmiştir (Tablo 6). Üretilen harçlar 24 saat 75°C etüv ve 90°C etüv olmak üzere 2 farklı şekilde kür edilmiştir. Isıl kür sonrası numunelere yüksek sıcaklık öncesi ve yüksek sıcaklık sonrası eğilme ve basınç dayanım deneyleri uygulanmıştır. Her iki kür sıcaklığında da numunelerin eğilme ve basınç dayanım değerlerinde büyük farklar olmadığından deneysel çalışmalarda kür sıcaklığı olarak 75°C olarak seçilmiştir.

Tablo 6. Birinci ön deneme çalışması numune oranları

	Bağlayıcı (g)		Kum (g)	Sodyum Metasilikat(g)	Su (g)
	Yüksek Fırın Cürufu	Uçucu Kül			
C100	450	0	1350	120	180
C75	337,5	112,5	1350	120	180
C50	225	225	1350	120	180
C25	112,5	337,5	1350	120	180
U100	0	450	1350	120	180

2.3. Deneylerin Tasarımı

Ön çalışma neticesinde üretim koşulları ve dayanım sonuçları dikkate alınarak, harç numunelerinin elde edilebilmesi için uygun kum/bağlayıcı oranı, bağlayıcı içerikleri, kür koşulları, su/bağlayıcı oranı ve polipropilen lif miktarı belirlenmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar aşağıdaki aşamalarla gerçekleştirilmiştir.

Yapılan ön çalışmalar sonucunda yüksek sıcaklık sonrası kür işlemi uygulanacak numunelerin su/bağlayıcı oranı:0,45 kum/bağlayıcı oranı:3 polipropilen lif miktarı bağlayıcı miktarının ağırlıkça %0,5'i olarak seçilmiştir. Yapılan çalışmada kontrol amaçlı polipropilen lif içermeyen ancak diğer içerikleri tamamen aynı olan 5 çeşit numune üretilmiştir.

Harçların dayanımında oluşan değişimin polipropilen lif ilavesiyle değişiminin belirlenmesi amaçlanmıştır. Uçucu kül ve yüksek fırın cürufu içeren harçlara, bağlayıcının ağırlıkça %0, %0,5, %1,0 ve %1,5 oranında polipropilen lif ilave edilmiştir. Polipropilen lif ilavesinin harçların akışkanlığına olumsuz etkisi düşünüldüğünde yeni su/bağlayıcı oranının 0,45 olmasına karar verilmiştir (Tablo 7).

Tablo 7. Üretilen numunelerin içerik oranları

	Bağlayıcı (g)		Polipropilen Lif (g)	Kum (g)	Sodyum Metasilikat(g)	Su (g)
	Yüksek Fırın Cürufu	Uçucu Kül				
S100	450	0	0	1350	120	202,5
S75	337,5	112,5	0	1350	120	202,5
S50	225	225	0	1350	120	202,5
S25	112,5	337,5	0	1350	120	202,5
S0	0	450	0	1350	120	202,5

	Bağlayıcı (g)		Polipropilen Lif (g)	Kum (g)	Sodyum Metasilikat(g)	Su (g)
	Yüksek Fırın Cürufu	Uçucu Kül				
S100-P0,5	450	0	2,25	1350	120	202,5
S75-P0,5	337,5	112,5	2,25	1350	120	202,5
S50-P0,5	225	225	2,25	1350	120	202,5
S25-P0,5	112,5	337,5	2,25	1350	120	202,5
S0-P0,5	0	450	2,25	1350	120	202,5

	Bağlayıcı (g)		Polipropilen Lif (g)	Kum (g)	Sodyum Metasilikat(g)	Su (g)
	Yüksek Fırın Cürufu	Uçucu Kül				
S100-P1	450	0	4,5	1350	120	202,5
S75-P1	337,5	112,5	4,5	1350	120	202,5
S50-P1	225	225	4,5	1350	120	202,5
S25-P1	112,5	337,5	4,5	1350	120	202,5
S0-P1	0	450	4,5	1350	120	202,5

	Bağlayıcı (g)		Polipropilen Lif (g)	Kum (g)	Sodyum Metasilikat(g)	Su (g)
	Yüksek Fırın Cürufu	Uçucu Kül				
S100-P1,5	450	0	6,75	1350	120	202,5
S75-P1,5	337,5	112,5	6,75	1350	120	202,5
S50-P1,5	225	225	6,75	1350	120	202,5
S25-P1,5	112,5	337,5	6,75	1350	120	202,5
S0-P1,5	0	450	6,75	1350	120	202,5

Numunelere etüvde 75°C sıcaklıkta 24 saat ısıl kür işlemi uygulanmıştır. Sertleşmiş harç numuneler üzerinde 1, 7, 28, 56 ve 90 günlük eğilme ve basınç dayanımı deneyleri yapılmıştır. Çalışma sonucunda polipropilen lif ilavesinin eğilme ve basınç dayanım değerlerine olumlu etkisi gözlenmiştir.

2.4 Harç Üretimi ve Kürü

Harç üretilirken tartım için kullanılacak malzemelerin kuru ve temiz olmasına dikkat edilmiştir. Daha sonra ön çalışmalar neticesinde belirlenen gramajlardaki malzemeler hassas tartı ile ölçülen kabın darası alınarak ölçülmüştür. Numune üretimi için yüksek fırın cürufu ve uçucu kül bağlayıcı olarak kullanılmak üzere tartılıp karışıma ilave edilmek için hazırlanmıştır. Hobart Mikseri'nin yazılımında bulunan karıştırma

seçeneklerinden TS 196-1 seçilmiş ve karıştırma işlemine bu standarda uygun olacak şekilde başlanmıştır. Karıştırma kabının içine öncelikle su ve hazırlanacak numune cinsine göre yüksek fırın cürufu ve uçucu kül ilave edilip 30 saniye (s) karıştırıldıktan sonra ikinci 30 s içinde ölçümden sonra bir kaptaki birbirine karıştırılan kum ve granül şeklinde sodyum metasilikat karışıma ilave edilmiştir. Ardından karışım 30 s boyunca yüksek hızda karıştırılmıştır. Bu işlem sonrasında Hobart Mikseri'nin ekranında "Kabı Sıyırınız" uyarısı çıkmıştır karıştırma kabının çeperlerindeki harçlar uygun bir spatula yardımıyla kabın orta kısımlarına toplanmıştır ve 90 s boyunca hiçbir karıştırma işlemi yapılmadan beklenmiştir. Bekleme süresi sonunda karışım son kez ve yüksek hızda 60 s daha karıştırıldıktan sonra karışım hazır hale gelmiştir. Öncesinde temizlenen ve yağlanan 40x40x160 mm boyutlarında Şekil 6'da gösterilen kalıplara kademeli olarak ve sıkıştırılarak yerleştirilmiştir.



Şekil 6. 4x4x16 cm boyutlarındaki numune kalıpları

Kalıplara yerleştirilen taze harç numuneleri ısı kürünü tamamlamak üzere 75°C'deki etüve yerleştirilmiş ve 24 saat sonunda fırından çıkarılmıştır. Kalıpların biraz soğuması beklenmiş ve daha sonrasında numuneler kalıplardan çıkarılmıştır. Laboratuvar ortamında oda sıcaklığına gelene kadar bekletilen ve soğuyan numunelerin isimlendirilmesi yapıldıktan sonra ağırlıkları ölçülmüş ve kaydedilmiştir. Numunelerin isimlendirilmesi yüksek fırın cürufu ve polipropilen lif içeriğine göre yapılmıştır. Numunelerin isimlendirilmesinden örnek verecek olursak S75/P0,5 numunesindeki S75 ibaresi harç içerisinde bulunan yüksek fırın cürufunun toplam bağlayıcı miktarına oranı olarak belirlenmiştir. S75 grubu numunelerde toplam bağlayıcıların %75'ini yüksek fırın cürufu oluştururken %25'ini ise uçucu kül oluşturmaktadır. P0,5 ibaresi harç üretiminde

bağlayıcının %0,5'i oranında polipropilen lif için kullanıldığını göstermektedir.Şekil 7'de kalıplara yerleştirilmiş numuneler gösterilmiştir.



Şekil 7.Kalıplara yerleştirilmiş numuneler

2.5. Deney Yöntemleri

2.5.1.Yayılma Tablası Deneyi

Yapılan çalışmalar neticesinde üretilen harçlara TS EN 1015-3 [55]standardına göre yayılma tablası deneyi yapılmıştır. Yüzeyi temizlenen ve hafif nemli olarak bırakılan tablanın ortasına huni düzgün şekilde yerleştirilmiştir. Huninin içerisine karışım işlemi tamamlanmış taze harç iki kademe halinde yerleştirilmiştir. Her kademe tokmakla 10 kısa vuruş ile sıkıştırılmıştır. Huninin üzerindeki harç spatula yardımıyla sıyrılarak alınmış ve tablaya taşan numuneler temiz ve nemli bir bez yardımıyla temizlenmiştir. Huni dikkatli bir şekilde ve dik doğrultuda düzenekten çıkarılmıştır. Saniyede 1 defa olacak şekilde tabla 15 sefer düşürülmüştür. Yayılan harcın çapı birbirine dik iki doğrultuda mm cinsinden ölçülerek ortalaması alınmıştır. Deney düzeneği Şekil 8'de gösterilmiştir.



Şekil 8. Yayılma tablası deney düzeneği

2.5.2. Birim Ağırlık ve Özgül Ağırlık Deneyi

ASTM C 642 [56] standardına göre sertleşmiş harç numunelerinin görünür birim ağırlık, görünür yoğunluk, kuru yoğunluk ve kuru yüzey doygun yoğunluk değerleri sırasıyla Bağıntı 2.1, Bağıntı 2.2, Bağıntı 2.3 ve Bağıntı 2.4 yardımı ile hesaplanmıştır.

$$\text{Görünür Birim Ağırlık (g / cm}^3\text{)} = \frac{A_{FK}}{\text{Numune Boyutları}} \quad (\text{Bağıntı 2.1})$$

$$\text{Görünür Yoğunluk (g / cm}^3\text{)} = \frac{A_{FK}}{A_{FK} - A_{SU}} \quad (\text{Bağıntı 2.2})$$

$$\text{Kuru Yoğunluk (g / cm}^3\text{)} = \frac{A_{FK}}{A_{KYD} - A_{SU}} \quad (\text{Bağıntı 2.3})$$

$$\text{KYD Yoğunluk (g / cm}^3\text{)} = \frac{A_{KYD}}{A_{KYD} - A_{SU}} \quad (\text{Bağıntı 2.4})$$

A_{FK} : Fırın kuru ağırlığı (g)

A_{KYD} : Kuru yüzey doymun ağırlığı (g)

A_{SU} : Su içindeki ağırlığı (g)

2.5.3. Su Emme Boşluk Oranı Deneyi

Su emme ve boşluk oranı deneyi 40x40x160 mm boyutlarında üretilen 28 gün laboratuvar ortamında bekletilmiş sertleşmiş numunelere uygulanmıştır. Numunelere ait boşluk ve su emme oranı gibi fiziksel özellikleri tespit etmek amacıyla fırın kuru ağırlıkları, kuru yüzey doymun ağırlıkları ve bunun yanı sıra Şekil 9'da gösterilen Arşimet terazisi sayesinde su içindeki ağırlıkları ölçülmüştür. Ölçülen ağırlıklar Bağntı 2.5 ve Bağntı 2.6 kullanılarak su emme ve boşluk oranı hesaplanmıştır.



Şekil 9.Arşimet terazisi

$$\text{Boşluk Oranı}(\%) = \frac{(A_{KYD} - A_{FK})}{(A_{KYD} - A_{SU})} \times 100 \quad (\text{Bağıntı 2.5})$$

$$\text{Su Emme Oranı}(\%) = \frac{A_{KYD} - A_{FK}}{A_{FK}} \times 100 \quad (\text{Bağıntı 2.6})$$

Burada;

A_{FK} : Fırın kurusu ağırlığı (g)

A_{KYD} : Kuru yüzey doygun ağırlığı (g)

A_{SU} : Su içindeki ağırlığı (g)

2.5.4. Eğilme Dayanımı Deneyi

Eğilme dayanımı deneyi 40x40x160 mm boyutlarında üretilen numunelere TS EN 1015-11 [57] standardına göre yapılmıştır. Yükleme hızı 50 N/s, mesnet açıklığı 100 mm olacak şekilde tek noktadan yükleme yapıp Bağıntı 2.7'e göre hesaplanarak kaydedilmiştir. Eğilme dayanım değeri 2 numunenin ortalaması alınarak belirlenmiştir. Üretilen numuneler 75°C'de 24 saat etüv kürü sonrası laboratuvar ortamında 1,7,28,56 ve 90 gün bekletilerek eğilme dayanım deneyine tabii tutulmuştur.

$$R_f = 1,5 \frac{F \times l}{b^3} \quad (\text{Bağıntı 2.7})$$

Burada;

R_f : Eğilmede çekme mukavemeti, N/mm²

b: Prizmanın kare kesitinin kenar uzunluğu, (40 mm)

F: Prizmanın ortasına uygulanmış olan kuvvet, (N)

l: Destek silindirlerin eksenleri arasındaki uzaklık, (100 mm)

2.5.5. Basınç Dayanımı Deneyi

Numuneler eğilme dayanımına tabii tutulduktan sonra iki yarım numune elde edilmiştir. Elde edilen numunelerin her birinin kalıptan çıkan düzgün yüzeylerine TS EN 1015-11 [57] standardına göre basınç dayanımı deneyi uygulanmıştır. Deney düzeneği ve uygulanma şekli Şekil 10'da gösterilmiştir.



Şekil 10. Eğilme-basma test cihazı

Numuneler 40x40 mm test cihaz başlığının arasına düzgün bir şekilde yerleştirilip 500 N/s hızda yük uygulanmıştır. Çıkan sonuçlar Bağıntı 2.8 ile hesaplanarak kaydedilmiştir. Numunelerin basınç dayanım değeri dört değerlerin ortalaması alınarak belirlenmiştir. Üretilen numuneler 75°C'de 24 saat etüv kürü sonrası laboratuvar ortamında 1,7,28,56 ve 90 gün bekletilerek basınç dayanım deneyine tabii tutulmuştur.

$$R_c = \frac{F_c}{b^2}$$

(Bağıntı 2.8)

Burada;

R_c : Basınç mukavemeti, N/mm^2

b : Basınç plakasının kenar uzunluğu, (40 mm)

F_c : Kırılmadaki en büyük kuvvet, (N)

2.5.6. Yüksek Sıcaklığa Dayanıklılık Deneyi

40x40x160 mm boyutlarında üretilen deney numunelerine yüksek sıcaklık fırınında $5^\circ C/dakika$ sıcaklık artışı ile istenilen sıcaklığa getirildikten sonra 60 dakika boyunca o sıcaklıkta tutularak yüksek sıcaklık direnci deneyi uygulanmıştır. Numuneler 400, 600 ve $800^\circ C$ yüksek sıcaklığa maruz bırakılmıştır. Yüksek sıcaklık sonrası laboratuvar ortam sıcaklığına geldiğinde ağırlıkları alınmış ve sonrasında 1, 28 ve 90 gün bekletilerek eğilme ve basınç dayanım deneylerine tabii tutulmuştur. Bu deney Şekil 11'deki cihaz kullanılarak yapılmıştır.



Şekil 11. Yüksek sıcaklık deney cihazı

2.5.7. SEM İncelemeleri

Polipropilen lif takviyeli ve takviyesiz yüksek fırın cürufu ve uçucu kül içeren harçların yüksek sıcaklık sonrası kür uygulamasının numunelerin içyapılarına etkisi incelenmek istenmiştir. Bu işlem taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak yapılmıştır.

Taramalı Elektron Mikroskopisinde, elektron kaynağından koparılan elektronlar vakum altında bulunan bir kolonda toplayıcı mercekler yardımıyla numune üzerine düşürülür. Numunelerin yüzeyinde yer alan atomlarla elektron demetinin etkileşmesi ile ortaya çıkan parçacıklar ve x-ışınları belirlenerek, incelenmekte olan örneğin içyapısı ve topoğrafyası hakkında bilgi edinilmektedir [58]

75°C’de 24 saat ısıtılma işlemi uygulanıp, 400, 600 ve 800°C yüksek sıcaklığa maruz bırakıldıktan sonra laboratuvar ortamında hava kütlesi uygulanan numunelerden alınan kırık parçalar Erciyes Üniversitesi Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi (TAUM) tarafından Şekil 12’de verilen Zeiss (GeminiSEM 500) marka cihaz ile farklı büyütme oranları alınarak incelenmiştir



Şekil 12. SEM cihazı

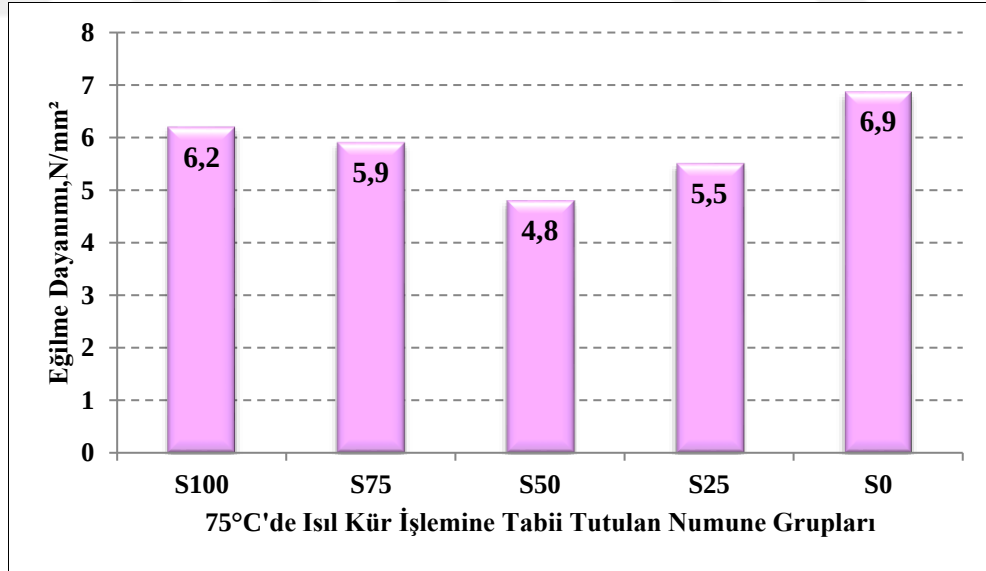
3. BÖLÜM

BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Ön Deneme Çalışmaları Deney Sonuçları

3.1.1. Ön Deneme Çalışmaları Eğilme Dayanımı Değerleri

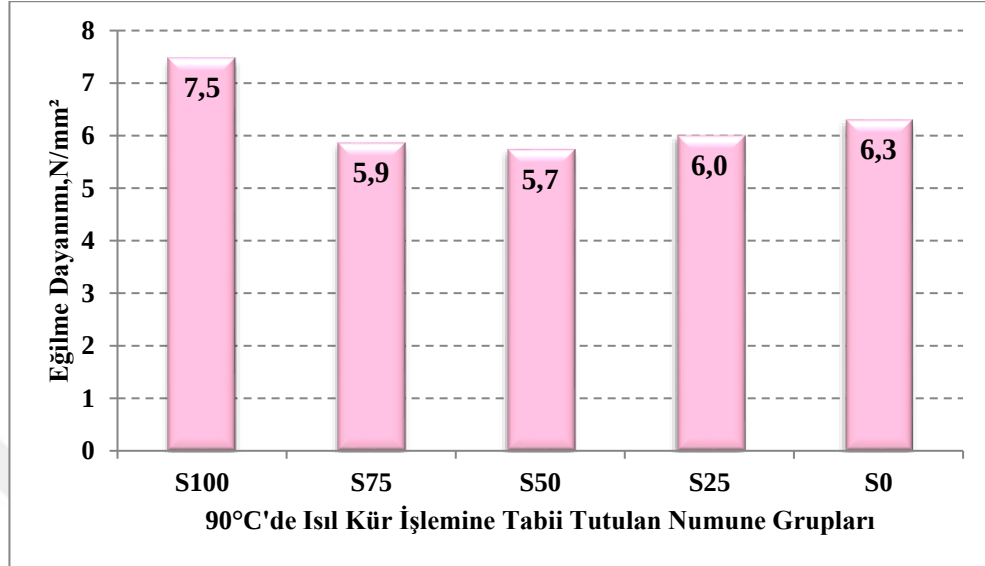
Yüksek fırın cürufu ve uçucu kül içeren alkali ile aktive edilmiş harçların 75°C ve 90°C ısıtılma işlemine tabi tutulduktan sonra eğilme dayanımları 1 gün için hesaplanmıştır. 75°C ısıtılma işlemine tabi tutulan harçların yüksek sıcaklık öncesi eğilme dayanımları Şekil.13'de verilmiştir.



Şekil 13. Birinci ön deneme çalışması 75°C'de ısıtılma işlemine tabi tutulan numunelerin eğilme dayanım değerleri

S100-S75-S50-S25 ve S0 grubu 75°C ısıtılma işlemine tabi tutulan numunelerin yüksek sıcaklık öncesi eğilme dayanımları sırasıyla 6,2 MPa, 5,9 MPa, 4,8 MPa, 5,5 MPa ve 6,9 MPa olarak ölçülmüştür.

90°C ısıtılma işlemine tabii tutulan harçların yüksek sıcaklık öncesi eğilme dayanımları Şekil.14'te verilmiştir.

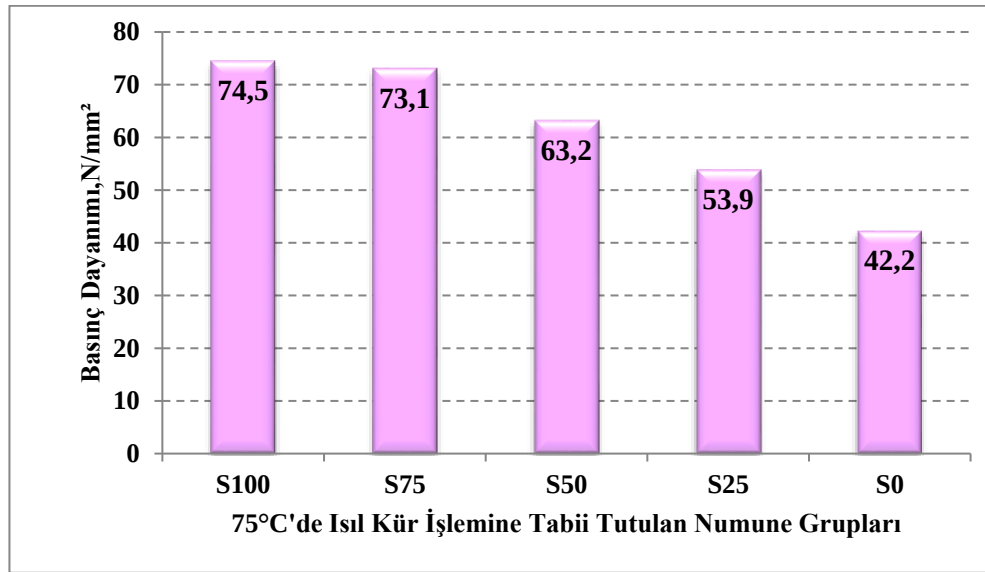


Şekil 14. Birinci ön deneme çalışması 90°C'de ısıtılma işlemine tabii tutulan numunelerin eğilme dayanım değerleri

S100-S75-S50-S25 ve S0 grubu 90°C ısıtılma işlemine tabii tutulan numunelerin yüksek sıcaklık öncesi eğilme dayanımları sırasıyla 7,5 MPa, 5,9 MPa, 5,7 MPa, 6,0 MPa ve 6,3 MPa olarak ölçülmüştür. 75°C ve 90°C'de kıl edilen harçların eğilme dayanımları %100 cüruf ve uçucu kıl içeren harçlar için farklı davranış gösterse de kıl ikame ettikçe dayanımdaki değişim benzer eğilim göstermektedir.

