

İNŞAAT MALZEMELERİ VE SÜRDÜRÜLEBİLİR YAPILAR

Editör
ATILA KUMBASAROĞLU



BİDGE Yayınları

**İNŞAAT MALZEMELERİ VE SÜRDÜRÜLEBİLİR
YAPILAR**

Editör: ATİLA KUMBASAROGLU

ISBN: 978-625-372-716-1

1. Baskı

Sayfa Düzeni: Gözde YÜCEL

Yayınlama Tarihi: 2025-06-25

BİDGE Yayınları

Bu eserin bütün hakları saklıdır. Kaynak gösterilerek tanıtım için yapılacak kısa alıntılar dışında yayıncının ve editörün yazılı izni olmaksızın hiçbir yolla çoğaltılamaz.

Sertifika No: 71374

Yayın hakları © BİDGE Yayınları

www.bidgeyayinlari.com.tr - bidgeyayinlari@gmail.com

Krc Bilişim Ticaret ve Organizasyon Ltd. Şti.

Güzeltepe Mahallesi Abidin Daver Sokak Sefer Apartmanı No: 7/9 Çankaya /
Ankara



ÖNSÖZ

İnşaat sektörü, hem ekonomik büyümenin önemli bir yapıtaşı hem de çevresel etkilerin en fazla hissedildiği alanlardan biri olarak öne çıkmaktadır. Bu bağlamda, yapı malzemelerinin geliştirilmesi ve kullanımı, sürdürülebilirlik ilkesine uygun şekilde ele alınmalıdır.

Elinizdeki bu kitap, çevresel açıdan duyarlı, ekonomik ve teknik açıdan uygulanabilir yapı malzemelerinin araştırılmasına yönelik güncel bilimsel katkıları bir araya getirmektedir. Kitapta yer alan bölümler; geopolimer betonlar, alternatif agrega malzemeleri, doğal lif katkıları gibi sürdürülebilir inşaat malzemeleri üzerine yapılan deneysel ve teorik çalışmaları kapsamaktadır.

Her bir bölüm, günümüz inşaat mühendisliği uygulamalarında sürdürülebilirlik kriterlerini sağlama yolunda atılmış önemli adımları temsil etmektedir. Bu kapsamda, geri dönüştürülmüş malzeme kullanımı, atıkların değerlendirilmesi ve çevresel ayak izinin azaltılmasına yönelik yenilikçi yaklaşımlar detaylı şekilde sunulmaktadır.

Kitabın, başta araştırmacılar, mühendisler ve akademisyenler olmak üzere sürdürülebilir yapı teknolojileri alanında çalışan tüm paydaşlara fayda sağlayacağına inanıyoruz.

Eseri ortaya koyan değerli yazarlara ve katkı sunan herkese teşekkür eder, kitabın literatüre değerli katkılar sunmasını dileriz.

Doç. Dr. ATİLA KUMBASAROĞLU

ERZİNCAN BİNALİ YILDIRIM ÜNİVERSİTESİ

İÇİNDEKİLER

FARKLI UZUNLUK VE ORANLARA SAHİP JÜT LİFİNİN ÇİMENTO HARCİ ÖZELLİKLERİNE ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI	1
<i>KENAN TOKLU, ERTUĞRUL ORDU, AHMET ÖZGÜR AĞIRGAN</i>	
KOCAELİ KÖRFEZ DENİZ KATI ATIKLARININ BAĞLAYICI MALZEME OLARAK GEOPOLİMER KOMPOZİT ÜRETİMİNDE DEĞERLENDİRİLMESİ	19
<i>ÖZLEM TAŞTEMÜR, MÜCTEBA UYSAL</i>	
ELEKTRİKSEL KÜRLEME YOLUYLA GERİ DÖNÜŞTÜRÜLMÜŞ BETON AGREGALARIYLA GEOPOLİMER HARÇLARIN GELİŞTİRİLMESİ	45
<i>ŞAHİN EKMEKCİ, MÜCTEBA UYSAL</i>	
ELEKTRİKSEL KÜRLEME YOLUYLA GERİ DÖNÜŞTÜRÜLMÜŞ BETON AGREGALARIYLA GEOPOLİMER HARÇLARIN GELİŞTİRİLMESİ	65
<i>ŞAHİN EKMEKCİ, MÜCTEBA UYSAL</i>	
GÜÇLENDİRME MALZEMESİ OLARAK POLİÜRE ÖZELLİKLERİ, AVANTAJLARI VE DİĞER SİSTEMLERLE KARŞILAŞTIRMASI	85
<i>HARUN YÜKSEL GÜLYAPRAK, ALİ GÜRBÜZ</i>	

BÖLÜM 1

FARKLI UZUNLUK VE ORANLARA SAHİP JÜT LİFİNİN ÇİMENTO HARCİ ÖZELLİKLERİNE ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

KENAN TOKLU¹
ERTUĞRUL ORDU²
AHMET ÖZGÜR AĞIRGAN³

Giriş

Günümüzde inşaat sektörünün çevresel etkileri, küresel ısınma, kaynak tüketimi ve karbon salımı gibi sorunlar nedeniyle her zamankinden daha fazla sorgulanmaktadır. İnşaat sektörü özellikle çimentolu esaslı kompozitlerin çevresel etkilerini azaltarak mekanik özelliklerini geliştirmek için sürdürülebilir malzemeler kullanmakta ve bu konu ile ilgili çalışmalara giderek daha fazla önem vermektedir (Tufan & Özel, 2012; Özcan & Güngör, 2019; Gelişen & Güzelkocar, 2019; Ali & ark., 2012). Sürdürülebilir beton üretimi, inşaat sektörünün geleceği için kritik bir öneme sahiptir. Bu

¹ Doç. Dr., Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Orcid: 0000-0003-1288-845X

² Dr. Öğretim Üyesi, Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Orcid: 0000-0001-8877-5617

³ Öğr. Gör. Dr, Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Tekstil Mühendisliği Bölümü, Orcid: 0000-0003-2412-5265

kapsamda, son yıllarda doğal veya geri dönüştürülmüş lif kullanılarak üretilen betonun hem dayanıklılığını arttırılmakta hem de uzun ömürlü yapılar inşa ederek kaynak kullanımını azaltılmaktadır (Serin & ark., 2018; Kara, 2018; Cengiz, 2015). Doğal veya geri dönüştürülmüş liflerin beton üretiminde kullanımı, çevresel ayak izini azaltırken atıkların değerlendirilmesi için de bir seçenek olabilmektedir (Bulut & Özer, 2024). Sürdürülebilirliği sadece çevresel olarak değil, aynı zamanda ekonomik ve sosyal boyutlar