3.1.2. Ön Deneme Çalışmaları Basınç Dayanımı Değerleri

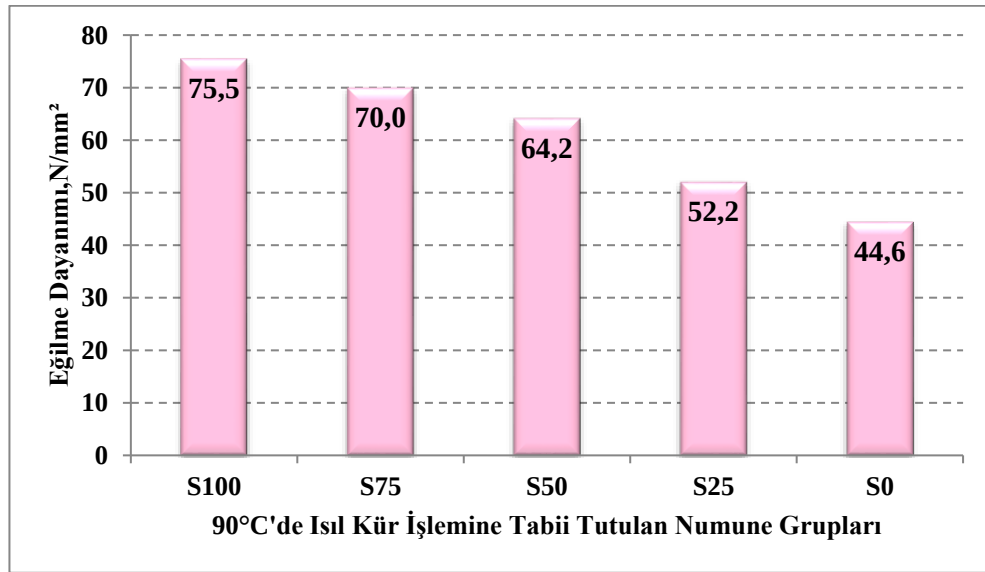
S100-S75-S50-S25 ve S0 grubu 75°C ısıtılma işlemine tabii tutulan numunelerin yüksek sıcaklık öncesi basınç dayanım değerleri Şekil 15'te gösterilmiştir.



Şekil 15. Birinci ön deneme çalışması 75°C'de ısıtılan numunelerin basınç dayanım değerleri

Numunelerin basınç değerleri sırasıyla 74,5 MPa, 73,1 MPa, 63,2 MPa, 53,9 MPa ve 42,2 MPa olarak ölçülmüştür. Uçucu kül ilavesi ile basınç dayanımları azalmıştır. Ancak %25 oranında uçucu kül ilavesi dayanımda büyük bir kayıp oluşturmamıştır. En düşük dayanım %100 uçucu kül ile üretilen numunelerde iken en yüksek dayanım %100 cüruf ile üretilen numunelerde oluşmuştur.

S100-S75-S50-S25 ve S0 grubu 90°C ısıtılan numunelerin yüksek sıcaklık öncesi basınç dayanım değerleri Şekil 16'da gösterilmiştir.



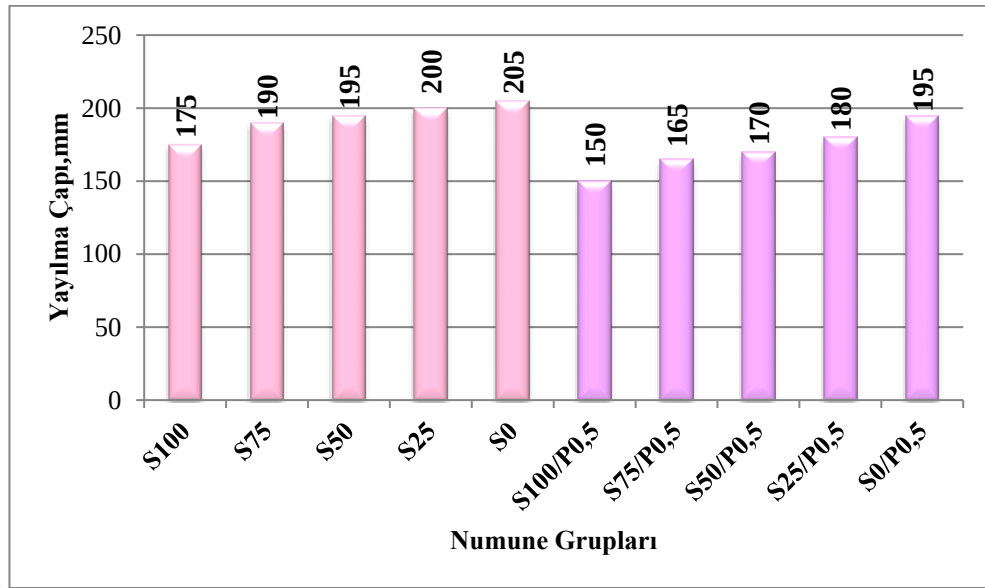
Şekil 16. Birinci ön deneme çalışması 90°C'de ısıtılarak kuru edilen numunelerin basınç dayanım değerleri

Numunelerin basınç değerleri sırasıyla 75,5 MPa, 70,0 MPa, 64,2 MPa, 52,2 MPa ve 44,6 MPa olarak ölçülmüştür. 75°C'de kuru edilen numunelerde olduğu gibi en düşük dayanım %100 uçucu kül ile üretilen numunelerde iken en yüksek dayanım ise %100 cüruf ile üretilen numunelerde görülmüştür. Ancak 75°C'den farklı olarak uçucu kül ikamesinin %25 oranında dayanımda düşüş başlamıştır.

Deneme çalışması neticesinde numunelerin 24 saatlik 75°C ve 90°C etüv kuru sonucunda hem eğilme dayanımı hem basınç dayanımı değerlerinde büyük oranda farklar gözlemlenmemiştir. Ayrıca düşük enerji kullanımı da göz önüne alınarak çalışmalarda kuru sıcaklığı 75°C seçilmiştir.

3.2. Yayılma Tablası Deney Sonuçları

Yüksek fırın cürufu ve uçucu kül içeren alkali ile aktive edilmiş %0,5 oranında polipropilen lif takviyeli ve takviyesiz harç numunelerinin yayılma çapları Şekil 17'de verilmiştir.



Şekil 17.Yüksek sıcaklık öncesi numunelerin yayılma çapı değerleri

Alkali ile aktive edilmiş yüksek fırın cürufu ve uçucu kül içeren harçların yayılma çapları 175-205 mm arasında ölçülmüştür. %0,5 oranında polipropilen lif içeren harçların yayılma çapları ise 150-195 mm arasında değişmektedir. En yüksek yayılma çapı değeri S0 grubu harçlarda, en düşük yayılma çapı değeri ise S100/P0,5 grubu harçlarda ölçülmüştür. Yayılma çapları dikkate alındığında harçların içerisindeki yüksek fırın cürufu oranı azaldığında kıvamın iyileştiği gözlemlenmiştir. Polipropilen lif takviyesi ise kıvamı olumsuz etkilemiştir. Uçucu külün küresel taneli olması yayılma çapına pozitif etki etmiştir. Bu nedenle lifli ve lifsiz harçlar uçucu kül ikamesi ile benzer kıvam artış eğilimi göstermiştir. Uçucu kül ikamesinin cürufu harçların yayılma değerini arttırdığı Almaz Özcan'ın [27] çalışmasında da belirtilmiştir. Tamamen cüruf ile üretilen alkali ile aktive edilmiş harçlarda 0,40 su/bağlayıcı oranında 118 mm olan yayılma değeri %100 uçucu kül ile üretilen harçlarda 136 mm'ye yükselmiştir.

3.3. Birim Ağırlık ve Özgül Ağırlık Deney Sonuçları

Yüksek fırın cürufu ve uçucu kül içeren polipropilen lif takviyeli ve takviyesiz harç numuneleri etüvde 24 saatlik 75°C ısıtma işlemine tabii tutulduktan sonra oda sıcaklığına gelinceye kadar soğuması beklenmiştir. Oda sıcaklığına gelen numunelerin hassas terazi yardımıyla ağırlıkları ölçülmüş ve kaydedilmiştir. Numunelerin ASTM C 642'ye [59]göre görünür birim ağırlık, görünür yoğunluk, kuru yoğunluk ve kuru yüzey doygun yoğunluk değerleri Tablo 8'de verilmiştir.

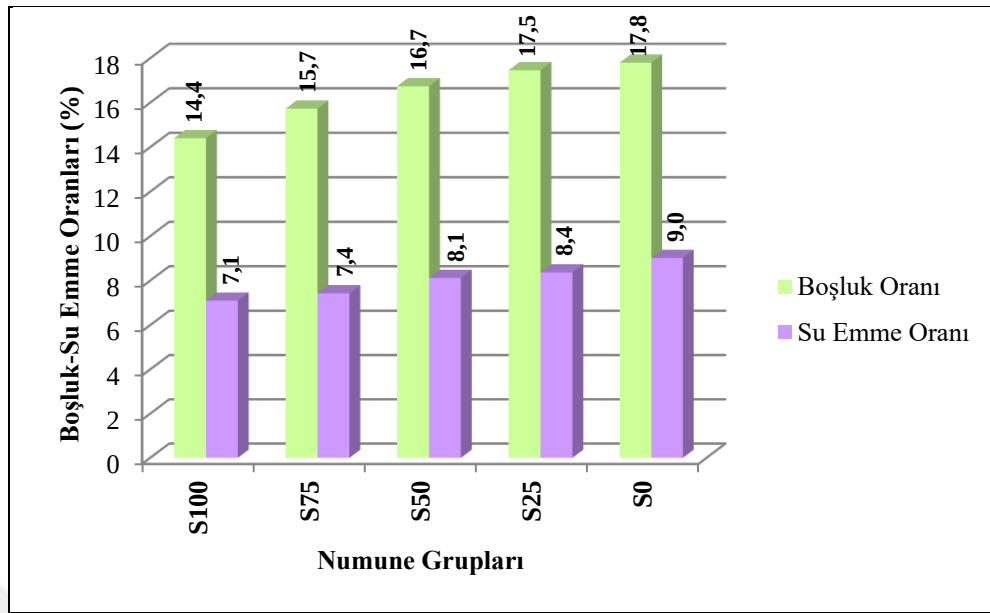
Tablo 8. Numunelerin birim ağırlık ve özgül ağırlık değerleri

Numune Grupları	Görünür Birim Ağırlık, g/cm ³	Görünür Özgül Ağırlık, g/cm ³	Kuru Özgül Ağırlık, g/cm ³	DKY Özgül Ağırlık, g/cm ³
S100	2,25	2,53	2,12	2,28
S75	2,18	2,52	2,08	2,26
S50	2,13	2,48	2,06	2,23
S25	2,13	2,36	2,02	2,16
S0	2,12	2,40	1,97	2,15
S100/P0,5	2,22	2,54	2,09	2,27
S75/P0,5	2,16	2,53	2,09	2,26
S50/P0,5	2,14	2,46	2,05	2,22
S25/P0,5	2,09	2,37	2,03	2,17
S0/P0,5	2,05	2,36	1,94	2,11

Alkali ile aktive edilen S100 grubu harçlarının birim ağırlık ve özgül ağırlıkları S0 grubu harçlarına göre biraz daha yüksek olduğu görülmüştür. Hem uçucu külün (2,29 g/cm³) hem de lifin ilavesi ile daha düşük (0,91 g/cm³) özgül ağırlığa sahip malzemelerin karışıma girmesi harçlarının birim ağırlıklarının ve özgül ağırlıklarının azalmasına neden olmuştur.

3.4. Su Emme ve Boşluk Oranı Sonuçları

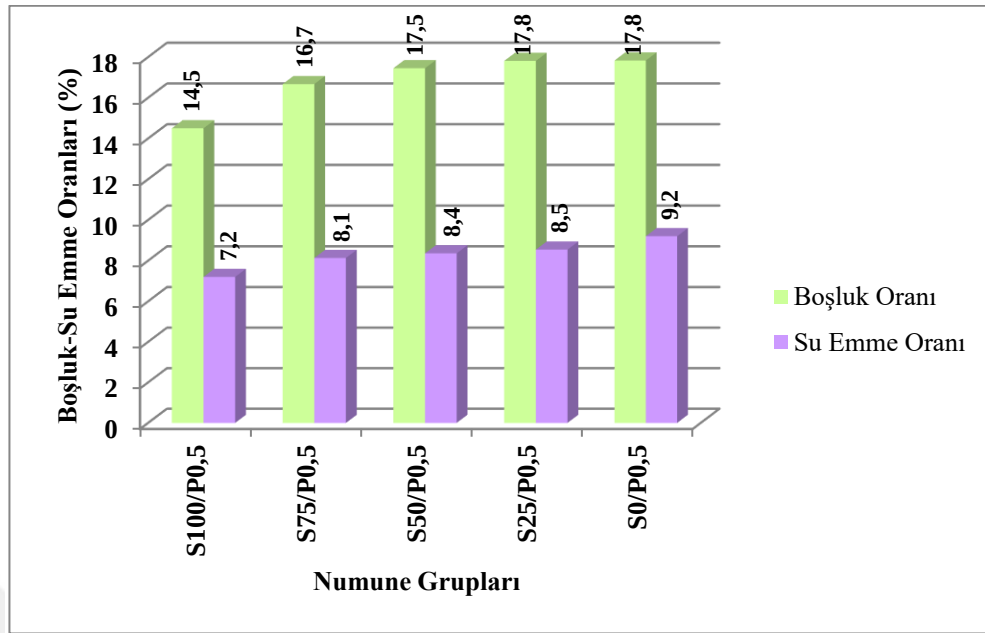
Yüksek fırın cürufu ve uçucu kül içeren polipropilen lif takviyeli ve takviyesiz harç numuneleri etüvde 24 saatlik 105°C’de kurutulduktan sonra oda sıcaklığına gelinceye kadar soğuması beklenmiştir. Oda sıcaklığına gelen numunelerin hassas terazi yardımıyla ağırlıkları ölçülmüş ve kaydedilmiştir. Numunelerin etüv kuru ağırlıkları alındıktan sonra 24 saat su içinde bekletilmiştir. 24 saatlik süre sonunda numuneler sudan çıkarılmış kuru bir bez yardımıyla yüzeyindeki su kurulanmış ve tekrar ağırlıkları kaydedilmiştir. Kaydedilen bu ağırlık değeri numunelerin kuru yüzey doygun ağırlıklarıdır. Bu aşamadan sonra numunelerin Arşimet terazisi yardımıyla suyun içindeki ağırlıkları da ölçülüp kaydedilmiştir. Alkali ile aktive edilmiş yüksek fırın cürufu ve uçucu kül içeren lifsiz numunelerin boşluk oranları ve su emme oranları Şekil 18’de gösterilmiştir.



Şekil 18. Polipropilen lif takviyesiz alkali ile aktive edilmiş harçların boşluk-su emme oranları

Yapılan işlemler sonucundan alkali ile aktive edilmiş polipropilen lif takviyesiz harç numunelerinin boşluk oranları S100-S75-S50-S25 ve S0 grubu harç numuneleri için sırasıyla %14,4- %15,7-%16,7-%17,5-%17,8 olarak hesaplanmıştır. Numunelerin su emme oranları S100-S75-S50-S25 ve S0 grubu numuneler için sırasıyla %7,1-%7,4-%8,1-%8,4-%9,0 olarak hesaplanmıştır. Uçucu kül oranının artışı ile su emme ve boşluk oranlarında artış görülmüştür.

Bağlayıcının %0,5'i oranında polipropilen lif takviyeli harç numunelerinin boşluk -su emme oranları Şekil 19'da gösterilmiştir.



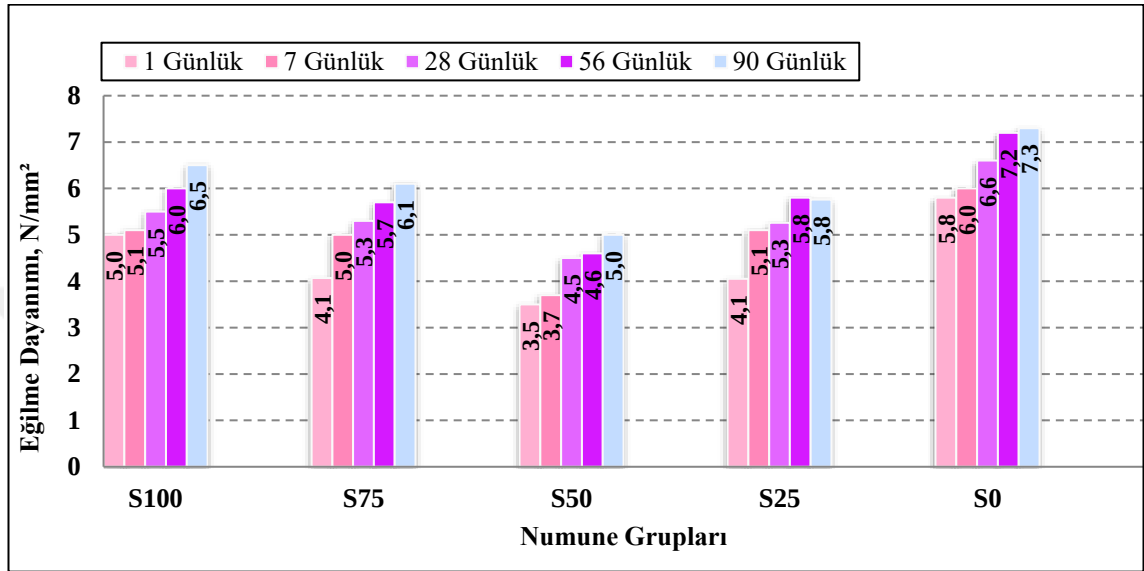
Şekil 19.%0,5 oranında polipropilen lif takviyeli harçların boşluk-su emme oranları

Boşluk oranları S100/P0,5-S75/P0,5-S50/P0,5-S25/P0,5 ve S0/P0,5 grubu harç numuneleri için sırasıyla %14,5-%16,7-%17,5-%17,8-%17,8 olarak hesaplanmıştır. Numunelerin su emme oranları S100/P0,5-S75/P0,5-S50/P0,5-S25/P0,5 ve S0/P0,5 grubu numuneler için sırasıyla %7,2-%8,1-%8,4-%8,5-%9,2 olarak hesaplanmıştır. Lif takviyeli harçların su emme ve boşluk oranları lifsiz harçlara yakın değerlerde bulunmuştur. Lif miktarının bağlayıcının ağırlıkça %0,5'i oranında olması harç gruplarının yakın değerler vermesine sebep olmuştur. Benzer şekilde başka bir çalışmada Kuranlı ve ark. (2022) [47] çalışmalarında lif oranının hacimce %0,4 artması su emme oranını %3,65'den %3,75'e arttırmış ancak bu durum kayda değer bir artış oluşturmamıştır. Genel olarak lif oranının çok düşük miktarda karışımda yer alması değerlerin yakın olmasına sebep olmuştur. Harç gruplarında basınç dayanımındaki artışa paralel olarak su emme ve boşluk oranları da uçucu kül ikame oranı arttıkça artış göstermiştir.

3.5. Eğilme Dayanımı Deney Sonuçları

Polipropilen lif takviyesiz ve bağlayıcının %0,5-%1-%1,5'i oranında polipropilen lif takviyeli yüksek fırın cürufu ve uçucu kül içeren alkali ile aktive edilen harçların yüksek sıcaklık öncesi eğilme dayanımları 75°C ısıtılma sonrası 1, 7, 28, 56 ve 90 gün için hesaplanmıştır. Uygun lif oranının %0,5 olarak belirlenmesi sonucu 400°C - 600°C

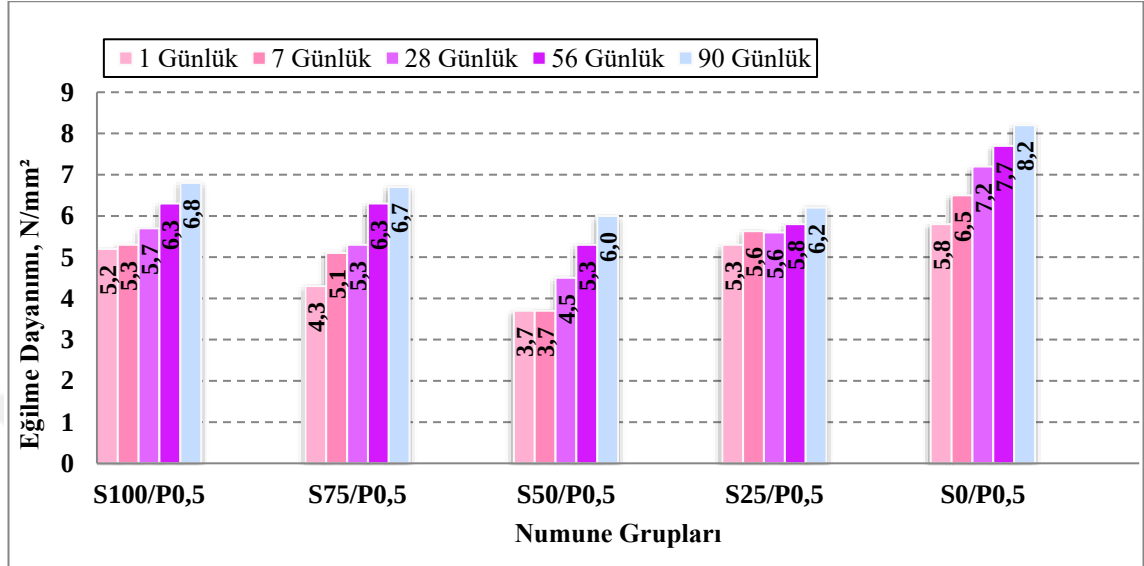
ve 800°C yüksek sıcaklık sonrası polipropilen lif takviyesiz ve bağlayıcının %0,5'i oranında polipropilen lif takviyeli harçların eğilme dayanım hesapları ise 1, 28 ve 90 gün için yapılmıştır. Yüksek sıcaklık öncesi polipropilen lif takviyesiz harç numunelerinin eğilme dayanımları Şekil.20'de verilmiştir.



Şekil 20.Yüksek sıcaklık öncesi polipropilen lif takviyesiz harçların eğilme dayanımları

Numunelerin en düşük ve en yüksek eğilme dayanımları sırasıyla 1 ve 90 günde gözlenmiştir. 90 günlük hava kürü etkisi eğilme dayanıma olumlu yönde katkı sağlamıştır. S100-S75-S50-S25 ve S0 numunelerinin eğilme dayanımları arasında parabolik ve önce azalan sonrasında ise artan bir ilişki söz konusudur. En düşük eğilme dayanım değeri 1 günlük S50 grubu numunelerinde 3,5 MPa olarak ölçülürken en yüksek eğilme dayanım değeri ise 90 günlük S0 grubu numunelerinde 7,3 MPa olarak ölçülmüştür. Uçucu külün cürufa ikame edilmesi eğilme dayanımında önce düşüş olarak görülmüş ancak uçucu kül oranının cürufu geçmesi ile artışa geçmiştir. Genel olarak S100 ve S0 grubu harçların eğilme dayanımları S50 grubundan yüksektir. %50 cüruf ve % 50 uçucu kül içeren harçlarda eğilme dayanımının düşük olması, cürufli sistemlere uçucu kül ilave edilmesi reaksiyon kinetiğini değiştirmektedir. Bu durum Pan ve ark. (2018) ve Puertas ve ark. (2011) tarafından, düşük Ca içeriğinin dayanımı arttıran jel oluşumunu geciktirdiği böylece %100 uçucu kül veya %100 cüruf ile üretilen harçlara göre karışımın farklı davranış sergilediğini ifade etmektedirler [49] [60].

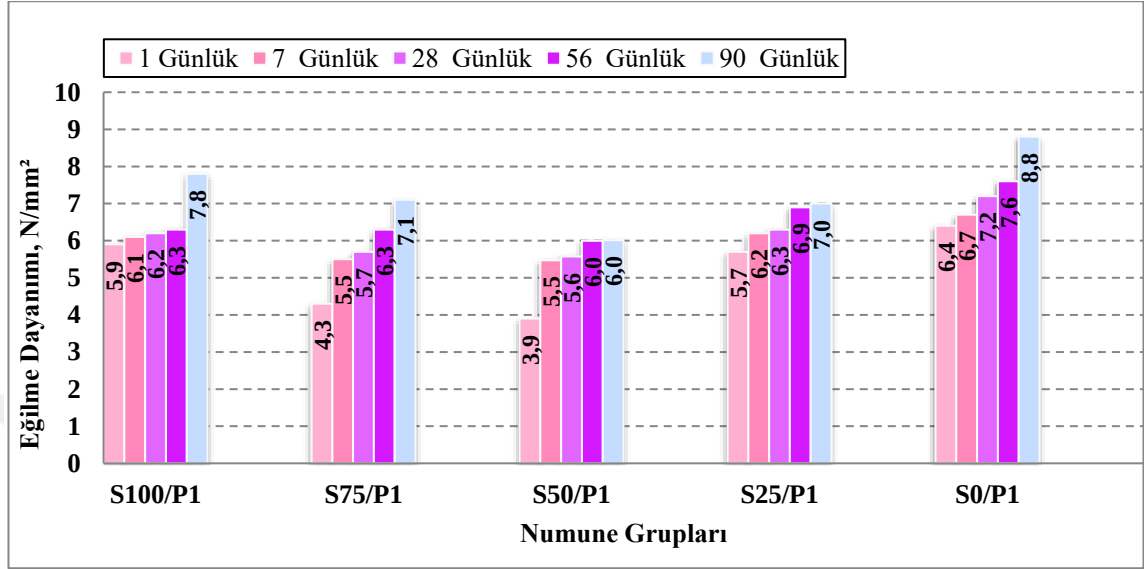
Yüksek sıcaklık öncesi bağlayıcının %0,5'i oranında polipropilen lif takviyeli harç numunelerinin eğilme dayanımları Şekil.21'de verilmiştir.



Şekil 21. Yüksek sıcaklık öncesi %0,5 oranında polipropilen lif takviyeli harçların eğilme dayanımları

S100/P0,5-S75/P0,5-S50/P0,5-S25/P0,5 ve S0/P0,5 harç numunelerinin 1 ve 90 günlük eğilme dayanım değerleri sırasıyla 5,2 MPa ile 6,8 MPa, 4,3 MPa ile 6,7 MPa, 3,7 MPa ile 6,0 MPa, 5,3 MPa ile 6,2 MPa ve 5,8 MPa ile 8,2 MPa arasında elde edilmiştir. En yüksek eğilme dayanım değeri S0/P0,5 grubu numunelerinin 90 günlük dayanım sonuçlarına aittir ve bu değer 8,2 MPa olarak bulunmuştur. %0,5 oranında polipropilen lif takviyesinin 1 günlük eğilme dayanım sonuçlarına katkısı yok denecek kadar azdır. Bununla beraber harçların eğilme dayanımları 1 günden 90 güne %16 ile %62 oranları arasında artış göstermiştir. Lifsiz numunelerle karşılaştırıldığında polipropilen lif takviyesinin dayanıma etkisi hava kürünün uzamasıyla birlikte artış göstermeye başlamıştır. Yine lifsiz numunelerde olduğu gibi %50 cüruf %50 uçucu kül içeren numunelerin eğilme dayanımları en düşük eğilme dayanımı sonuçlarına sahiptir. Fakat S50 numunelerine lif ilave edilmesi 90 günde S100 numunelerine eğilme dayanımı değerini daha çok yaklaştırmıştır. S100 grubu 90 günde 6,5 MPa iken S100/P0,5 ise 6,8 MPa'dır. S50 numunesi ise 5,0 MPa iken 6,0 MPa'a çıkmıştır. Kısaca S50 numunelerinde lif ilavesi eğilme dayanımını %20 arttırırken S100 grubuna lif ilavesi %5 artış sağlamıştır.

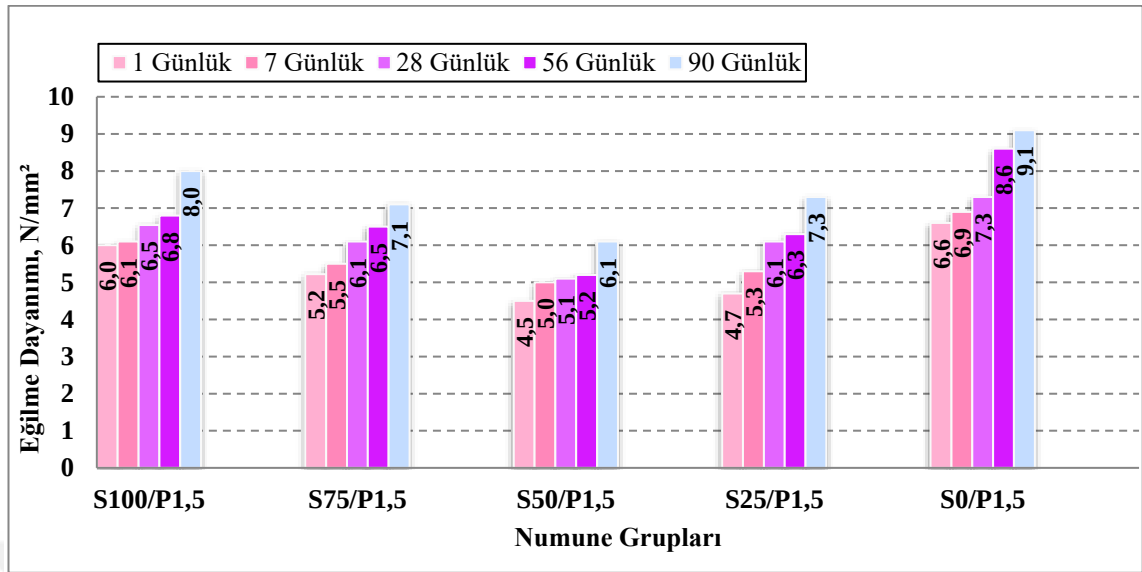
Yüksek sıcaklık öncesi bağlayıcının %1'i oranında polipropilen lif takviyeli harç numunelerinin eğilme dayanımları Şekil.22'de verilmiştir.



Şekil 22.Yüksek sıcaklık öncesi %1 oranında polipropilen lif takviyeli harçların eğilme dayanımları

S100/P1-S75/P1-S50/P1-S25/P1 ve S0/P1 harç numunelerinin 1 ve 90 günlük eğilme dayanım değerleri sırasıyla 5,9 MPa ile 7,8 MPa, 4,3MPa ile 7,1 MPa, 3,9 MPa ile 6,0 MPa, 5,7MPa ile 7,0 MPa ve 6,4 MPa ile 8,8 MPa arasında elde edilmiştir. Harçlarda 1 günden 90 güne en yüksek eğilme dayanımı artışı %65 ile S75 grubu numunelere aittir. %1 lif ilavesi harçlarda özellikle tek başına kullanılan cüruf ve uçucu kül grubunda yani S100 ve S0 grubunda daha fazla etki göstermiştir. Kür süresi 90 gün olan numunelerde S100/P0,5 grubu 6,8 MPa iken S100/P1 grubu 7,8 MPa'a ulaşmıştır. Benzer şekilde S0/P0,5 grubu 8,2 MPa iken S0/P1 8,8 MPa'a ulaşmıştır. Buna rağmen S50/P0,5 6,0 MPa iken S50/P1 de 6 MPa elde edilmiştir. Ancak 7, 28, ve 56 günlük numunelerde değerler yakın olsa da S50/P0,5'e kıyasla eğilme dayanımına daha olumlu katkıda bulunmuştur.

Yüksek sıcaklık öncesi bağlayıcının %1,5'i oranında polipropilen lif takviyeli harç numunelerinin eğilme dayanımları Şekil.23'de verilmiştir.



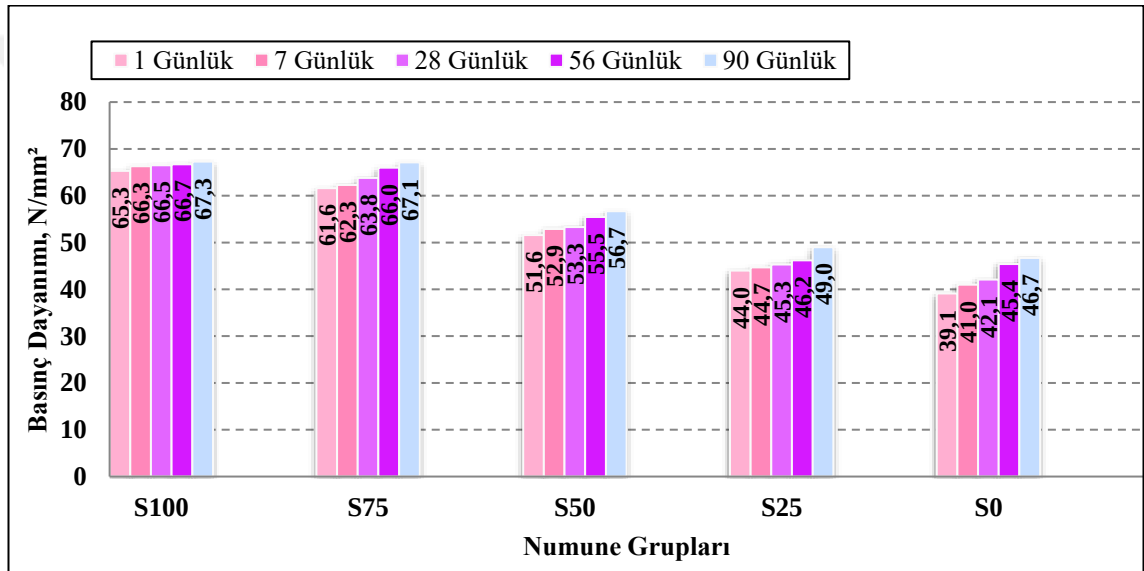
Şekil 23.Yüksek sıcaklık öncesi %1,5 oranında polipropilen lif takviyeli harçların eğilme dayanımları

S100/P1,5-S75/P1,5-S50/P1,5-S25/P1,5 ve S0/P1,5 harç numunelerinin 1 ve 90 günlük eğilme dayanım değerleri sırasıyla 6,0MPa ile 8,0 MPa, 5,2 MPa ile 7,1 MPa, 4,5 MPa ile 6,1 MPa, 4,7MPa ile 7,3 MPa ve 6,6 MPa ile 9,1 MPa arasında elde edilmiştir. En yüksek eğilme dayanım değerlerine %1,5 polipropilen lif ilavesiyle ulaşılmıştır. Diğer gruplarda da olduğu gibi en yüksek eğilme dayanım değerine S0 grubunun 90 günlük değerlerinde rastlanmıştır. Bu değer 9,1 MPa olarak ölçülmüştür. Alkali ile aktive edilmiş harçlara %0,5 oranında polipropilen lif ilavesi ile artış görülmüş ve bu artışa ek olarak %1 ve %1,5 lif ilavesi ile eğilme dayanımı artışı görülse de değerler yakındır. Polipropilen lifin eğilme dayanımına katkısı göz önüne alındığında oranları basınç dayanımı ile birlikte değerlendirilerek yüksek sıcaklık için ağırlıkça %0,5 oranında polipropilen lif kullanılarak deney sonuçları değerlendirilmiştir.Polipropilen lif ilavesi ile eğilme dayanımlarındaki artış genel olarak çekme gerilmelerinin lifler tarafından bir miktarının karşılanması sebebi ile oluşmuştur [61] [62]

Literatürde Chindaprasirt ve ark. (2021) [46] çalışmalarında yüksek kalsiyum içeren uçucu kül içeren alkali aktive edilmiş pasta numunelerine %0,5, %1 ve %1,5 lif ilave etmiş ve eğilme dayanımlarında %1 de dayanım artışı maksimuma ulaşsa da basınç dayanımında %0,5 ile en yüksek dayanıma ulaşmıştır.Ancak %1 ve %1,5 lif içeriği değerleri de çok yakındır. Bu sebeple %0,5 lif içeriği basınç dayanımı ve eğilme dayanımı birlikte değerlendirildiğinde en uygun sonuçlara ulaşılmıştır.

3.6. Basınç Dayanımı Deney Sonuçları

Polipropilen lif takviyesiz ve bağlayıcının %0,5-%1,0-%1,5'i oranında polipropilen lif takviyeli yüksek fırın cürufu ve uçucu kül içeren alkali ile aktive edilmiş harçların yüksek sıcaklık öncesi basınç dayanımları 1, 7, 28, 56 ve 90 gün için hesaplanmıştır. Ayrıca 400°C - 600°C ve 800°C yüksek sıcaklık sonrası polipropilen lif takviyesiz ve bağlayıcının %0,5'i oranında polipropilen lif takviyeli harçların basınç dayanım hesapları ise 1, 28 ve 90 gün için yapılmıştır. Yüksek sıcaklık öncesi polipropilen lif takviyesiz harç numunelerinin basınç dayanımları Şekil.24'te verilmiştir.

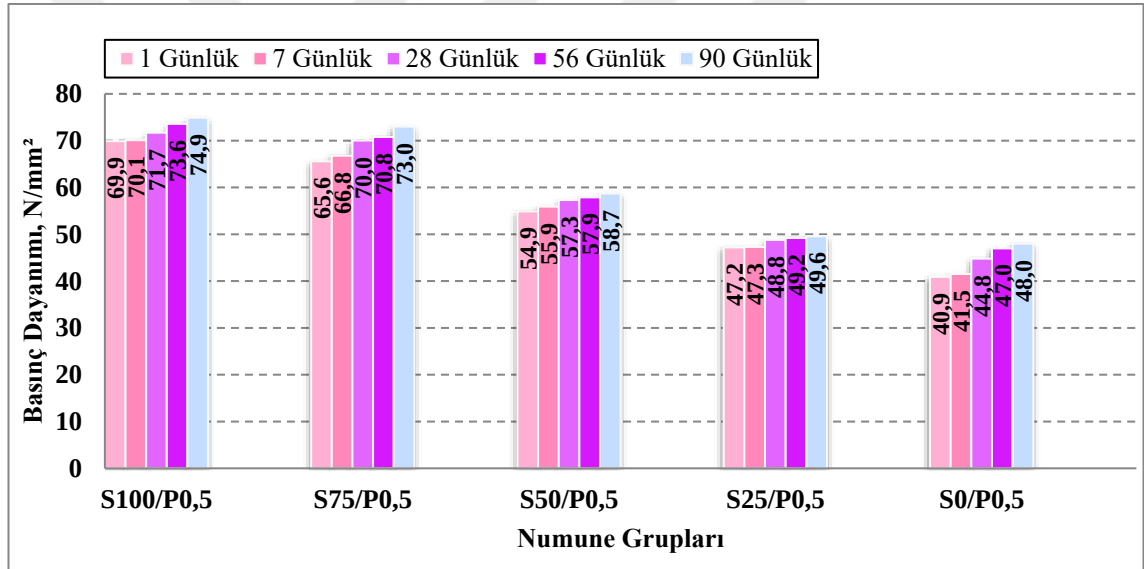


Şekil 24. Yüksek sıcaklık öncesi polipropilen lif takviyesiz harçların basınç dayanımları

Numunelerin en düşük ve en yüksek basınç dayanımları sırasıyla 1 ve 90 günde gözlemlenmiştir. 90 günlük hava kürü etkisi basınç dayanıma olumlu yönde katkı sağlamıştır. Ancak artış miktarı azdır. S100-S75-S50-S25 ve S0 harç numunelerinin 1 ve 90 günlük basınç dayanım değerleri sırasıyla 65,3MPa- 67,3 MPa, 61,6MPa- 67,1 MPa, 51,6 MPa - 56,7 MPa, 44,0 MPa - 49,0 MPa ve 39,1MPa-46,7 MPa şeklinde elde edilmiştir. Harçların basınç dayanımları 1 günden 90 güne %3 ile %19 oranları arasında artış göstermiştir. S100-S75-S50-S25 ve S0 harç numunelerinin basınç dayanımları göz önüne alındığında S100 grubu numuneler grup içindeki en yüksek basınç dayanımlarına sahiptirler. Numunelerin basınç dayanım değerlerinde S100 grubu numunelerden, S0 grubu numunelere doğru doğrusal bir azalış gösterdiği görülmüştür. Bunun yanı sıra

numunelerin 1 ve 90 günlük basınç dayanımlarındaki oransal artış S100 grubunda %3 iken S0 grubunda %19'dur. Yüksek fırın cürufu ile üretilen harçlar en yüksek dayanıma ısıl kür sonrası ulaşırken 90 güne kadar 2 MPa artış gösterse de S0 grubu 7,6 MPa artış göstererek havada beklemesi bir miktar daha olumlu etki etmiştir. Ayrıca S75 grubunda %25 uçucu kül ikamesi 1,7,28 günlük numunelerde dayanımda bir miktar azalma gösterse de 56 ve 90 günde S100 grubuna yakın veya eş değer basınç dayanımı sergilemiştir. Genel olarak dayanımda azalmalar S50 grubunda %50 uçucu kül ikamesi ile başlamıştır.

Yüksek sıcaklık öncesi bağlayıcının %0,5'i oranında polipropilen lif takviyeli harç numunelerinin basınç dayanımları Şekil.25'te verilmiştir.

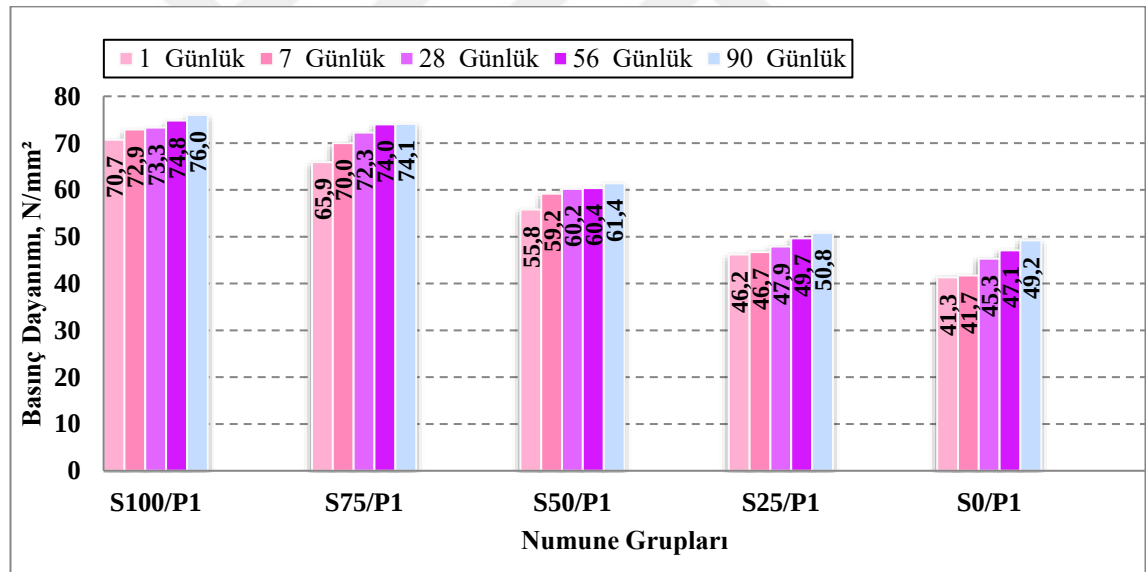


Şekil 25.Yüksek sıcaklık öncesi %0,5 oranında polipropilen lif takviyeli harçların basınç dayanımları

S100/P0,5-S75/P0,5-S50/P0,5-S25/P0,5 ve S0/P0,5 harç numunelerinin 1 ve 90 günlük basınç dayanım değerleri sırasıyla 69,9MPa- 74,9 MPa, 65,6MPa- 73,0 MPa, 54,9MPa- 58,7 MPa, 47,2MPa-49,6 MPa ve 40,9MPa -48,0 MPa arasında elde edilmiştir. En yüksek basınç dayanım değeri S100/P0,5 grubu numunelerinin 90 günlük dayanım sonuçlarına aittir ve bu değer 74,9 MPa olarak bulunmuştur. 1 ve 90 günlük basınç dayanımları göz önüne alındığında 90 güne kadar kür edilmesinin tüm numune gruplarına olumlu etkisi gözlenmiştir. Bunun yanı sıra %0,5 oranında polipropilen lif takviyesinin lifsiz harçlara göre tüm kür sürelerinde basınç dayanım sonuçlarına olumlu

katkısından söz edilebilmektedir. Lif içermeyen S100 grubu harcı 90 günde 67,3 MPa basınç dayanıma sahip iken %0,5 lif içeren S100/P0,5 harcında 74,9 MPa'a ulaşarak %11 artış göstermiştir. Ancak lif içermeyen S0 grubu harcı 90 günde 46,7 MPa basınç dayanımına sahip iken %0,5 lif içeren 48,0 MPa'a ulaşarak %3 artış göstermiştir. Tüm 1,7,28 ve 56 günlük dayanım gruplarında da benzer şekilde artışlar oluşmuştur. Genel olarak oransal artış çok yüksek olmasa da cüruf içeren harçlar lif içeriğinden daha olumlu etkilenmiştir. Polipropilen lif içeren %25 oranında uçucu küllü S75 grubu harçlar S100 grubu harçlara benzer davranış göstererek dayanım gelişimi lifli harçlarda artış olarak görülmüştür. Ancak %50 uçucu kül ikamesi ile lif etkisi dayanımda büyük oranda etki etmemektedir.

Yüksek sıcaklık öncesi bağlayıcının %1'i oranında polipropilen lif takviyeli harç numunelerinin basınç dayanımları Şekil.26'da verilmiştir.

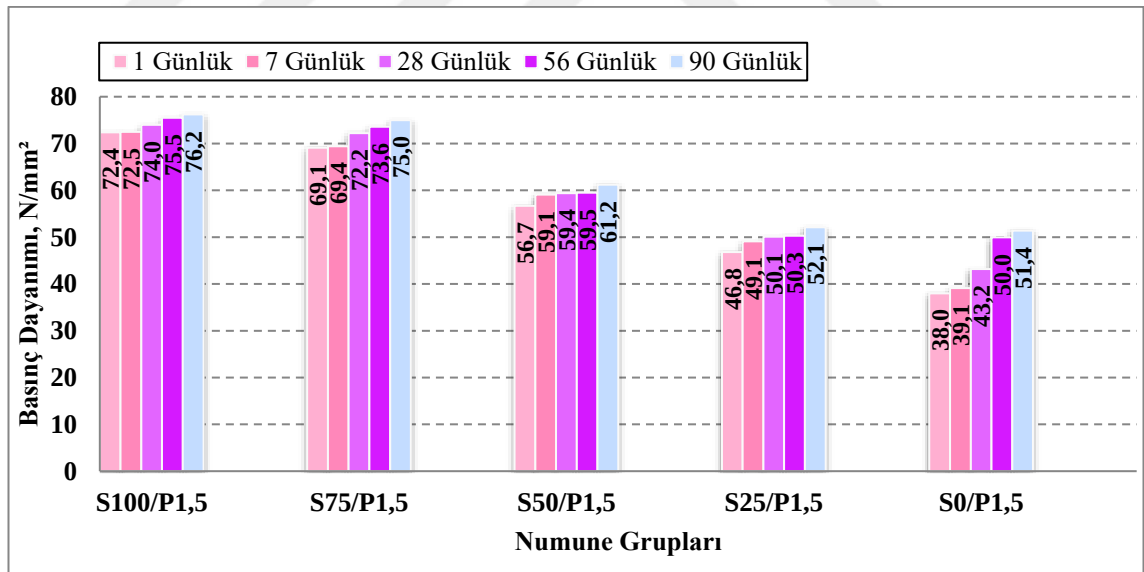


Şekil 26.Yüksek sıcaklık öncesi %1 oranında polipropilen lif takviyeli harçların basınç dayanımları

Yüksek fırın cürufu ve uçucu kül içeren alkali ile aktive edilen harç numunelerinin en düşük ve en yüksek basınç dayanımları sırasıyla 1 ve 90 günde gözlenmiştir. 90 günlük hava kürü etkisi basınç dayanıma olumlu yönde katkı sağlamıştır. S100/P1-S75/P1-S50/P1-S25/P1 ve S0/P1 harç numunelerinin 1 ve 90 günlük basınç dayanım değerleri sırasıyla 70,7MPa- 76,0 MPa, 65,9MPa -74,1 MPa, 55,8MPa -61,4 MPa, 46,2MPa-50,8 MPa ve 41,3MPa - 49,2 MPa arasında elde edilmiştir. S100/P1-S75/P1-S50/P1-S25/P1

ve S0/P1 harç numunelerinin basınç dayanımları göz önüne alındığında S100 grubu numuneler grup içindeki en yüksek basınç dayanımlarına sahiptirler. %1 oranında polipropilen lif takviyesinin 1 günlük basınç dayanım sonuçlarına olumlu katkısından söz edilebilmektedir. Numunelerin basınç dayanım değerlerinde S100/P1 grubu numunelerden, S0/P1 grubu numunelere doğru doğrusal bir azalış gösterdiği görülmüştür. Bunun yanı sıra numunelerin 1 ve 90 günlük basınç dayanımlarındaki oransal artış S100 grubunda %7 iken S0 grubunda %19'dur. Harçlara %1 oranında polipropilen lif ilavesi lifsiz harçlara kıyasla basınç dayanımda özellikle S100 ve S75 grubu harçlarda dayanım artışı olarak görülmüştür. Ancak uçucu kül ikame oranının artış gösterdiği S50, S25 ve S0 grubu harçlarda dayanıma lifin katkısı %0,5 oranında olduğu gibi düşük kalmıştır. Lif etkisi %0,5 oranında dayanıma etkisini gösterdikten sonra %1 lif ilavesi basınç dayanımda önemli derecede etki etmemiştir.

Yüksek sıcaklık öncesi bağlayıcının %1,5'i oranında polipropilen lif takviyeli harç numunelerinin basınç dayanımları Şekil.27'de verilmiştir.



Şekil 27.Yüksek sıcaklık öncesi %1,5 oranında polipropilen lif takviyeli harçların basınç dayanımları

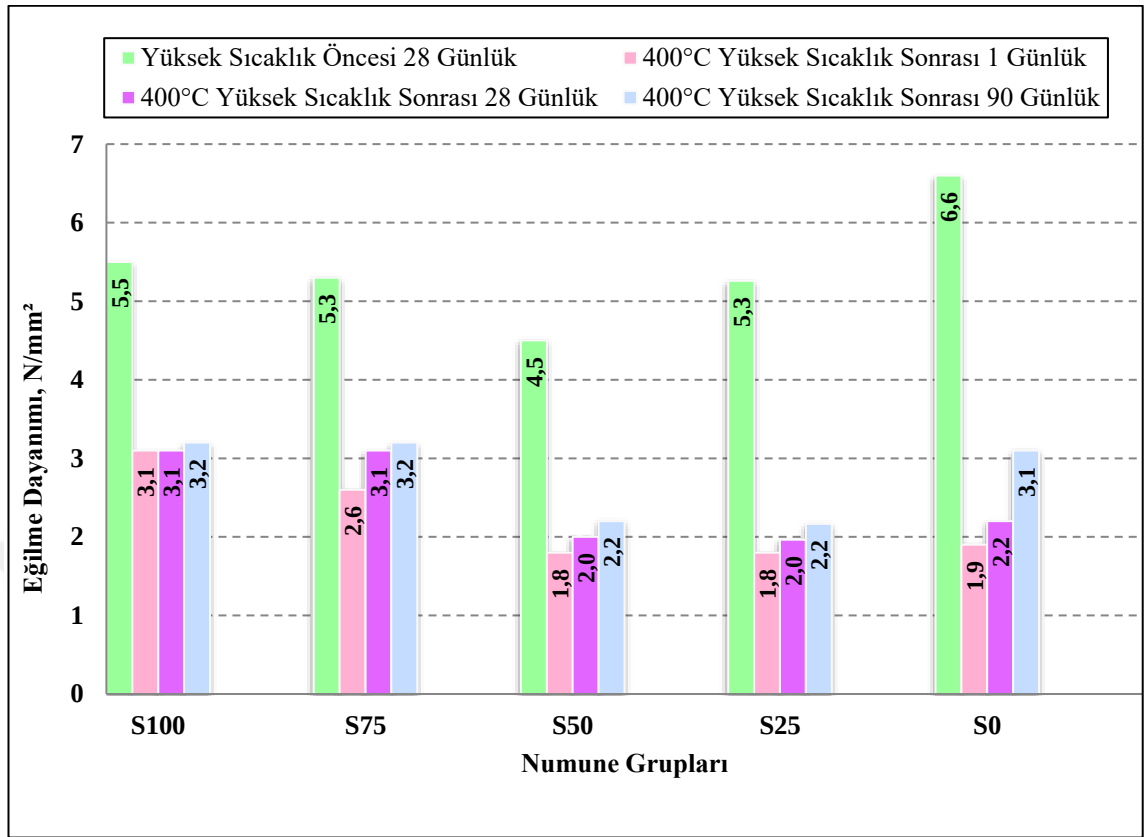
Yüksek fırın cürufu ve uçucu kül içeren alkali ile aktive edilen harç numunelerinin en yüksek basınç dayanımları 90 günde gözlenmiştir. En düşük dayanımlar ise 1 günlük hemen deneye tabi tutulan numunelerde görülmüştür. 90 günlük hava kürü etkisi basınç dayanıma olumlu yönde katkı sağlamıştır. S100/P1,5-S75/P1,5-S50/P1,5-S25/P1,5 ve

S0/P1,5 harç numunelerinin 1 ve 90 günlük basınç dayanım değerleri sırasıyla 72,4MPa- 76,2 MPa, 69,1MPa-75,0 MPa, 56,7MPa- 61,2 MPa, 46,8MPa- 52,1 MPa ve 38,0 MPa - 51,4 MPa arasında elde edilmiştir. Harçların basınç dayanımları 1 günden 90 güne %5 ile %35 oranları arasında artış göstermiştir. Harç numunelerinin basınç dayanımları göz önüne alındığında %1,5 oranında polipropilen lif takviyesinin %1 oranında polipropilen lif içeren harçlara göre 1, 7, 28, 56 ve 90 günlük basınç dayanım sonuçlarında kayda değer artışa yol açmadığı görülmektedir. Ayrıca uçucu kül ikame oranı arttıkça lifsiz harçlarda ve %0,5 ile %1,0 oranında lif içeren harçlarda olduğu gibi basınç dayanım değerlerinde S100/P1,5 grubu numunelerden, S0/P1,5 grubu numunelere doğru oransal bir azalış görülmüştür.

Alkali ile aktive edilmiş cüruf ve uçucu kül içeren harçların basınç dayanımları genel olarak %0,5, %1,0 ve %1,5 lif ilavesinde artış göstermiştir. Ancak %1,0 ve %1,5 lif ilavesinden sonra dayanıma artışı çok düşük veya aynı değerlerde kalmıştır. Bu durum göz önüne alındığında basınç dayanımı için %0,5 ağırlıkça lif ilavesi uygun oran olarak ortaya çıkmıştır. Benzer şekilde Chindaprasirt ve ark. (2021) [46] çalışmalarında %0,5 polipropilen lif ilavesinde en yüksek dayanıma ulaşmışlar ve %1 lif ilavesi ile dayanım değerinde küçük de olsa azalışlar görülmüştür. Ayrıca Amran ve ark. (2022) [63] alkali ile aktive edilmiş lifli betonların literatür taraması şeklinde hazırladıkları çalışmada polipropilen lif ilavesinin dayanımı önce arttırdığını daha sonra dayanıma olumlu katkı sunamayıp azaltmaya başladığını ve uygun oranında %0,4 olduğunu ifade etmişlerdir.

3.7.Yüksek Sıcaklık Sonrası Eğilme Dayanımı Deney Sonuçları

Yapılan çalışma kapsamında eğilme ve basınç dayanımı deneyleri birlikte değerlendirilerek polipropilen lif oranı ağırlıkça %0,5 olarak belirlenmiştir. Ardından lif takviyesiz kontrol grubu ve %0,5 polipropilen lif içeren alkali ile aktive edilmiş numuneler 400°C-600°C ve 800°C yüksek sıcaklığa maruz bırakılmış ve dayanım değişimleri 1, 28 ve 90 gün için gözlemlenmiştir. Şekil 28'de 400°C yüksek sıcaklığa maruz bırakılan polipropilen lif takviyesiz numunelerin yüksek sıcaklık sonrası 1, 28 ve 90 gün havada bekledikten sonra eğilme dayanım değerleri 28 günlük yüksek sıcaklığa maruz kalmamış numunelerle kıyaslanarak verilmiştir.



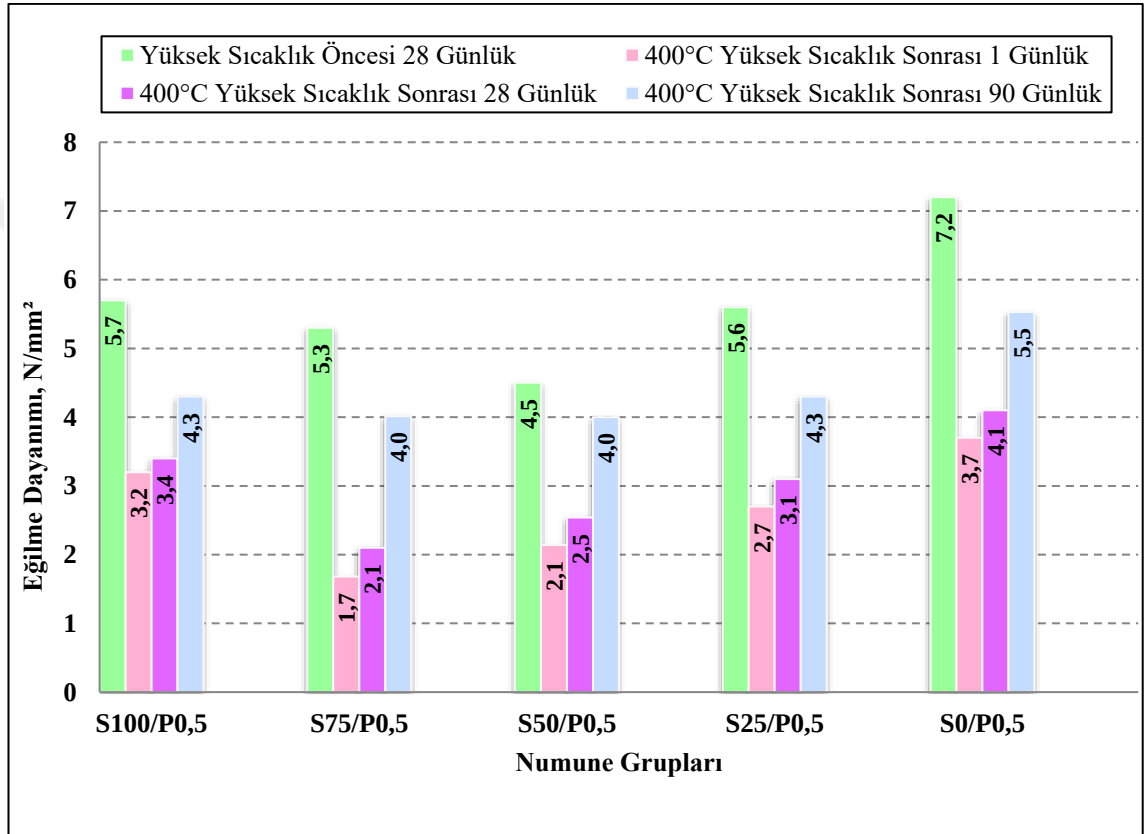
Şekil 28.400°C yüksek sıcaklık sonrası polipropilen lif takviyesiz harçların eğilme dayanımları

Alkali ile aktive edilmiş lifsiz harçların 400°C yüksek sıcaklık sonrası 1, 28 ve 90 günlük eğilme dayanımları göz önüne alındığında yüksek sıcaklık sonrası hava kürünün etkisi çok küçük değerlerde kalmıştır. Numunelerin hava kürü sonrasında eğilme dayanım değerleri artma eğilimi gösterse de birbirine yakın elde edilmiştir. Genel olarak dayanım kayıpları yüksek sıcaklık uygulandıktan hemen sonra oluşmuştur. S100 grubu numunelerin yüksek sıcaklık öncesine göre 400°C yüksek sıcaklık sonrası 1 günlük eğilme dayanımları %44 azalma göstermiştir. Yüksek sıcaklık öncesine göre 90 günlük bekleme süresinde bu oran %42'dir. Eğilme dayanımında oluşan 0,1 MPa'lık değişim çok küçük bir değer olduğu için ilave hava kürü 400°C'de S100 grubu eğilme dayanımında değişime yol açmamıştır.

S0 grubu numunelerin yüksek sıcaklık öncesine göre 400°C yüksek sıcaklık sonrası 1 günlük eğilme dayanımları %71 azalma göstermiştir. Yüksek sıcaklık öncesine göre 90 günlük bekleme süresinde bu oran %53'dür. Uçucu kül içeren S0 grubunda bekleme süresi bir miktar dayanım artışına yol açarak 1 günden 90 güne 1,9 MPa'dan 3,1 MPa'a

ulaşmıştır. İlave hava kürü cürufu harçlara göre uçucu kül içeren harçlara olumlu etki etmiştir.

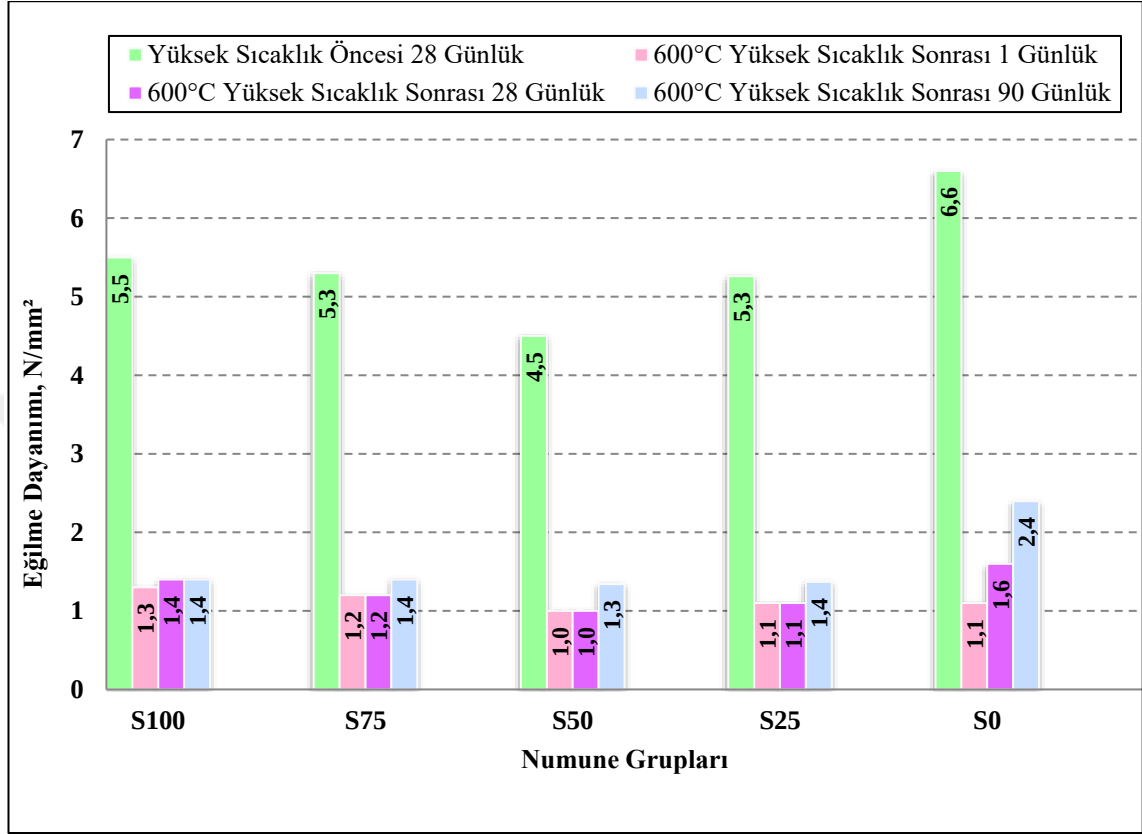
400°C yüksek sıcaklığa maruz bırakılan bağlayıcının %0,5'i oranında polipropilen lif takviyeli harç numunelerinin 1, 28 ve 90 günlük eğilme dayanım değerleri Şekil 29'da verilmiştir.



Şekil 29.400°C yüksek sıcaklık sonrası %0,5 oranında polipropilen lif takviyeli harçların eğilme dayanımları

Alkali ile aktive edilmiş %0,5 lif içeren harçların 400°C yüksek sıcaklık sonrası 1, 28 ve 90 günlük eğilme dayanımları göz önüne alındığında yüksek sıcaklık sonrası hava kürünün tüm numune gruplarında artma eğilimi göstermiştir. Ancak 90 gün bekleme süresinde 28 güne göre artış oranı daha fazla olmuştur. Örneğin S50/P0,5 numuneleri 1 günden 28 güne %19 artış gösterirken 28 günden 90 güne %60 oranında artış oluşmuştur. Bu durum bekleme süresinin artışının eğilme dayanımını bir miktar iyileştirdiğini göstermektedir. Dayanım kaybının polipropilen lif takviyesiz harç numuneleri ile karşılaştırıldığında daha az olması %0,5 polipropilen lif takviyesinin 400°C yüksek sıcaklık sonrası olumlu etkisini göstermektedir.

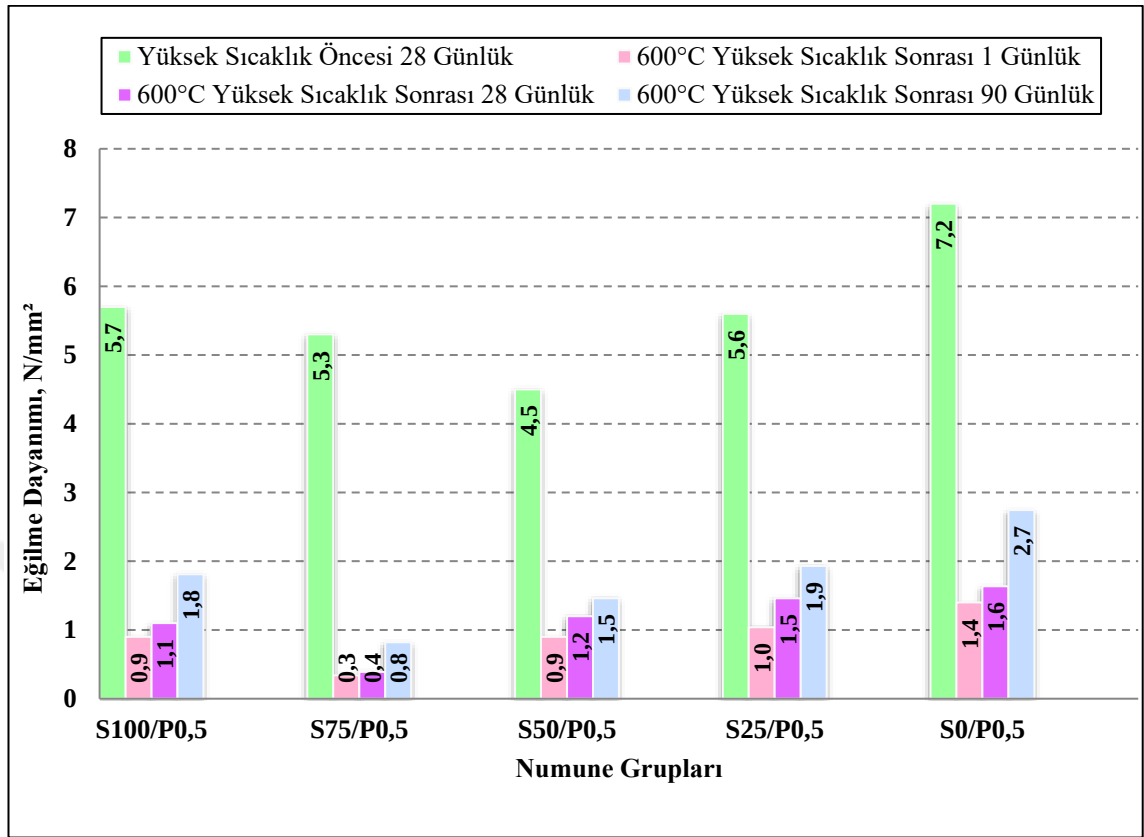
Şekil 30'da 600°C yüksek sıcaklığa maruz bırakılan polipropilen lif takviyesiz numunelerin 1, 28 ve 90 günlük eğilme dayanım değerleri verilmiştir.



Şekil 30.600°C yüksek sıcaklık sonrası polipropilen lif takviyesiz harçların eğilme dayanımları

Alkali ile aktive edilmiş lifsiz harçların 600°C yüksek sıcaklık sonrası 1, 28 ve 90 günlük eğilme dayanımları göz önüne alındığında yüksek sıcaklık sonrası önemli dayanım kayıpları oluşmuştur. Numunelerde yüksek sıcaklık sonrası hava kürünün eğilme dayanımına olumlu etkisi yalnızca S0 grubu için belirgindir. Yüksek sıcaklık sonrası 1 günlük eğilme dayanımı 1,1 MPa olan S0 grubu numuneleri 90 gün sonunda 2,4 MPa'ya ulaşmıştır. Ancak S100, S75, S50 ve S25 grubunda ilave hava kürü eğilme dayanımına önemli derecede etki etmemiştir.

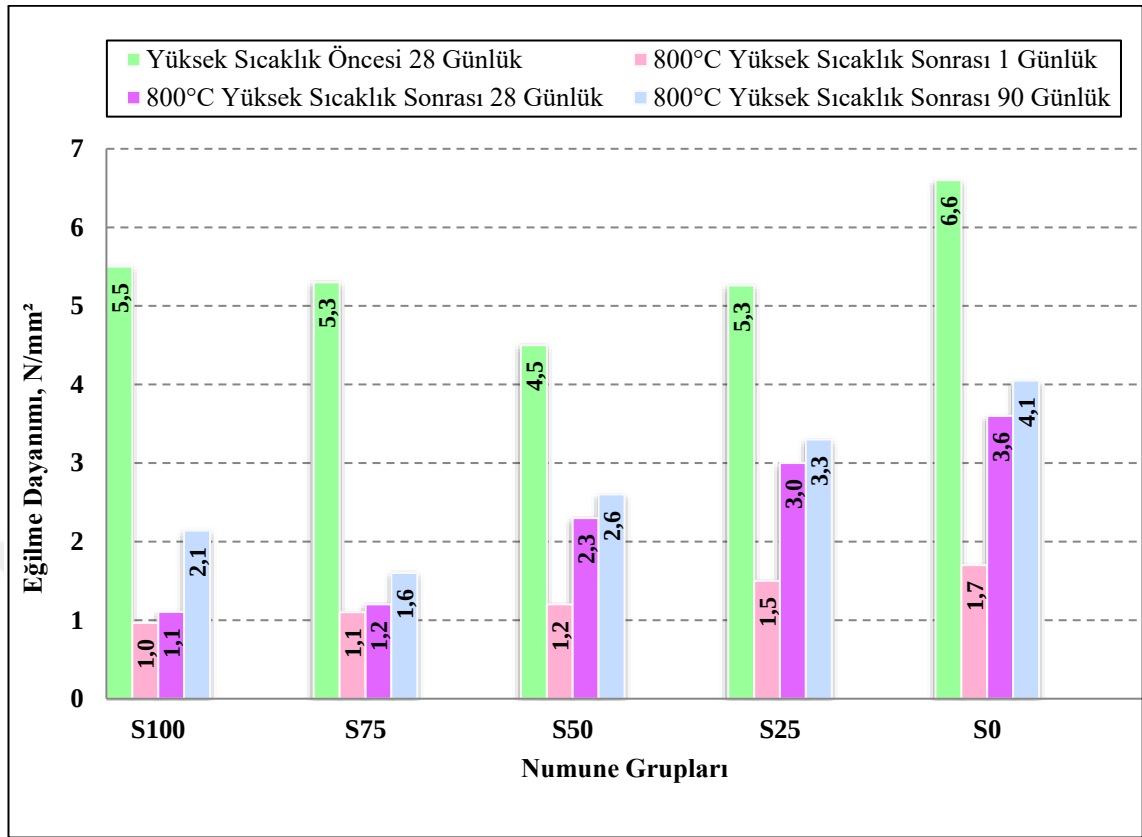
600°C yüksek sıcaklığa maruz bırakılan bağlayıcının %0,5'i oranında polipropilen lif takviyeli alkali ile aktive edilmiş harç numunelerinin 1, 28 ve 90 günlük eğilme dayanım değerleri Şekil 31'de verilmiştir.



Şekil 31.600°C yüksek sıcaklık sonrası %0,5 oranında polipropilen lif takviyeli harçların eğilme dayanımları

Alkali ile aktive edilmiş lifli harçların 600°C yüksek sıcaklık sonrası eğilme dayanımları polipropilen lifin erimesinin etkisi ile önemli oranda azalmıştır (Lif yanma sıcaklığı 593°C). Genel olarak 90 günlük yüksek sıcaklık sonrası bekleme süresi bir artış oluştursa da 1 günden 28 güne artış oranı daha düşüktür. S100/P0,5 ve S0/P0,5 numuneleri 1 günden 90 güne beklemeleri yaklaşık aynı orandan dayanım artışı oluşturmuştur. Ancak dayanım değerleri göz önüne alındığında uçucu kül içeren S0/P0,5 numuneleri daha yüksektir. Bu durumun başlıca sebebi yüksek sıcaklık öncesi eğilme dayanımları %100 uçucu kül ile 7,2 MPa iken %100 cüruf ile üretilen harçlarda 5,7 MPa olmasıdır.

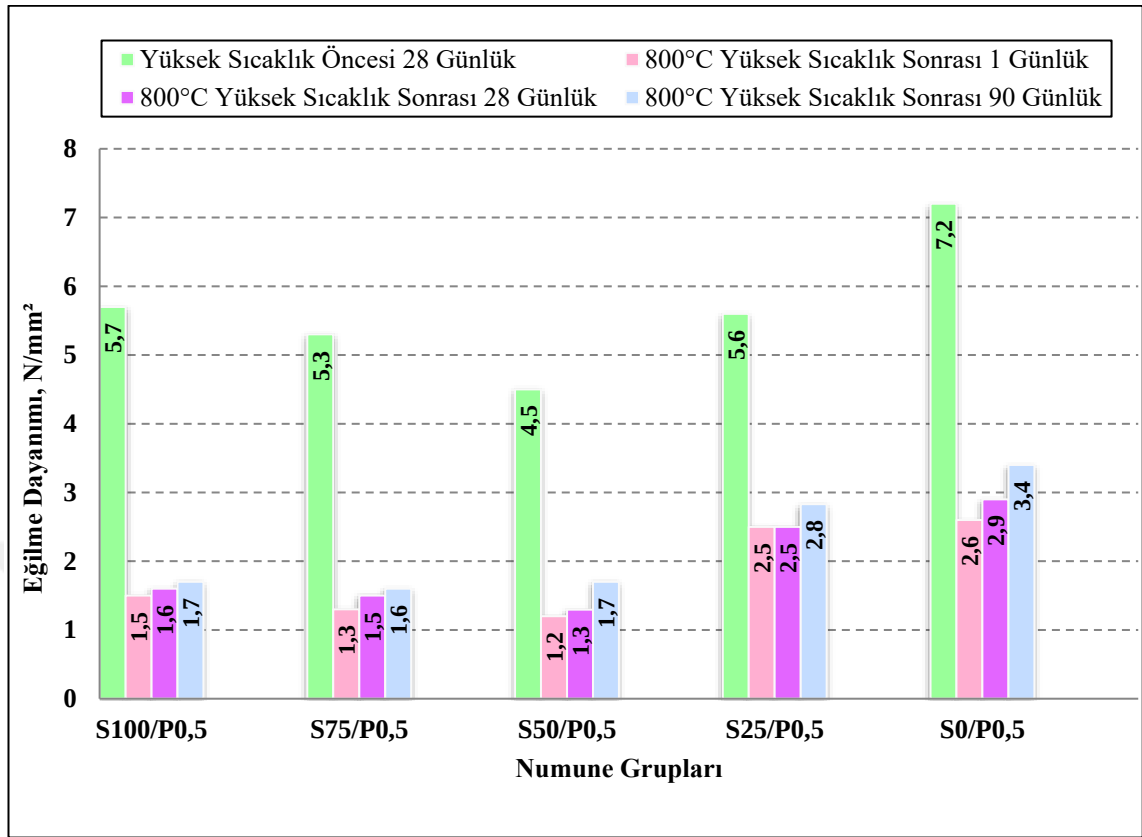
800°C yüksek sıcaklığa maruz bırakılan polipropilen lif takviyesiz harç numunelerinin 1, 28 ve 90 günlük eğilme dayanım değerleri Şekil 32'de verilmiştir.



Şekil 32.800°C yüksek sıcaklık sonrası polipropilen lif takviyesiz harçların eğilme dayanımları

Alkali ile aktive edilmiş lifsiz harçların 800°C yüksek sıcaklık sonrası eğilme dayanımları 1 ile 28 ve 90 günlük eğilme dayanımları göz önüne alındığında özellikle S50, S25 ve S0 grubu harçlarda uzun süre bekleme değerlerde önemli artış yol açmıştır. Örneğin S0 grubu yüksek sıcaklık sonrası hava kürü 1 gün iken eğilme dayanımı 1,7 MPa'dır. Kür süresi 28 ve 90 güne çıktığında sırasıyla 3,6 MPa ve 4,1 MPa'a ulaşmıştır. Tamamen cüruf ile üretilen S100 grubunda ise dayanım 1 günde 1,0 MPa iken 28 günde 1,1 MPa'a, 90 günde ise 2,1 MPa'a ulaşmıştır. Uçucu kül içeren numuneler yüksek sıcaklık sonrası bekleme süresi sebebi ile daha olumlu etki göstermiştir. Özellikle 28 gün bekleme süresinde kazanabileceği dayanım değerine ulaşmış ve 90 günde önemli derece artış oluşmamıştır.

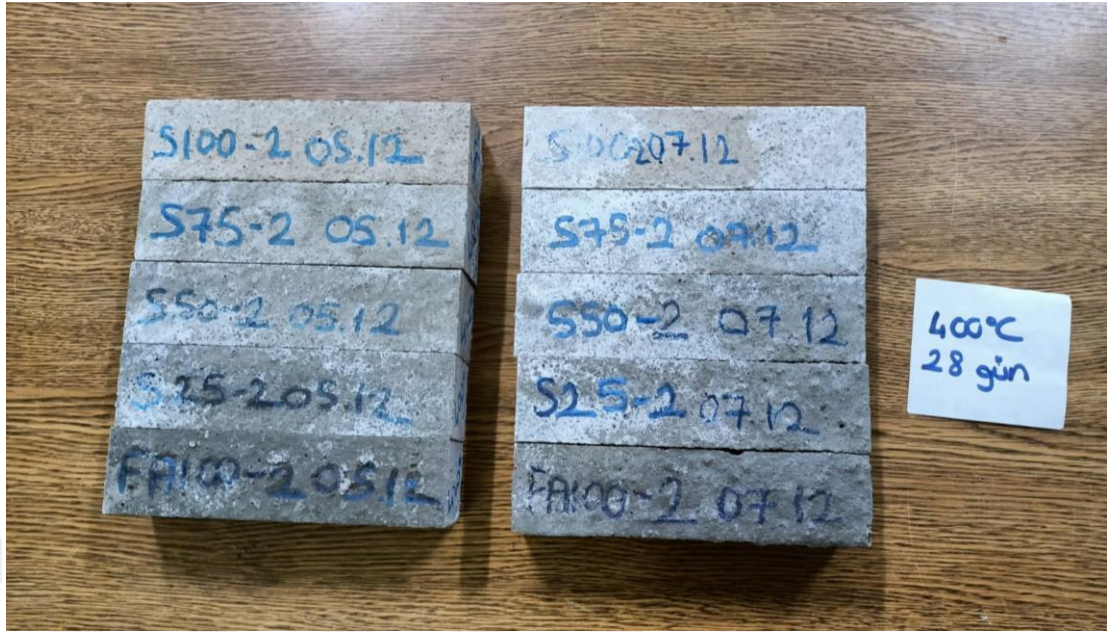
Şekil 33'te 800°C yüksek sıcaklığa maruz bırakılan bağlayıcının %0,5'i oranında polipropilen lif takviyeli harç numunelerinin 1, 28 ve 90 günlük eğilme dayanım değerleri verilmiştir.



Şekil 33.800°C yüksek sıcaklık sonrası %0,5 oranında polipropilen lif takviyeli harçların eğilme dayanımları

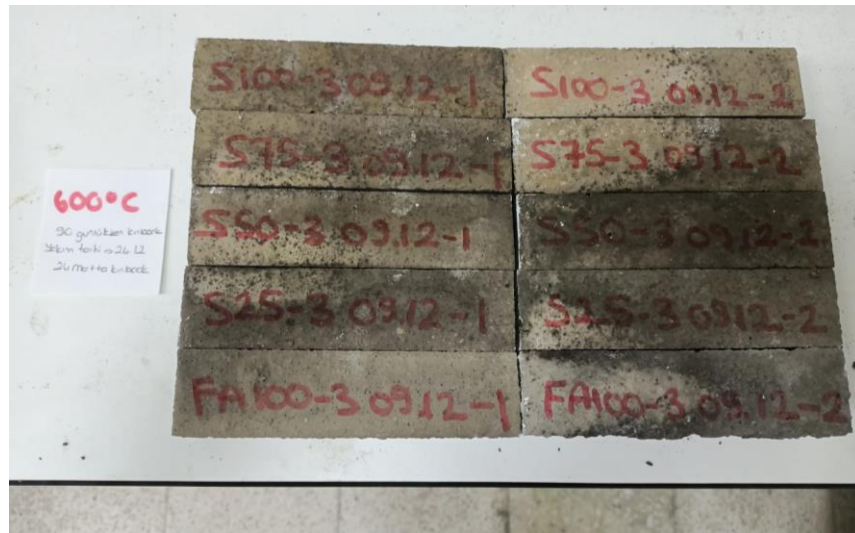
Numunelerde yüksek sıcaklık sonrası hava kürünün eğilme dayanımına etkisi dayanımda çok küçük artışlar şeklinde görülmektedir. Lifsiz numunelerle kıyaslandığında %0,5 polipropilen lif içeren harç numuneleri tüm harç gruplarında benzer davranış sergilemiştir. Numunelerin yüksek sıcaklık öncesi ve 800°C yüksek sıcaklık sonrası 1 günlük eğilme dayanımları karşılaştırıldığında numunelerde genel olarak hemen eğilme dayanım kaybı oluşturmuş ve bu değerler lifsiz harçlara göre daha yüksektir. Örneğin S100, S75, S50, S25 ve S0 grubu lifsiz harçların yüksek sıcaklık sonrası 1 günlük eğilme dayanımı sırasıyla 1,0 MPa, 1,1 MPa, 1,2 MPa, 1,5 MPa ve 1,7 MPa iken %0,5 lif içeren harçlarda bu değerler sırasıyla 1,5 MPa, 1,3 MPa, 1,2 MPa, 2,5 MPa, ve 2,6 MPa'dır. Genel olarak lif etkisi yüksek sıcaklık öncesi dayanımı arttırdığı için 800°C sonrası da dayanımlarda düşüşler lifsizlere göre düşük olmuştur..

Şekil 34'te 400°C yüksek sıcaklığa maruz bırakılmış polipropilen lif takviyesiz numunelerin yüksek sıcaklık sonrası görünimleri gösterilmiştir. Numuneler şeklini korumuş, görsel olarak bozulmalar 800°C ile karşılaştırıldığında son derece azdır.



Şekil 34.400°C yüksek sıcaklık sonrası polipropilen lif takviyesiz numuneler

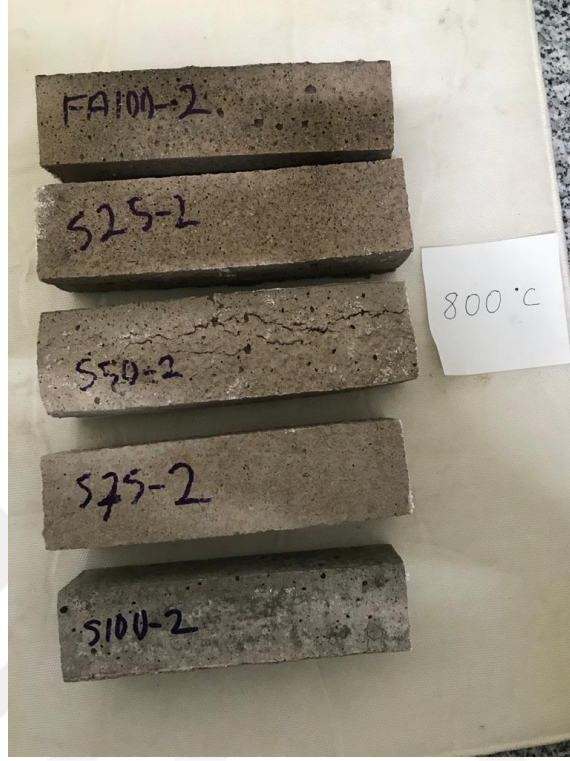
Şekil 35'te 600°C yüksek sıcaklığa maruz bırakılmış polipropilen lif takviyesiz numunelerin yüksek sıcaklık sonrası görünüşleri gösterilmiştir.600°C yüksek sıcaklığa maruz bırakılan numunelerin yüzeylerinde yüksek sıcaklık etkisi görülmeye ve numunelerin yüzeyleri kararmaya başlamıştır.



Şekil 35.600°C yüksek sıcaklık sonrası polipropilen lif takviyesiz numuneler

Şekil 36'da 800°C yüksek sıcaklığa maruz bırakılmış polipropilen lif takviyesiz numunelerin yüksek sıcaklık sonrası görünüşleri verilmiştir. Düşük eğilme dayanımı veren S50 grubunda numunede çatlaklar görülmektedir.800°C yüksek sıcaklığa maruz

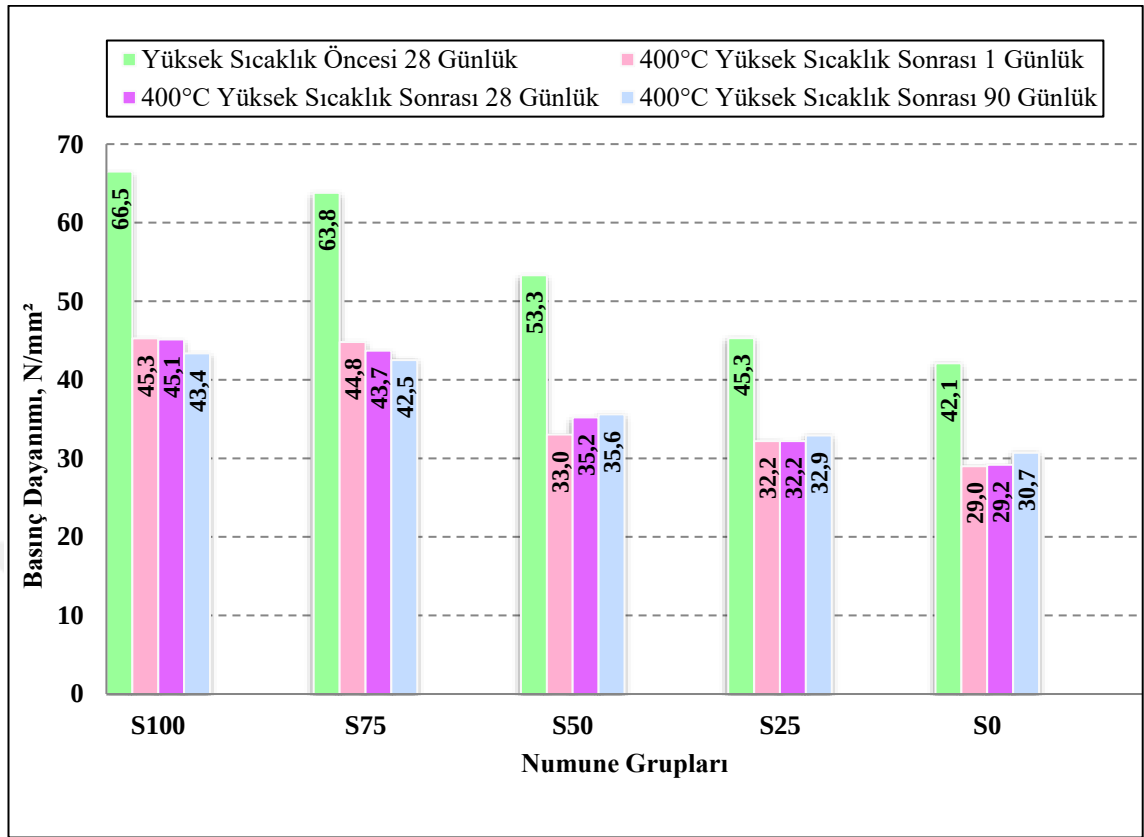
bırakılan numunelerde yüksek sıcaklığa bağılı olarak ciddi hacimsel deformasyonlar meydana gelmiştir.



Şekil 36.800°C yüksek sıcaklık sonrası polipropilen lif takviyesiz numuneler

3.8.Yüksek Sıcaklık Sonrası Basınç Dayanımı Deney Sonuçları

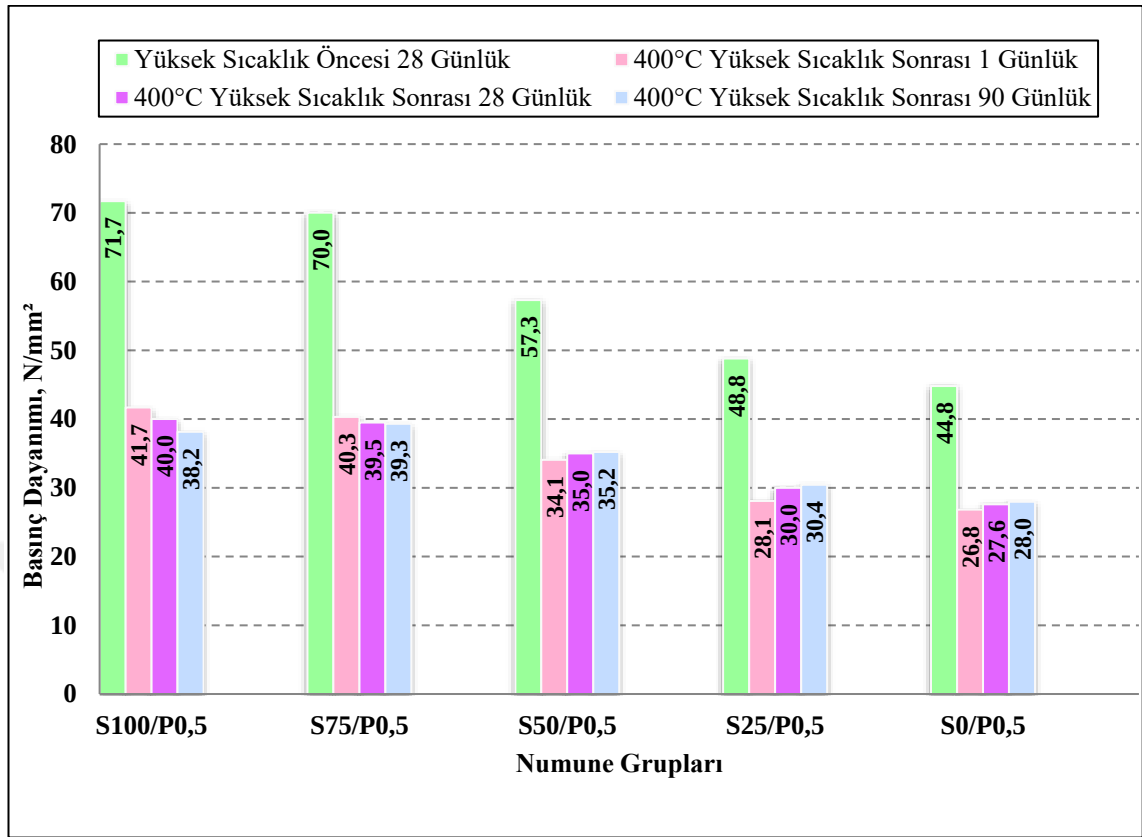
Deneyisel çalışmada lif takviyesiz kontrol grubu ve ağırlıkça %0,5 polipropilen lif içeren alkali ile aktive edilmiş numuneler 400°C, 600°C ve 800°C yüksek sıcaklığa maruz bırakılmış ve basınç dayanım değişimleri laboratuvar ortam sıcaklığında bekletilerek 1, 28 ve 90 gün için gözlemlenmiştir. Şekil 37'de 400°C yüksek sıcaklığa maruz bırakılan polipropilen lif takviyesiz numunelerin yüksek sıcaklık sonrası 1, 28 ve 90 gün havada bekledikten sonra basınç dayanım değerleri 28 günlük yüksek sıcaklığa maruz kalmamış numunelerle kıyaslanarak verilmiştir.



Şekil 37.400°C yüksek sıcaklık sonrası polipropilen lif takviyesiz harçların basınç dayanımları

S100 ve S75 harç numunelerinin 400°C yüksek sıcaklık sonrası 1 günlük dayanımlarından 90 günlük dayanımlara geçiş yapıldığında küçük düşüşler görülmektedir. Ancak S50, S25 ve S0 grubunda ise küçük artış görülebilmekte olsa da kayda değer bir artış olmadığı için 400°C sonrası bekleme süreleri genel olarak harç gruplarına olumlu veya olumsuz etki etmemiştir. S100 ve S0 grubu numunelerin yüksek sıcaklık öncesi ve 400°C yüksek sıcaklık sonrası 90 günlük basınç dayanımları karşılaştırıldığında numunelerde sırasıyla %35 ve %27 oranları arasında basınç dayanım kaybı olduğu hesaplanmıştır. Bu durum cüruf ile üretilen harçların daha çok dayanım kaybı oluştursa da oransal olarak dayanım kayıplarının yakın olduğu söylenebilir.

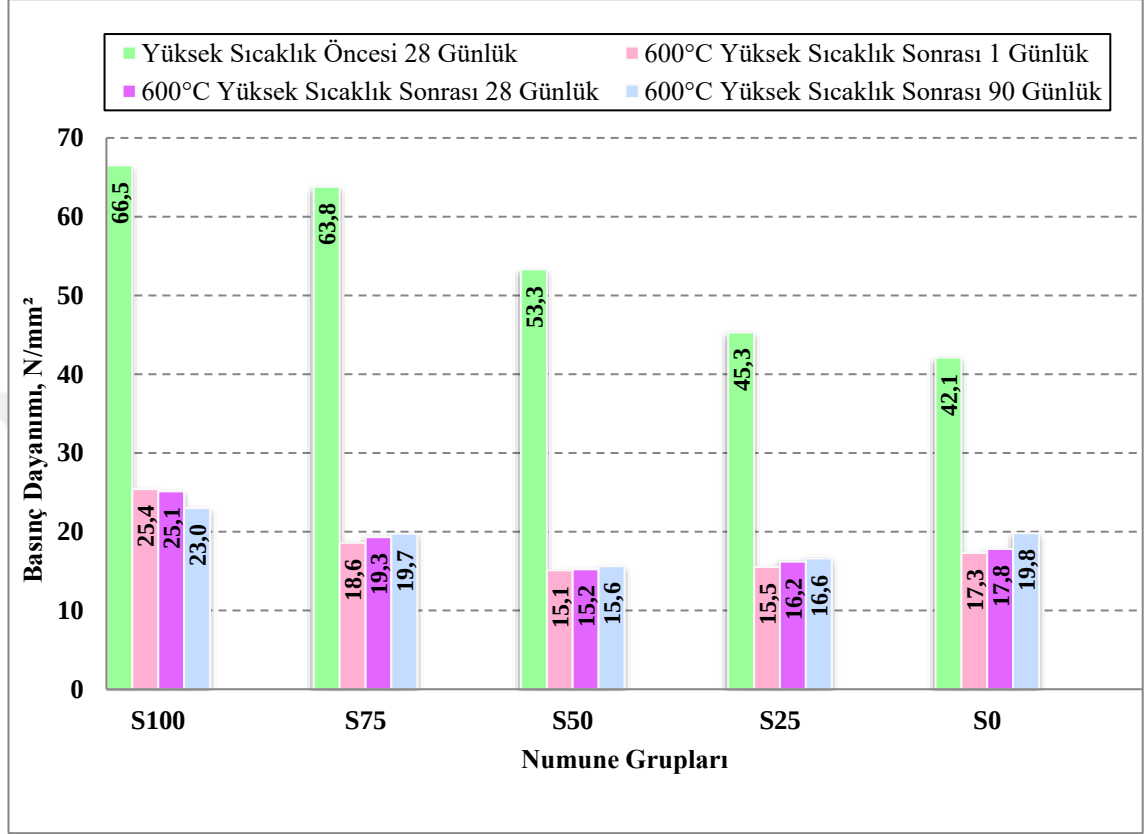
400°C yüksek sıcaklığa maruz bırakılan bağlayıcının %0,5'i oranında polipropilen lif takviyeli harç numunelerinin 1, 28 ve 90 günlük basınç dayanım değerleri Şekil 38'de verilmiştir.



Şekil 38.400°C yüksek sıcaklık sonrası %0,5 oranında polipropilen lif takviyeli harçların basınç dayanımları

Alkali ile aktive edilmiş %0,5 lif içeren harçların 400°C yüksek sıcaklık sonrası basınç dayanımları 1 ile 28 ve 90 günlük dayanımları göz önüne alındığında özellikle S50/P0,5, S25/P0,5 ve S0/P0,5 grubu harçlarda bir miktar artış oluşmuştur. S100/P0,5 ve S75/P0,5 harçlarında ise uzun süre bekleme değerlerde bir miktar düşüşe yol açmıştır. Ancak bu artış ve düşüşler yüksek değerlerde değildir. Genel olarak basınç dayanımında yüksek sıcaklık sonrası kayıp hemen oluşmuş ve bekleme süreleri önemli derecede değerlere etki etmemiştir. Lifsiz harçlarla kıyaslandığında ise yüksek sıcaklık öncesi basınç dayanımları daha yüksek iken yüksek sıcaklık sonrası %0,5 lif içeriğinde daha düşük dayanım değerleri elde edilmiştir. Bu durum lifin sıcaklık etkisi ile basınç dayanıma 400°C’de olumsuz etki ettiğini gösterebilir. Örneğin, S100 grubu lifsiz 66,5 MPa’dan yüksek sıcaklık sonrası 90 gün sonunda 43,4 MPa’a düşerken S100/P0,5 harcı 71,7 MPa’dan 38,2 MPa’a düşmüştür. Bu durum uçucu kül ile üretilen diğer tüm grupta yer alan harçlar için de benzerdir.

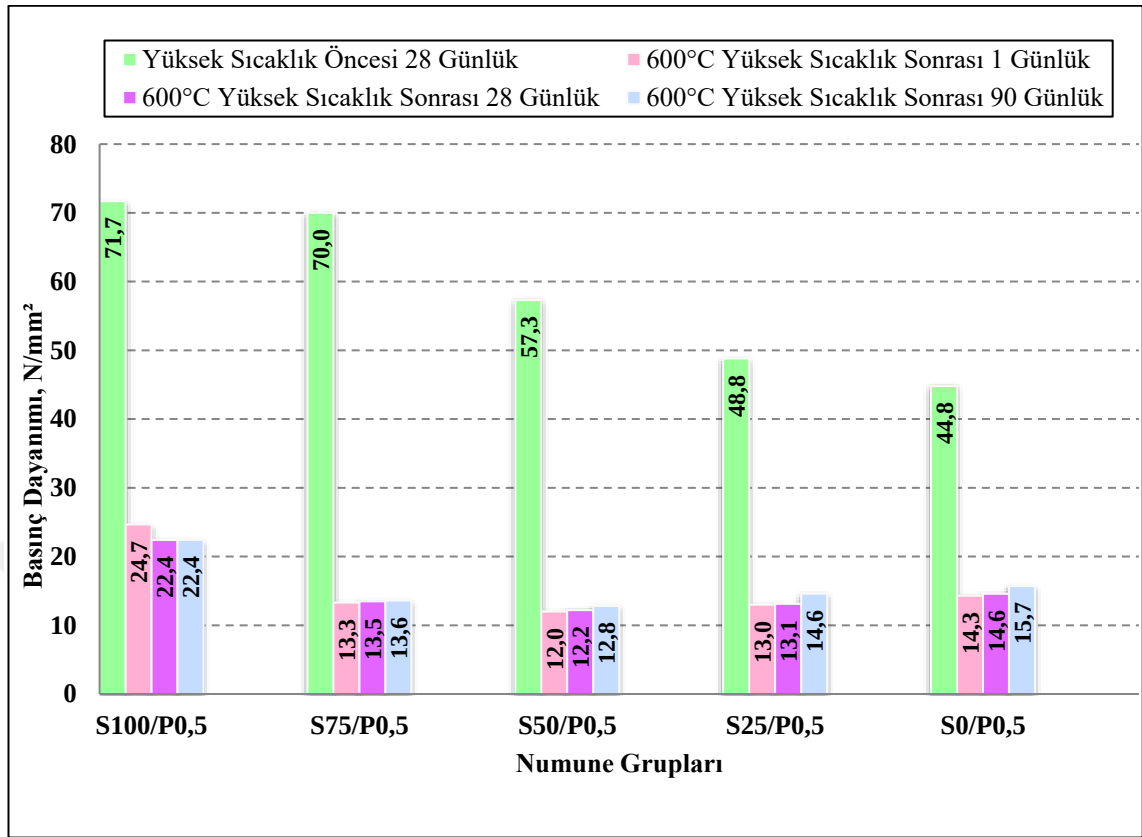
Şekil 39'da 600°C yüksek sıcaklığa maruz bırakılan polipropilen lif takviyesiz numunelerin 1, 28 ve 90 günlük basınç dayanım değerleri verilmiştir.



Şekil 39.600°C yüksek sıcaklık sonrası polipropilen lif takviyesiz harçların basınç dayanımları

600°C yüksek sıcaklığa maruz bırakılan lifsiz numunelerde yüksek sıcaklık sonrası 28 ve 90 günlük hava kürünün basınç dayanımına kayda değer bir etkisi olmamıştır. Harç gruplarında dayanım değişimi 400°C'de oluşan basınç dayanımı değişimine yakındır. Yüksek sıcaklık sonrası hemen dayanım kaybı oluşmuş ve bekleme süreleri küçük artış ve azalışlara yol açsa da önemli oranda bir değer farklılığı oluşturmamıştır.

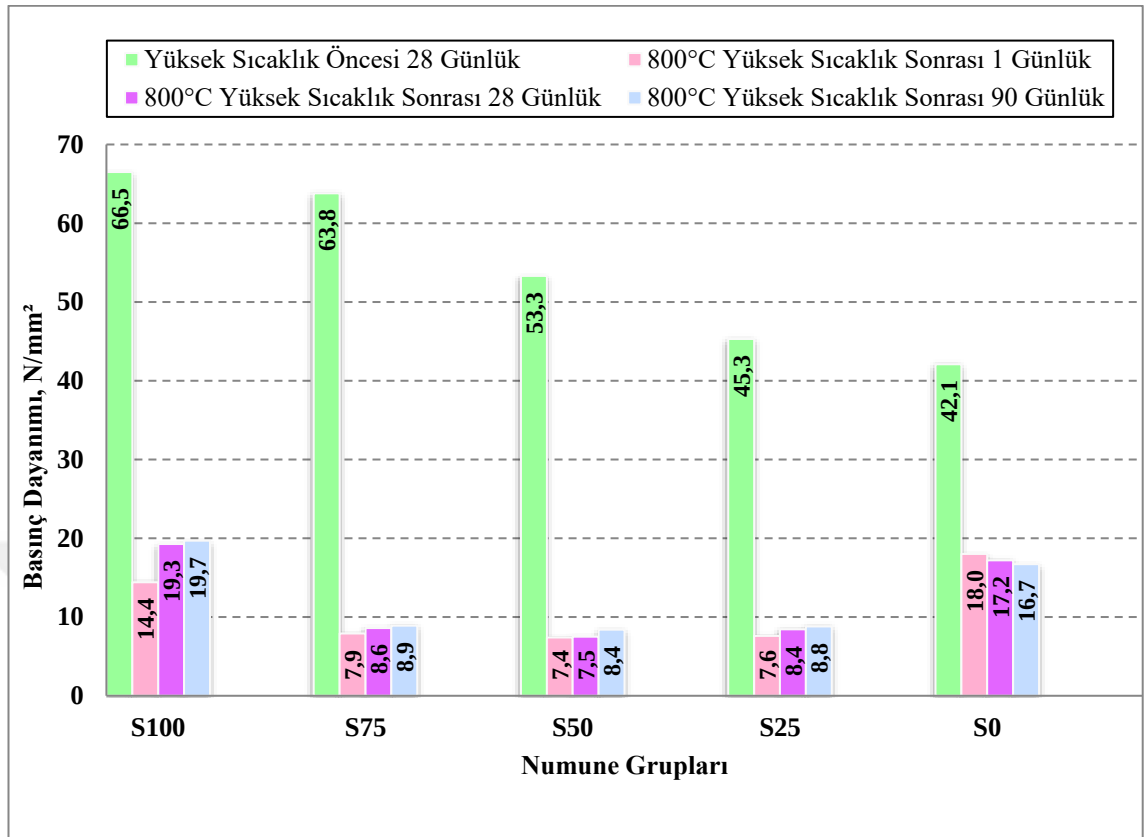
600°C yüksek sıcaklığa maruz bırakılan bağlayıcının %0,5'i oranında polipropilen lif takviyeli harç numunelerinin 1, 28 ve 90 günlük basınç dayanım değerleri Şekil 40'da verilmiştir.



Şekil 40.600°C yüksek sıcaklık sonrası %0,5 oranında polipropilen lif takviyeli harçların basınç dayanımları

600°C yüksek sıcaklığa maruz bırakılan %0,5 lif içeren numunelerde yüksek sıcaklık sonrası havada bekleme süresi basınç dayanımına kayda değer bir etkisi olmamıştır. Ancak lifli harçlarda uçucu kül ikamesi ile birlikte dayanımlar lifsiz harçlara göre bir miktar daha düşük seviyededir. S75/P0,5-S50/P0,5-S25/P0,5 ve S0/P0,5 grubu harçlar, lifsiz S75, S50, S25 ve S0 grubu ile kıyaslandığında eğerlerde düşüş görülmektedir. Örneğin; S50 grubu lifsiz 53,3 MPa'dan 90 gün sonunda 15,6 MPa'a düşerken lifli S50/P0,5 harcında 57,3 MPa'dan 12,8 MPa'a düşmektedir. Yani 90 gün sonunda oluşan dayanım değerlerinde yüksek sıcaklık öncesi ile kıyasla S50/P0,5 harcında %78 iken S50 harcında %70 dayanım kaybı vardır. Lifli ve uçucu kül içeren harçlar 600°C sonrası daha fazla dayanım kaybına uğramıştır.

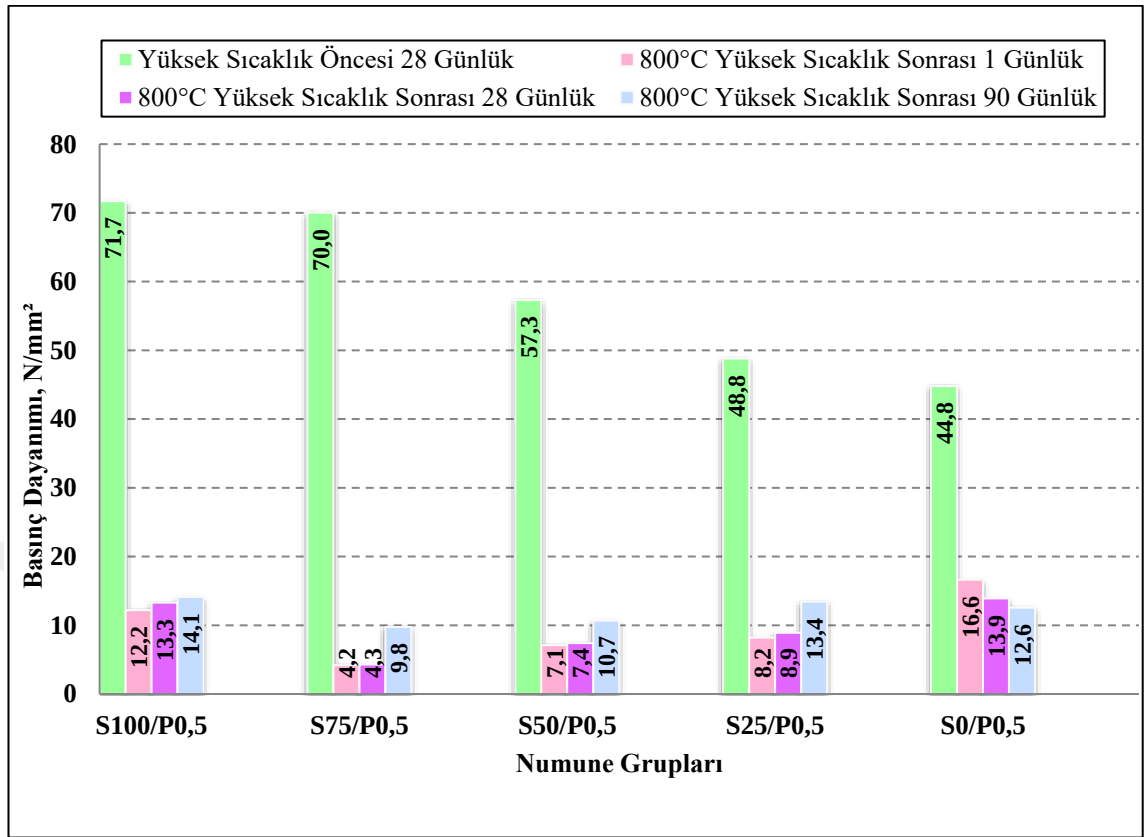
800°C yüksek sıcaklığa maruz bırakılan polipropilen lif takviyesiz harç numunelerinin 1, 28 ve 90 günlük basınç dayanım değerleri Şekil 41'de verilmiştir.



Şekil 41.800°C yüksek sıcaklık sonrası polipropilen lif takviyesiz harçların basınç dayanımları

S100-S75-S50-S25 ve S0 harç numunelerinin 1 ve 90 günlük basınç dayanım değerleri sırasıyla 14,4MPa- 19,7 MPa, 7,9MPa- 8,9 MPa, 7,4 MPa - 8,4 MPa, 7,6MPa- 8,8 MPa ve 18,0MPa- 16,7 MPa arasında elde edilmiştir. Basınç dayanım değerleri 800°C yüksek sıcaklık sonrası tek atık içeren (yalnızca cüruf içeren S100 veya yalnızca uçucu kül içeren S0) harçlarda daha olumlu değerler elde edilmiştir.Örneğin S100 grubu yüksek sıcaklık sonrası 90 günde 66,5 MPa'dan 19,7 MPa'a düşerken, S75 grubu 63,8 MPa'dan 8,9 MPa'a düşmüştür. Yani S100 %70 basınç dayanımı kaybı yaşarken S75 grubu %86 kayıp yaşamıştır. S0 grubu ise %60 dayanım kaybı yaşamıştır. Uçucu kül ve cüruf bireysel olarak kullanıldığında daha düşük dayanım kaybı oluşmuştur. Ancak S75, S50 ve S25 grubunda iki malzemenin birlikte kullanılması ile yüksek sıcaklık sonrası dayanım kaybı artışı daha fazla oluşmuştur.

Şekil 42'de 800°C yüksek sıcaklığa maruz bırakılan bağlayıcının %0,5'i oranında polipropilen lif takviyeli harç numunelerinin 1, 28 ve 90 günlük basınç dayanım değerleri verilmiştir.

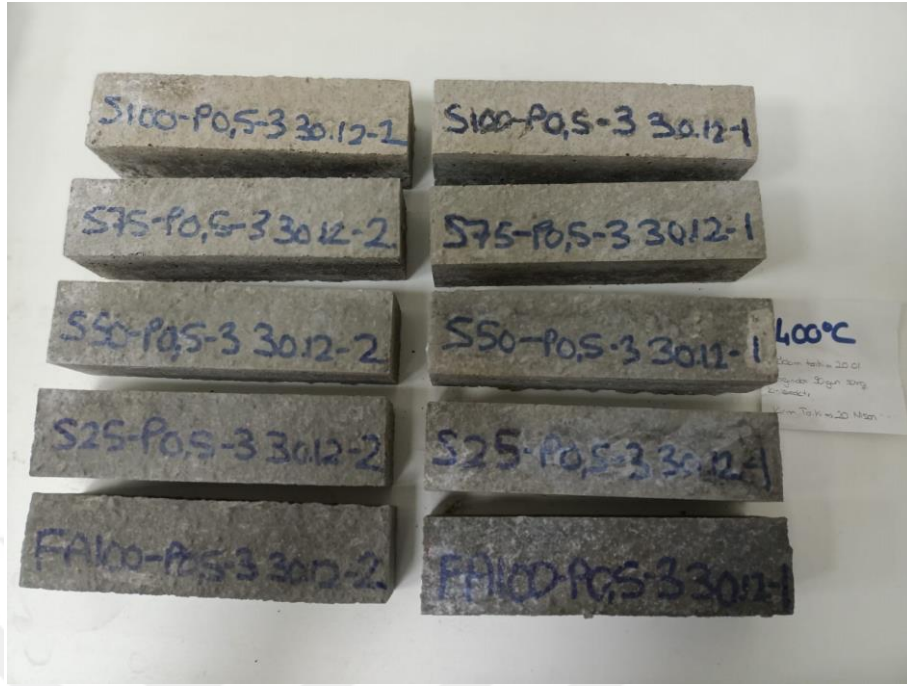


Şekil 42.800°C yüksek sıcaklık sonrası %0,5 oranında polipropilen lif takviyeli harçların basınç dayanımları

Alkali ile aktive edilmiş %0,5 polipropilen lif içeren harçların 800°C yüksek sıcaklık sonrası basınç dayanımları lifsiz harçlara göre tüm gruplarda düşüş göstermiştir. S0/P0,5 grubu harçlarda bekleme süresi sonucu dayanımda bir miktar düşüş görülmüştür. Buna rağmen diğer harçlarda 28 ve 90 gün bekleme süresi az da olsa dayanım artışı olarak görülmüştür.

Basınç değerlerinin yüksek sıcaklık ile azalması, artan sıcaklık nedeniyle artan gözenek ve çatlaktan kaynaklanmaktadır. Bu durum özellikle 800°C’de Şekil 45’te görselde olduğu gibi görülebilmektedir. Ek olarak, harcın hamur matrisi, yüksek sıcaklıkta CSH ve CASH gibi çeşitli ürünlerin kimyasal bozulmasına maruz kalmıştır. 600°C ve 800°C gibi yüksek sıcaklıklarda, bozulma termo-mekanik ve termo-kimyasal mekanizmalara bağlanabilir [64] [65]

Şekil 43’te 400°C yüksek sıcaklığa maruz bırakılmış %0,5 polipropilen lif takviyeli numunelerin yüksek sıcaklık sonrası görünüşleri gösterilmiştir. Şekil bozukluğu ve görünür çatlak bulunmamaktadır.



Şekil 43.400°C yüksek sıcaklık sonrası %0,5 polipropilen lif takviyeli numuneler

Şekil 44'de 600°C yüksek sıcaklığa maruz bırakılmış %0,5 polipropilen lif takviyeli numunelerin yüksek sıcaklık sonrası görünüşleri gösterilmiştir. 800°C ile kıyaslandığında çatlak oluşumu bariz görülmemekte ancak harçlarda renk değişimi oluşmaktadır.



Şekil 44.600°C yüksek sıcaklık sonrası %0,5 polipropilen lif takviyeli numuneler

Şekil 45'te 800°C yüksek sıcaklığa maruz bırakılmış %0,5 polipropilen lif takviyeli numunelerin yüksek sıcaklık sonrası görünümleri gösterilmiştir. Harçlarda görsel olarak görülebilen çatlaklar bu sıcaklıkta oluşmuştur. En çok hasar S50/P0,5 grubunda görülmektedir. Ancak S100/P0,5 ve S0/P0,5 grubu harçlar daha düzgün yüzey yapısına sahiptir.



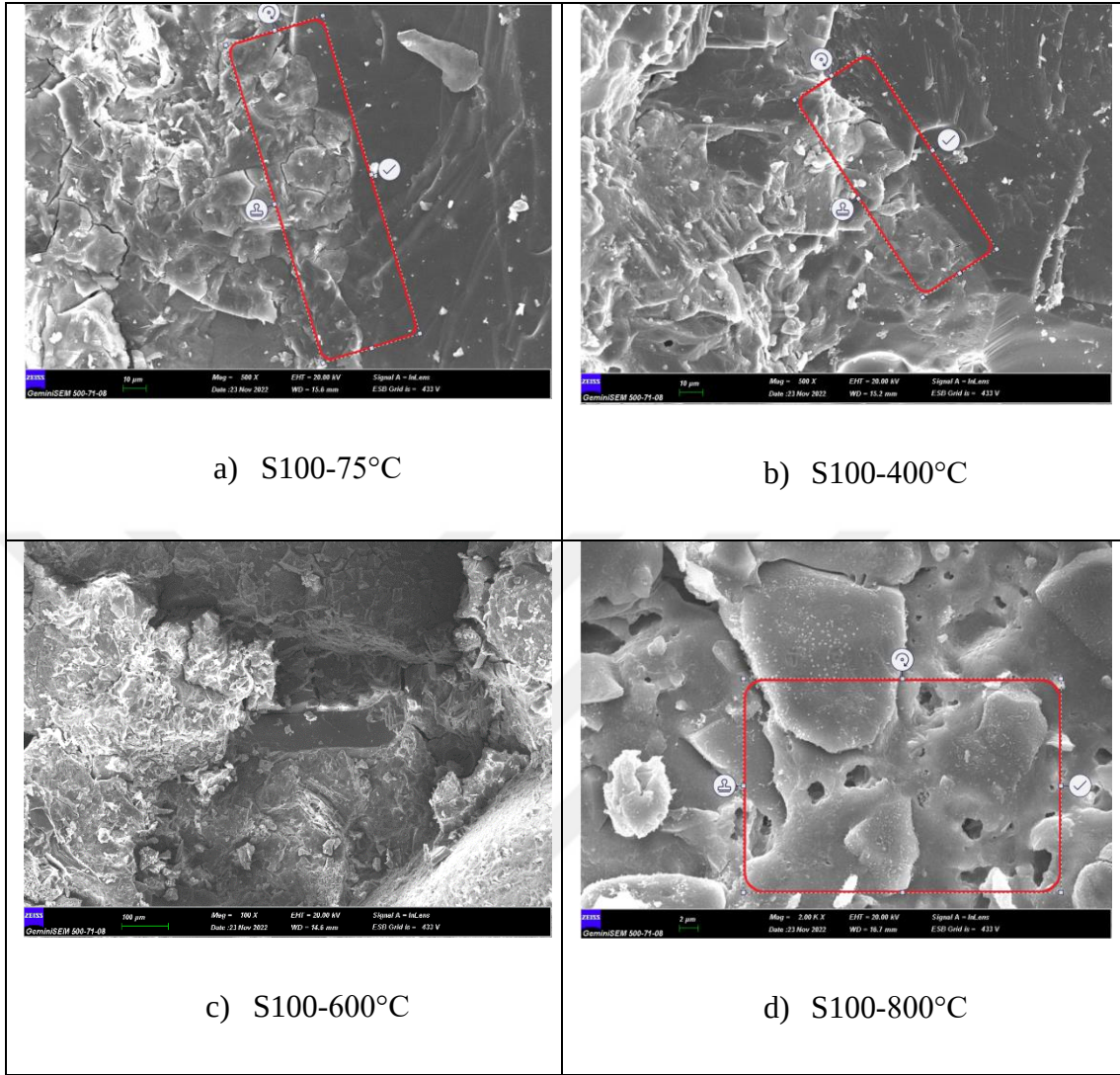
Şekil 45.800°C yüksek sıcaklık sonrası %0,5 polipropilen lif takviyeli numuneler

Alkali ile aktive edilmiş lifsiz ve %0,5 lif içeren harçların yüksek sıcaklık sonrası 1, 28 ve 90 günlük basınç dayanım değişimleri incelendiğinde, bekleme süreleri önemli dayanım değişimine neden olmamaktadır. Ancak alkali ile aktive edilen harçlar literatürde yer alan çimento içeren harçlar ile karşılaştırıldığında çimentolu harçlarda ilave hava kürü basınç dayanımında azalışa sebep olmaktadır. Bu durumu özetleyen çalışmada Karahan (2011) [50], 400°C sonrası hemen deneye tabi tutulan harç numunelerinin basınç dayanımı yaklaşık 54 MPa bulunurken, 7 gün ilave hava kürü sonucunda 43 MPa'a gerilediğini belirtmiştir. Bu azalış 600°C ve 800°C yüksek sıcaklık sonrası için de benzerdir. 600°C sonrası 32 MPa'dan 14 MPa'a düşerken, 800°C sonrası 17 MPa'dan 5 MPa'a düşmüştür. Fakat çalışmamızda alkali ile aktive edilen lifli ve lifsiz harçlarda 1, 28 ve 90 gün bekleme süreleri büyük oranda dayanım değişimine yol açmamıştır. Bu durum ilave hava kürü etkisinin basınç dayanım değişimi açısından alkali ile aktive edilen cüruf ve uçucu kül içeren (lifli ve lifsiz) harçların çimento içeren geleneksel harçlara göre daha olumlu davranış ortaya

koymuştur [66]. Ayrıca S100 grubundan S0 grubuna doğru hem lifsiz hem lifli harçlarda yüksek sıcaklık öncesi basınç dayanımında doğrusal azalma görülürken bu durum eğilme dayanımında aynı azalış davranışını sergilememektedir. Önceki çalışmalarda; Luga ve Atiş (2016) [67] alkali ile aktive edilmiş sodyum metasilikat kullanarak cüruf/uçucu kül içeren harçlarda basınç dayanımı değerleri cürufa kül ikame oranının artışı ile azalma göstermektedir. Buna karşın eğilme dayanımında artış görüldüğünü belirtmişlerdir. Çalışmamızda da basınç ve eğilme dayanımı farklı dayanım gelişimleri sergilemiştir.

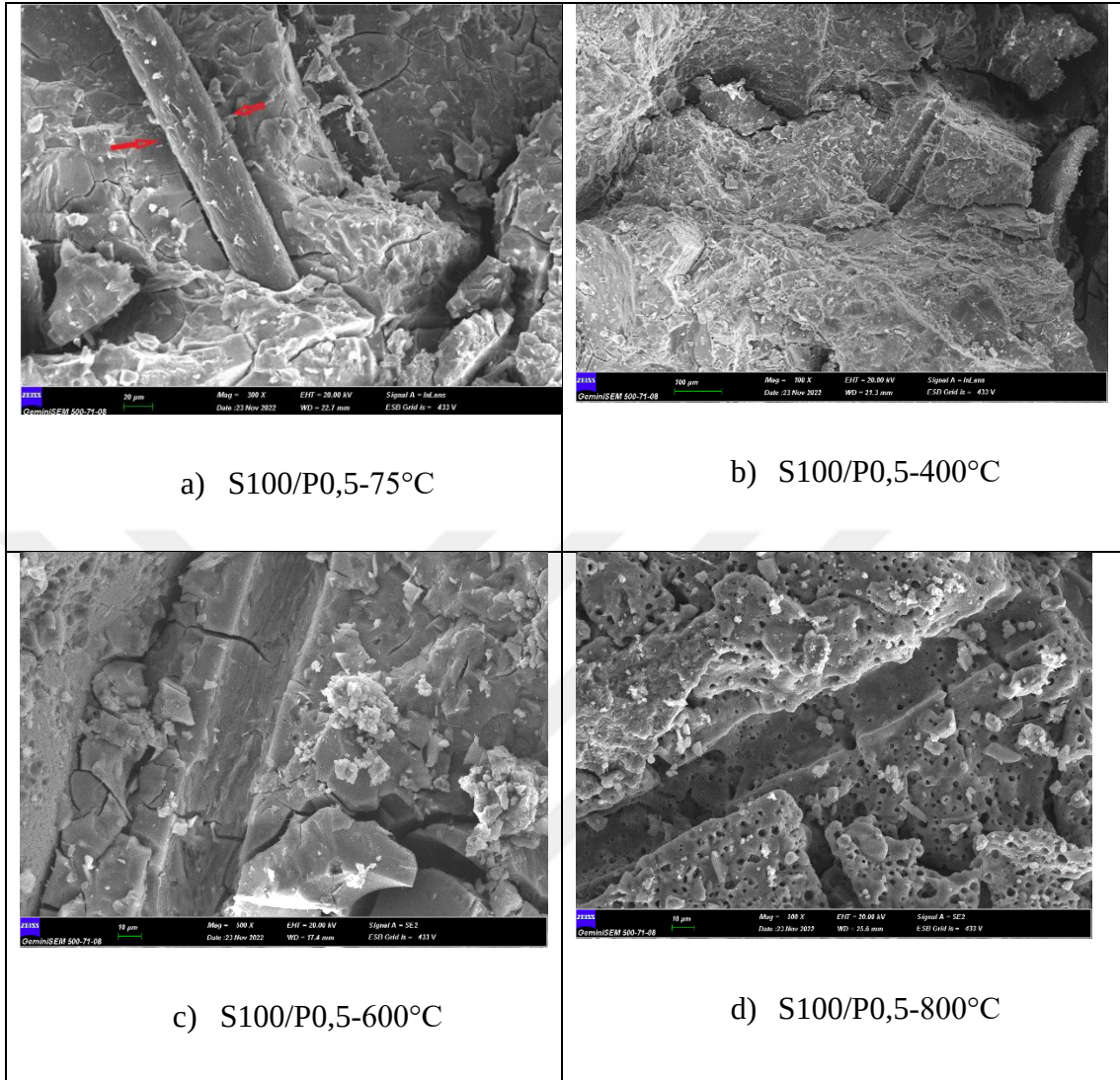
3.9. Mikroyapı İncelemeleri

Mikroyapı incelemeleri, en yüksek basınç dayanım veren %100 cüruf içeren (S100 ve S100/P0,5), hem %50 cüruf hem de %50 uçucu kül içeren (S50 ve S50/P0,5) ve en düşük basınç dayanımı değerine sahip %100 uçucu kül içeren (S0 ve S0/P0,5) numuneleri üzerinde gerçekleştirilmiştir. (Şekil 46-a) 75°C’de kür edilen numunelerde agrega-hamur arası sıkı bir yapı oluşmuş ve S100 grubu lifsiz harçlar içerisinde en yüksek dayanımı vermiştir. Yüksek sıcaklık artışı ile agrega-hamur ara yüzeyde düzensizlik başlamış ve özellikle S100-800°C’de boşluklar görülmektedir (Şekil 46-c ve d).



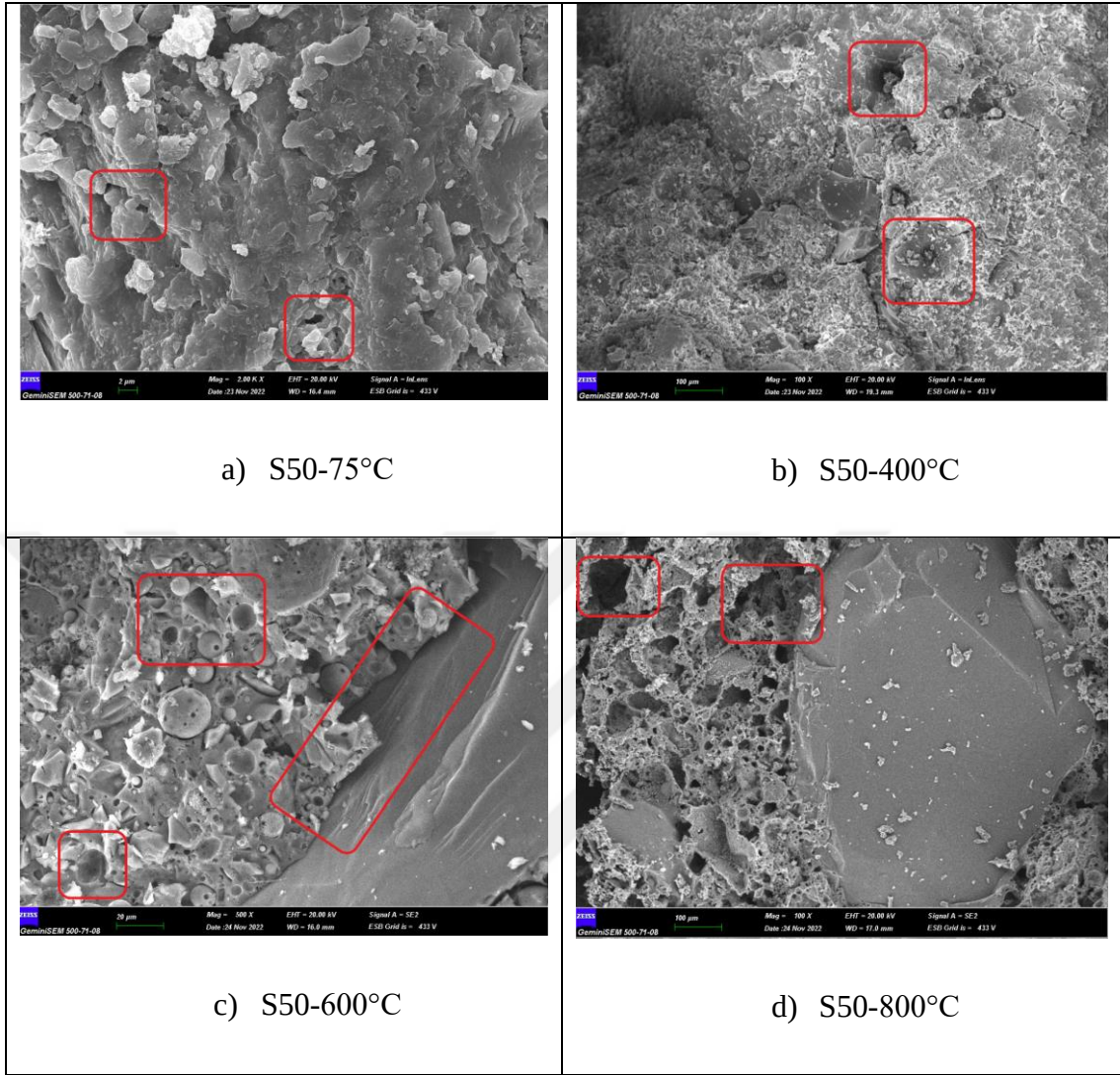
Şekil 46. S100 grubu lifsiz harçların yüksek sıcaklık öncesi ve sonrası SEM görüntüleri

Şekil 47’de lif ilavesi içyapıda belirgin bir şekilde görülmektedir. Yüksek sıcaklık öncesi (Şekil 47-a) lifler dağınık bir şekilde harç içerisinde görülebilmektedir. Sıcaklığın artması ile lifin erime sıcaklığı olan 162°C’nin üzerine çıkılan 400°C de lif boşlukları oluşmuştur (Şekil 47-b). Lif 593°C’de yanmaya başladığı için 600°C de (Şekil 47-c) lifin boşluk oluşturmaları sonucu dayanım düşüşleri görülmüştür. Ayrıca 800°C’de hem lif hem de hamur yapı boşlukları dayanımda oluşan düşüşleri arttırmıştır (Şekil 47-d)



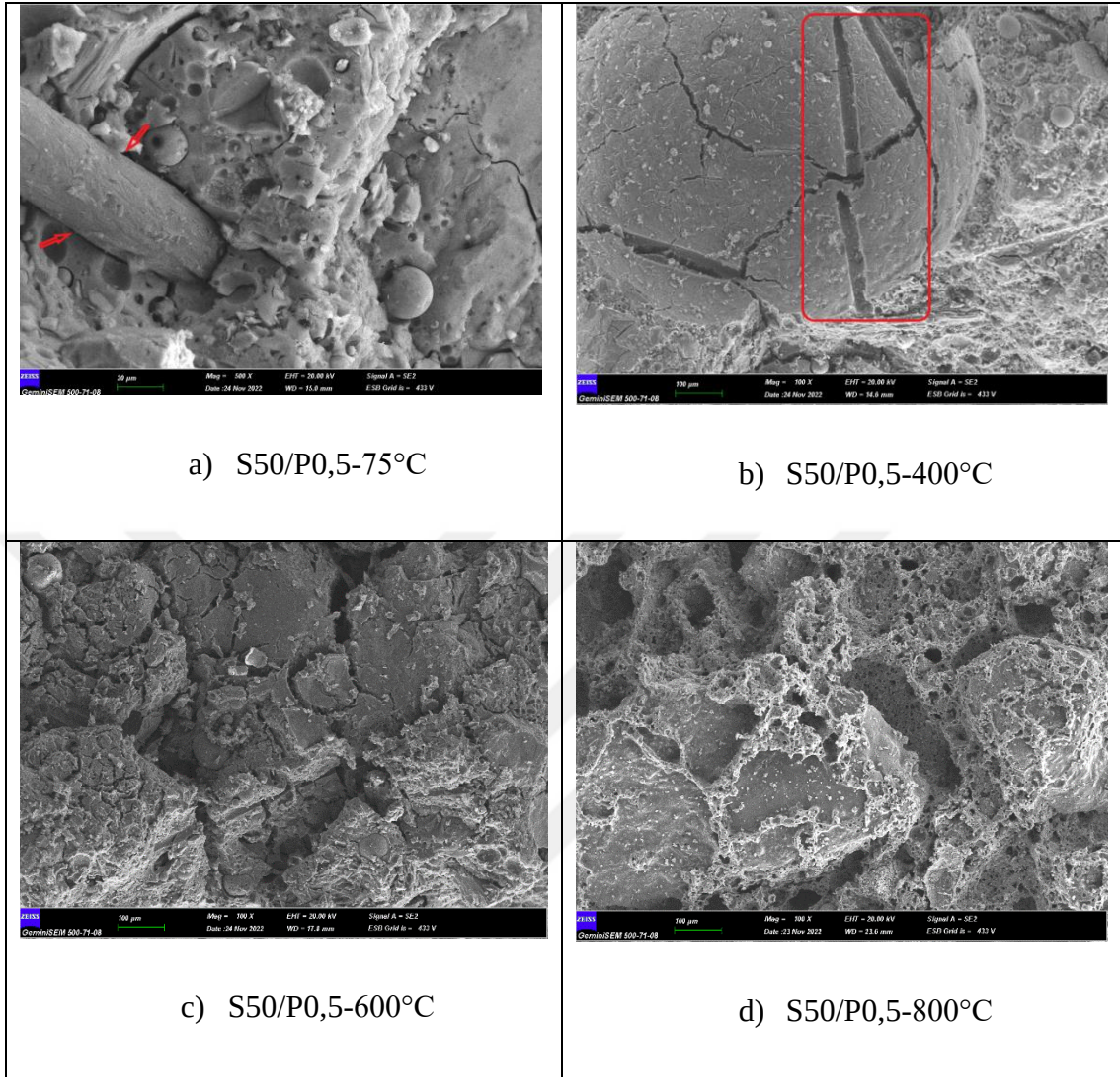
Şekil 47. S100 grubu %0,5 polipropilen lif içeren harçların yüksek sıcaklık öncesi ve sonrası SEM görüntüleri

Şekil 48-a'da hem cüruf hem uçucu kül içeren harçların kür sonrası içyapısı görülmektedir. 5 mikrondan küçük az sayıda boşluklar içyapıda oluşmuştur. Sıcaklığın artması ile bu boşluk yapısı Şekil 48-b'de 400°C'de daha büyük olarak görülmektedir. Şekil 48-c'de 600°C'de hem boşluk sayıları artmakta hem de agrega ile hamur arasındaki bağ azalmaktadır. 800°C'de ise boşluk sayılarında önemli derecede artış oluşmuş ve boşluk çapı 100 mikronun üzerine çıkmaya başlamıştır.



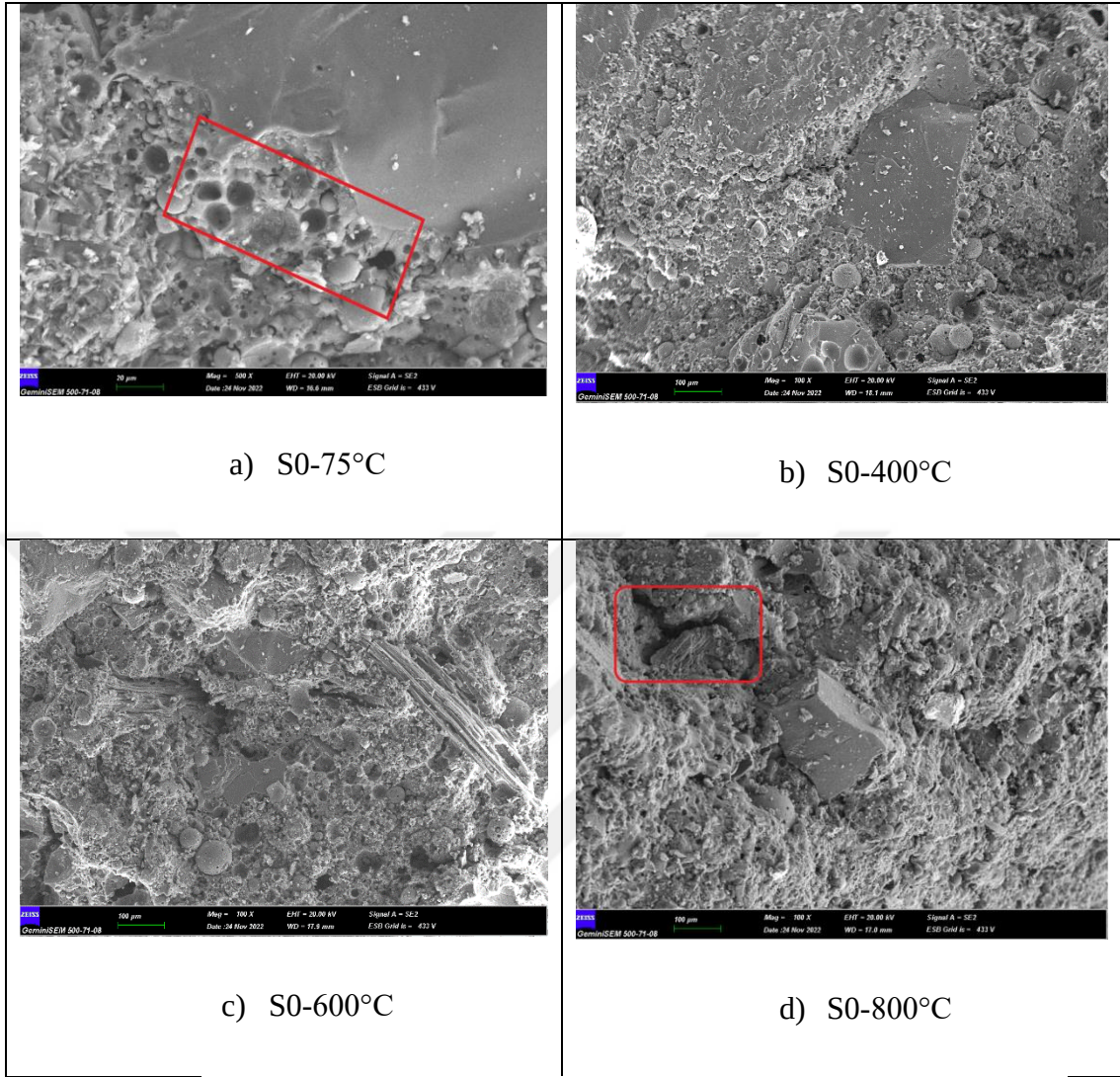
Şekil 48. S50 grubu lifsiz harçların yüksek sıcaklık öncesi ve sonrası SEM görüntüleri

Şekil 49-a'da küçük boşluklar ile beraber lifin harç içerisinde görüntüsü yer almaktadır. S100 grubuna göre kıyaslandığında S50 grubunda küçük birçok boşluk görülmektedir. Sıcaklık artışı ile lif özelliğini kaybederek yüksek sıcaklıklarda lif görünmemektedir. Ayrıca harç kararlı yapısını kaybederek özellikle 800°C'de irili ufaklı boşluklar oluşmuştur.



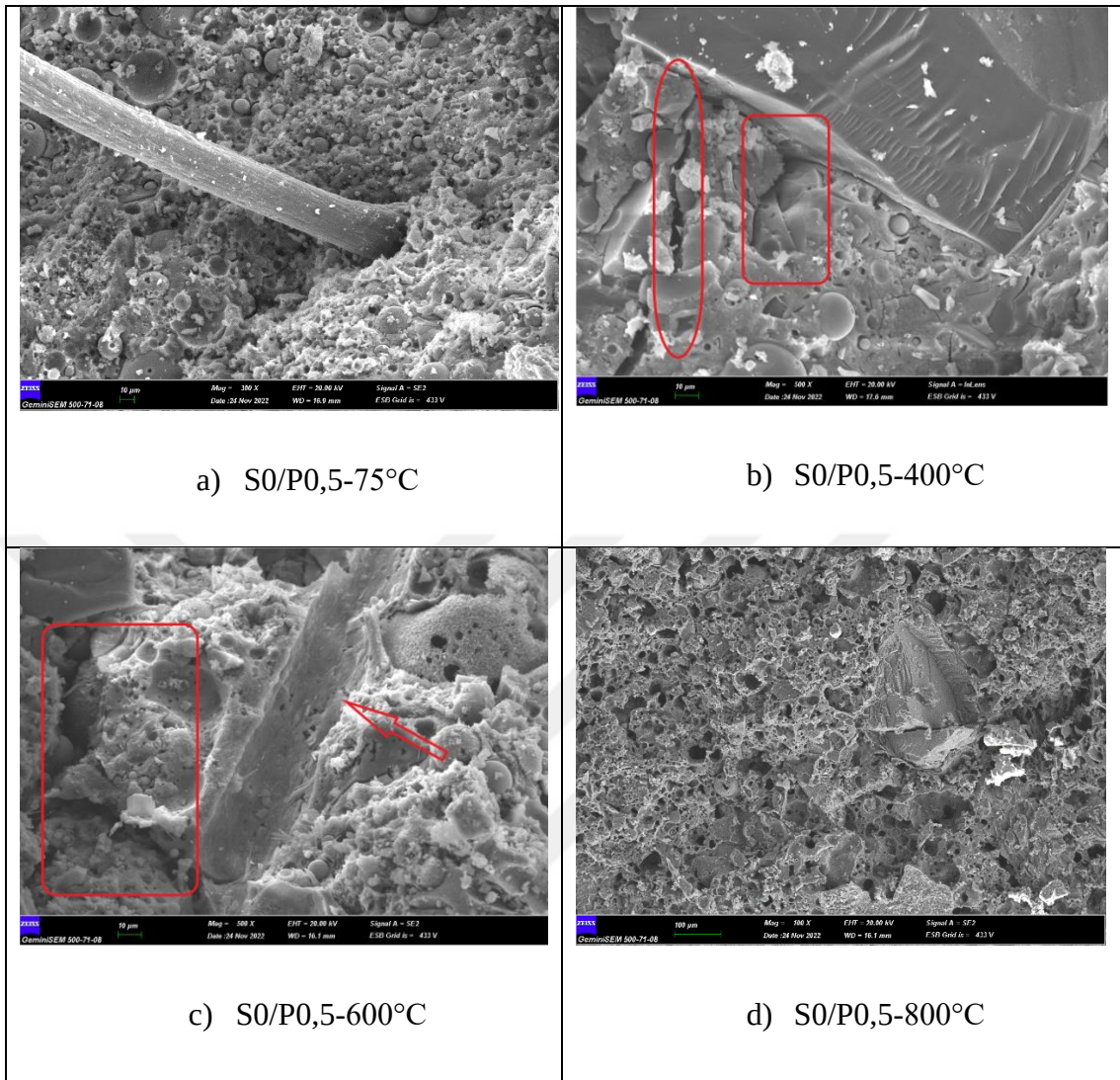
Şekil 49. S50 grubu %0,5 polipropilen lif içeren harçların yüksek sıcaklık öncesi ve sonrası SEM görüntüleri

Şekil 50-a'da uçucu kül ile üretilen harçlarda tamamen cüruf ile üretilen S100 harçlarına göre 5 mikrondan 10 mikrona varan boşluklar görünmektedir. Sıcaklık artışı ile boşluk sayılarında artış ile dayanımda düşüşler görülmüştür. Şekil 50-b'de 400°C sıkı bir harç yapısı 800°C'de 100 mikronu aşan geniş açıklıklar şeklinde görülmektedir.



Şekil 50. S0 grubu lifsiz harçların yüksek sıcaklık öncesi ve sonrası SEM görüntüleri

Şekil 51-a'da yüksek sıcaklığın uygulanmadığı numunede lif etrafındaki harç içerisinde 5 m-10 mikron dolaylarında poroziteler görünmekte iken sıcaklığın 400°C'ye artışı (Şekil 51-b) ile çatlak oluşumları artarak dayanımda düşüşe yol açmıştır. Ancak 600°C'de (Şekil 51-c) lifin de yanarak kaybolması ile lif boşlukları ile beraber 20 mikrona ulaşan gözenek boyutu ve sayısında artış oluşmuştur. 800°C'de (Şekil 51-d) gözenek boyutunun küçüldüğü ancak sayısının arttığı görülmektedir.



Şekil 51. S0 grubu %0,5 polipropilen lif içeren harçların yüksek sıcaklık öncesi ve sonrası SEM görüntüleri

4. BÖLÜM

TARTIŞMA-SONUÇ VE ÖNERİLER

4.1.Sonuçlar

- Alkali ile aktive edilen harçlarda yayılma çapları hem lif içeren hem de lifsiz harçlarda uçucu kül ikame oranı arttıkça artış göstermiştir. Uçucu külün küresel tane yapısına sahip olması en büyük faktördür.
- Lif içeren harçlar lifsiz harçlara göre düşük yayılma çapı değerlerine sahiptir. Lif içeren harçlarda tutunmayı artırıcı etki yaparak polipropilen lifler kıvamı düşürmüştür.
- Yüksek fırını cürufunun yoğunluğunun uçucu küle göre yüksek olması sebebi ile birim ağırlık ve özgül ağırlık değerleri cüruf oranı azaldıkça düşmektedir. S100 grubu 2,25 g/cm³ görünür birim ağırlığa sahip iken S0 grubu 2,12 g/cm³ birim ağırlığa sahiptir.
- Polipropilen lif (0,91 g/cm³) içeren harçlar lifsiz harçlara göre az da olsa daha düşük görünür birim ağırlık ve özgül ağırlığa sahiptir. S100/P0,5 grubu 2,22 g/cm³ görünür birim ağırlığa sahip iken S0/P0,5 grubu 2,05 g/cm³ birim ağırlığa sahiptir.
- Lif içermeyen harçların boşluk oranı cürufa uçucu kül ikame oranı arttıkça artmaktadır. S100 grubu %7,1 su emme oranına, S50 grubu %8,1 su emme oranına sahip iken S0 grubu %9,0, su emme oranına sahiptir.
- Polipropilen lif içeren harçların su emme oranı lifsiz harçlara çok yakındır. Benzer şekilde uçucu kül ikame oranı arttıkça su emme oranında artış görülmüştür. S100/P0,5 grubu %7,2 su emme oranına, S50/P0,5 grubu %8,4 su emme oranına sahip iken S0/P0,5 grubu %9,2 su emme oranına sahiptir.

- Lifsiz numunelerin boşluk oranı uçucu kül ikame oranı arttıkça bir miktar artmaktadır. S100 grubu %14,4 boşluk oranına sahip iken S0 grubu %17,8 boşluk oranına sahiptir.
- Polipropilen lif içeren harçların boşluk oranı lifsiz harçlara yakın değerdedir. Ancak benzer şekilde uçucu kül ikame oranı arttıkça boşluk oranında artış görülmüştür. S100/P0,5 grubu %14,5 boşluk oranına sahip iken S0/P0,5 grubu %17,8 boşluk oranına sahiptir.
- Uçucu külün cürufa %25 ve %50 ikame edilmesi eğilme dayanımında önce düşüş olarak görülmüş ancak uçucu kül oranının %75 ve %100'e ulaşması ile artışa geçmiştir. Genel olarak S100 ve S0 grubu harçların eğilme dayanımları S50 grubundan yüksektir. %50 cüruf ve % 50 uçucu kül içeren harçlarda eğilme dayanımının düşük olması, cürufli sistemlere uçucu kül ilave edilmesi reaksiyon kinetiğini değiştirmektedir.
- Alkali ile aktive edilmiş harçlara lif ilave edilmesi eğilme dayanımını iyileştirmiştir. Ancak %0,5, %1,0 ve %1,5 lif ilavesi ile en önemli eğilme artışı %0,5 de görülmüş, %1 ve %1,5 lif ilavesinde artış oranı azalmıştır.
- Harçlara %1 oranında polipropilen lif ilavesi,lifsiz harçlara kıyasla basınç dayanımında özellikle S100 ve S75 grubu harçlarda dayanım artışı olarak görülmüştür. Ancak uçucu kül ikame oranının artış gösterdiği S50, S25 ve S0 grubu harçlarda dayanıma etkisi düşük kalmıştır. Lif etkisi %0,5 oranında dayanıma etkisini gösterdikten sonra %1 lif ilavesi basınç dayanımında önemli derecede etki etmemiştir.
- Yüksek sıcaklık öncesi hem lifli hem de lifsiz harçlarda eğilme ve basınç dayanımı 1 günden 90 güne kadar kür süresinde bir miktar artış göstermiştir.
- S0 grubu numunelerin yüksek sıcaklık öncesine göre 400°C yüksek sıcaklık sonrası 1 günlük eğilme dayanımları %71 azalma göstermiştir. Yüksek sıcaklık öncesine göre 90 günlük bekleme süresinde bu oran %53'dür. İlave hava kürü cürufli harçlara göre uçucu kül içeren harçlara 400°C sonrası olumlu etki etmiştir.
- Alkali ile aktive edilmiş %0,5 lif içeren harçların 400°C yüksek sıcaklık sonrası 1, 28 ve 90 günlük eğilme dayanımları göz önüne alındığında yüksek sıcaklık sonrası hava kürünün tüm numune gruplarında artma eğilimi göstermiştir. Bu durum bekleme süresinin artışının eğilme dayanımını bir miktar iyileştirdiğini

göstermektedir. Dayanım kaybının polipropilen lif takviyesiz harç numuneleri ile karşılaştırıldığında daha az olması %0,5 polipropilen lif takviyesinin 400°C yüksek sıcaklık sonrası olumlu etkisini göstermektedir.

- Alkali ile aktive edilmiş lifsiz harçların 600°C yüksek sıcaklık sonrası bekleme süresi eğilme dayanımları göz önüne alındığında yüksek sıcaklık sonrası önemli dayanım kayıpları oluşmuştur. Numunelerde yüksek sıcaklık sonrası hava kürünün eğilme dayanımına olumlu etkisi yalnızca S0 grubu için belirgindir.
- Alkali ile aktive edilmiş lifli harçların 600°C yüksek sıcaklık sonrası eğilme dayanımları polipropilen lifin erimesinin etkisi ile önemli oranda azalmıştır.
- Alkali ile aktive edilmiş lifsiz harçların 800°C yüksek sıcaklık sonrası 1 ile 28 ve 90 günlük eğilme dayanımları göz önüne alındığında özellikle S50, S25 ve S0 grubu harçlarda uzun süre bekleme eğilme dayanımı değerlerinde önemli bir artışa yol açmıştır.
- Alkali ile aktive edilmiş 800°C yüksek sıcaklık sonrası lifli harçlarda hava kürünün eğilme dayanımına etkisi çok küçük artışlar şeklinde görülmektedir. Lifsiz numuneler ile karşılaştırıldığında %0,5 polipropilen lif içeren harç numuneleri tüm harç gruplarında benzer davranış göstermiştir.
- Lifsiz ve %0,5 polipropilen lif içeren harçların basınç dayanımlarında yüksek sıcaklık sonrası bekleme süreleri kayda değer bir değişime yol açmamıştır. Bu durum 400°C, 600°C ve 800°C için benzerdir.
- Lif içeren harçlar yüksek sıcaklık öncesi dayanımda artışa yol açarken yüksek sıcaklık sonrası dayanım değerlerinde düşüşe yol açmıştır. Bu durum yüksek sıcaklık ile lifin erimeye başlayarak boşluklu bir yapı oluşturmaya bağlanabilir.
- Alkali ile aktive edilmiş lifsiz harçlar 800°C yüksek sıcaklık sonrası S100 ve S0 grubu harçlar cüruf ve uçucu kül birlikte yer alan S25, S50 ve S75 harçlarına göre daha yüksek dayanımlara sahiptir. Bu durum bireysel olarak cüruf veya uçucu kül kullanımının 800°C yüksek sıcaklık sonrası daha kararlı bir yapıda olduğunu göstermektedir.

- Numuneler özellikle 800°C yüksek sıcaklık sonrası görsel olarak da deformasyona uğramıştır.
- Yüksek sıcaklık sonrası eğilme ve basınç dayanımı kaybı hemen oluşmuş, 90 güne kadar hava kürü ile numuneler genel olarak büyük bir dayanım artış veya azalışı oluşmamıştır.
- Alkali ile aktive edilmiş harçlarda eğilme ve basınç dayanımı birlikte düşünüldüğünde ağırlıkça %0,5 oranında lif kullanımı en uygun oran olarak belirlenmiştir.
- Mikroyapı analizinde yüksek sıcaklık sonrası lifin erimesi ile lif boşlukları oluşarak dayanımın düşüşler görülmüştür. Yüksek sıcaklık öncesi ise lif bağlanmayı artırarak bir miktar dayanım artışına yol açmıştır.
- Cüruf içeren harçların (S100) mikroyapıları uçucu kül içeren harca (S0) kıyasla daha yoğun ve gözeneksizdir. Bu harçlara lif ilave edilmesi agrega-hamur arasındaki bağlanmaya ek katkı sunarak eğilme ve basınç dayanımında artışa sebep olmuştur.

4.2.Öneriler

- Sodyum metasilikat dışında bir aktivatör kullanılarak çalışmada farklı aktivatörün etkisi araştırılabilir.
- Polipropilen yerine atık lif veya çelik lifler kullanılabilir.
- Farklı kür sıcaklıkları ve ısıl kürsüz numuneler üretilerek yüksek sıcaklık sonrası bekleme süresinin etkisi araştırılabilir.
- Yüksek sıcaklık sonrası bekleme süresinde hava yerine su kürü ve hava kürü birlikte kullanılabilir.

KAYNAKÇA

- [1] Ma, Q., Guo, R., Zhao, Z., Lin, Z., & He, K., 2015. Mechanical properties of concrete at high temperature-A review. **Construction and building materials**, **93**:371-383.
- [2] Yang, H., Lin, Y., Hsiao, C., & Liu, J. Y., 2009. Evaluating residual compressive strength of concrete at elevated temperatures using ultrasonic pulse velocity. **Fire safety journal**, **44**(1): 121-130.
- [3] Li, L., Shi, L., Wang, Q., Liu, Y., Dong, J., Zhang, H., & Zhang, G., 2020. A review on the recovery of fire-damaged concrete with post-fire-curing. **Construction and building materials**, **237**:117564.
- [4] Handoo, S. K., Agarwal, S., & Agarwal, S. K. 2002 Physicochemical, mineralogical, and morphological characteristics of concrete exposed to elevated temperatures. **Cement and concrete research**, **32**(7):1009-1018.
- [5] Xiao, J., & König, G., 2004. Study on concrete at high temperature in China-an overview. **Fire safety journal**, **39**(1):89-103.
- [6] Poon, C. S., Azhar, S., Anson, M., & Wong, Y. L., 2001. Strength and durability recovery of fire-damaged concrete after post-fire-curing. **Cement and concrete research**, **31**(9):1307-1318.
- [7] Rivera, O. G., Long, W. R., Weiss Jr, C. A., Moser, R. D., Williams, B. A., Torres-Cancel, K., & Allison, P. G., 2016. Effect of elevated temperature on alkali-activated geopolymeric binders compared to portland cement-based binders. **Cement and concrete research**, **90**:43-51.
- [8] Kühl, H., 1951. Zement-Chemie: Die Erhärtung und die Verarbeitung der hydraulischen Bindemittel. **Verlag technik**, **3**.
- [9] Glukhovskiy, V.D., 1965. Soilsilicates: Their Properties, Technology and Manufacturing and Fields of Application. Civil Engineering Institute, DTech. Sc. Thesis, Kiev, Ukraine.
- [10] Chindaprasirt, P., Phoongernkham, T., Hanjitsuwan, S., Horpibulsuk, S., Poowancum, A., & Injorhor, B., 2018. Effect of calcium-rich compounds on setting time and strength development of alkali-activated fly ash cured at ambient temperature. **Case studies in construction materials**, **9**:e00198.

- [11] Chindapasirt, P., Rattanasak, U., 2017. Synthesis of polypropylene fiber/high-calcium fly ash geopolymer with out door heat exposure. **Clean technologies and environmental policy**,19(7):1985-1992.
- [12] Chindapasirt, P., & Rattanasak, U., 2018. Fire-resistant geopolymer bricks synthesized from high-calcium fly ash with outdoor heat exposure. **Clean technologies and environmental policy**,20(5):1097-1103.
- [13] Hojati, M., Radlińska, A., 2017. Shrinkage and strength development of alkali-activated fly ash-slag binary cements. **Construction and building materials**, 150:808-816.
- [14] Martin, A., Pastor, J. Y., Palomo, A., & Jiménez, A. F., 2015. Mechanical behaviour at high temperature of alkali-activated aluminosilicates (geopolymers). **Construction and building materials**, 93:1188-1196.
- [15] Wang, W. C., Wang, H. Y., & Lo, M. H., 2014. The engineering properties of alkali-activated slag pastes exposed to high temperatures. **Construction and building materials**,68:409-415.
- [16] Li, L., Jia, P., Dong, J., Shi, L., Zhang, G., & Wang, Q., 2017. Effects of cement dosage and cooling regimes on the compressive strength of concrete after post-fire-curing from 800 C. **Construction and building materials**,142:208-220.
- [17] Park, S. J., Yim, H. J., & Kwak, H. G., 2015. Effects of post-fire curing conditions on the restoration of material properties of fire-damaged concrete. **Construction and building materials**,99:90-98.
- [18] Sarker, P. K., Kelly, S., & Yao, Z., 2014. Effect of fire exposure on cracking, spalling and residual strength of fly ash geopolymer concrete. **Materials & design**,63:584-592.
- [19] Pekdemir, N.R., 2020. Polipropilen Lif Oranının Betonun Eğilmede Çekme ve Basınç Dayanımına Etkisi. Gümüşhane Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Gümüşhane, s.63.
- [20] Sukontasukkul, P. , Pongsopha, P. , Chindapasirt, P. Songpiriyakij, S., 2018. Flexural performance and toughness of hybrid steel and polypropylene fiber in forced geopolymer. **Construction and building materials**,161:37-44.

- [21] Li, Y., Tan, K. H., Yang, E. H., 2018. Influence of aggregate size and inclusion of polypropylene and steel fibers on the hot permeability of ultra-high performance concrete (UHPC) at elevated temperature. **Construction and building materials**, **169**:629-637.
- [22] Aydın, S. , Baradan, B., 2013. The effect of fiber properties on high performance alkali-activated slag/silica fume mortars. **Composites part b: engineering**, **45**(1):63–69.
- [23] Eidan, J. , Rasoolan, I. , Rezaeian, A. , Poorveis, D., 2019. Residual mechanical properties of polypropylene fiber-reinforced concrete after heating. **Construction and building materials**, **198**:195–206.
- [24] Liu, J. C., Tan, K. H., & Yao, Y., 2018. A new perspective on nature of fire-induced spalling in concrete. **Construction and building materials**, **184**:581-590.
- [25] Bangi, M.R. , Horiguchi, T., 2012. Effect of fibre type and geometry on maximum pore pressures in fibre-reinforced high strength concrete at elevated temperatures. **Cement and concrete research**, **42**:459–466.
- [26] Ju, Y., Wang, L. , Liu, H. , Tian, K., 2015. An experimental investigation of the thermal spalling of polypropylene-fibered reactive powder concrete exposed to elevated temperatures. **Science bulletin**, **60**(23):2022–2040.
- [27] Almaz Özcan, Z., 2020. Alkalilerle Aktive Edilmiş Yüksek Fırın Cürufu ve Uçucu Kül Tabanlı Harçların Özellikleri. Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Kayseri, s.201.
- [28] Engin, Y., Yüksek fırın cürufu ve yüksek fırın cürufu çimento, üretimi, özellikleri, etkileri, yüksek fırın cürufu el kitabı.
(<http://www.betonvecimento.com/wpcontent/uploads/2015/02/Y%C3%BCksek-F%C4%B1r%C4%B1n-C%C3%BCrufu-El-Kitab%C4%B1.pdf>.), (Erişim tarihi :Nisan 2022).
- [29] Tokyay, M., & Erdoğan, K., 2009. Cürufar ve Cürufu Çimentolar. Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği. Ankara.
- [30] Richardson, D. N., 2006. Strength and durability characteristics of a 70% ground granulated blast furnace slag (GGBFS) concrete mix, Organizational results research report, Missouri department of transportation (MoDOT).

- [31] Erdoğan, Turhan Y., 2013. Beton. ODTÜ Ankara, 825.
- [32] Şensever, Y., 2021. Lifle Güçlendirilmiş Alkalilerle Aktive Edilen Yüksek Fırın Cürufu Harçların Elektromanyetik Özelliklerinin ve Yüksek Sıcaklık Etkisindeki Davranışının Belirlenmesi.Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi,Eskişehir,s.71.
- [33] Newman, J., Choo, B. S., 2003. Advanced Concrete Technology, Constituent Materials, Butterworth-Heinemann,Oxford.
- [34] Türker, P., Erdoğan, B., Katnaş, F., Yeğınobalı, A., 2009. Türkiye’deki Uçucu Küllerin Sınıflandırılması ve Özellikleri. Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği. Ankara.
- [35] Tulga, İ., & Kılınç, K., 2018. Uçucu kül kullanımının farklı dayanım sınıflarındaki betonların mekanik ve durabilite özellikleri üzerindeki etkisi. **Kırklareli üniversitesi mühendislik ve fen bilimleri dergisi**,4(2): 212-236.
- [36] Özturan, T., 1991. Yüksek mukavemetli beton üretiminde mineral katkı maddelerinin etkinliği. *2.ulusal beton kongresi*,280-291.
- [37] TS EN, 197-1.,2012. Çimento-Bölüm 1: Genel Çimentolar-Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- [38] ASTM C 618, 1991. Specification for Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for use as a mineral admixture in Portland Cement Concrete. ASTM.
- [39] Atashafrazeh, M., 2003. Polipropilen Lif Takviyeli Betonların Yüksek Sıcaklık Etkilerinden Sonra Basınç Dayanımlarının İncelenmesi. Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi,Erzurum,s.96.
- [40] Akid, A. S. M., Hossain, S., Munshi, M. I. U., Elahi, M. M. A., Sobuz, M. H. R., Tam, V. W., & Islam, M. S.,2021. Assessing the influence of fly ash and polypropylene fiber on fresh, mechanical and durability properties of concrete. **Journal of king saud university-engineering sciences**.
- [41] Atabey, İ.İ., 2017. F Sınıfı Uçucu Küllü Geopolimer Harcının Durabilite Özelliklerinin Araştırılması. Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Kayseri,s.180.
- [42] Provis, J. L., & Bernal, S. A., 2014. Geopolymers and related alkali-activated

materials. **Annual review of materials research**,44:299-327.

- [43] (<https://okimya.com.tr/tuzlar/sodyum-metasilikat/#:~:text=%C3%9Cretimi%20sodyum%20silikat%20ve%20sodyum,s%C4%B1cakl%C4%B1kta%20birle%C5%9Ftirilmesi%20ile%20elde%20edilebilir>), (Erişim tarihi: Mayıs 2022).
- [44] Hlavacek, P., 2014. Engineering properties of alkali activated composites. Czech Technical University In Prague.
- [45] (<https://www.geopolymer.org/applications/geopolymer-cement/>), (Erişim tarihi: Haziran 2022).
- [46] Chindaprasirt, P., Boonbamrung, T., Poolsong, A., & Kroehong, W., 2021. Effect of elevated temperature on polypropylene fiber reinforced alkali-activated high calcium fly ash paste. **Case studies in construction materials**,15:e00554.
- [47] Kuranlı, Ö. F., Uysal, M., Abbas, M. T., Cosgun, T., Niş, A., Aygörmez, Y., Al-mashhadani, M. M., 2022. Evaluation of slag/fly ash based geopolymer concrete with steel, polypropylene and polyamide fibers. **Construction and building materials**,325:126747.
- [48] Marjanović, N., Komljenović, M., Baščarević, Z., Nikolić, V., & Petrović, R., 2015. Physical–mechanical and microstructural properties of alkali-activated fly ash–blast furnace slag blends. **Ceramics international**,41(1):1421-1435.
- [49] Pan, Z., Tao, Z., Cao, Y. F., Wuhrer, R., & Murphy, T., 2018. Compressive strength and microstructure of alkali-activated fly ash/slag binders at high temperature. **Cement and concrete composites**,86:9-18.
- [50] Karahan, O., 2011. Residual compressive strength of fire-damaged mortar after post-fire-air-curing. **Fire and materials**,35(8):561-567.
- [51] Kaya, M., Uysal, M., Yilmaz, K., & Atış, C. D., 2018. Behaviour of geopolymer mortars after exposure to elevated temperatures. **Materials science-medziagotyra**,24(4)
- [52] Çelikten, S., & Canbaz, M., 2020. Yüksek sıcaklığa maruz atık çelik lif takviyeli alkali ile aktive edilmiş yüksek fırın cürufu harçların davranışı. **Pamukkale üniversitesi mühendislik bilimleri dergisi**,26(6):1110-1116.

- [53] Çelikten, S., Sarıdemir, M. & Deneme, İ.Ö.,2019. Mechanical and microstructural properties of alkali-activated slag and slag+ fly ash mortars exposed to high temperature. **Construction and building materials**, **217**:50-61.
- [54] Yurt, Ü.,2020.High performance cementless composites from alkali activated GGBFS. **Construction and building materials**,**264**.120222.
- [55] TS EN, 1015-3., 2000. Kagit harcı- Deney metotları- Bölüm 3: Taze harç kıvamının tayini (yayılma tablası ile). Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- [56] ASTM, C642-13. Standard Test Method forDensity, Absorption, and Voids in Hardened Concrete. Annual Book of ASTM Standarts.
- [57] TS EN, 1015-11., 2000. Kagit harcı - Deney metotları - Bölüm 11: Sertleşmiş harcın basınç ve eğilme dayanımının tayini. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- [58] Örklemmez, E., 2019. Uçucu Kül Tabanlı Geopolimer Harçlarda Diatomit İkamesinin Fiziksel ve Mekanik Özellikleri Üzerine Etkilerinin Araştırılması. Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Kayseri, s.118.
- [59] ASTM, C642. Standard Test Method forDensity, Absorption, and Voids in Hardened Concrete, Annual Book of ASTM Standarts..
- [60] Puertas, F., Palacios, M., Manzano, H., Dolado, J. S., Rico, A., & Rodríguez, J., 201. A model for the CASH gel formed in alkali-activated slag cements . **Journal of the european ceramic society**,**31**(12):2043-2056.
- [61] Kroehong, W., Jaturapitakkul, C., Pothisiri, T., Chindaprasirt P., 2018. Effect of oil palm fiber content on the physical and mechanical properties and microstructure of high-calcium fly ash geopolymer paste. **Arabian journal for science and engineering**,**43**(10):5215-5224.
- [62] Masi, G., Rickard, W. D., Bignozzi, M. C., & Van Riessen, A., 2015. The effect of organic and inorganic fibres on the mechanical and thermal properties of aluminate activated geopolymers. **Composites part b: engineering**,**76**:218-228.
- [63] Amran, M., Fediuk, R., Abdelgader, H. S., Murali, G., Ozbakkaloglu, T., Lee, Y. H., & Lee, Y. Y.,2022. Fiber-reinforced alkali-activated concrete: A review. **45**.103638.
- [64] Kroehong, W., Sinsiri, T., Jaturapitakkul, C., & Chindaprasirt, P., 2011. Effect of palm oil fuel ash fineness on the microstructure of blended cement paste.

Construction and building materials,25(11):4095-4104.

- [65] Chindapasirt, P., Sinsiri, T., Kroehong, W., & Jaturapitakkul, C., 2014. Role of filler effect and pozzolanic reaction of biomass ashes on hydrated phase and pore size distribution of blended cement paste. **Journal of materials in civil engineering**,26(9):01014057.
- [66] Sertbakan, R. G., Atabey, İ. İ., Durak, U., İlkentapar, S., Karahan, O., & Atış, C. D.,2022. Alkali ile aktive edilmiş cüruf ve uçucu kül harçlarına yüksek sıcaklık sonrası hava kürünün etkisi. **Düzce üniversitesi bilim ve teknoloji dergisi**,10(5): 114-126.
- [67] Luga, E., & Atış, C. D., 2016. Strength properties of slag/fly ash blends activated with sodium metasilicate and sodium hydroxide plus silica fume. **Periodica polytechnica-civil engineering**, 60(2).

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı: Rabia Gizem SERTBAKAN

Uyruğu: Türkiye (T.C)

EĞİTİM

Derece	Kurum	Mezuniyet Tarihi
Yüksek Lisans	Erciyes Üniversitesi İnşaat Mühendisliği	Halen
Lisans	Erciyes Üniversitesi İnşaat Mühendisliği	2017
Lise	2000 Evler Anadolu Lisesi, Nevşehir	2013

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görev
2018-Halen	GMS Taahhüt Proje İnşaat Yapı Sanayi ve Ticaret Limited Şirketi	İnşaat Mühendisi

YABANCI DİL

İngilizce

YAYINLAR

1. Sertbakan, R. G., Atabey, İ. İ., Durak, U., İlkentapar, S., Karahan, O., & Atış, C. D.,2022. Alkali ile aktive edilmiş cüruf ve uçucu kül harçlarına yüksek sıcaklık sonrası hava kürünün etkisi. **Düzce üniversitesi bilim ve teknoloji dergisi**,10.5: 114-126.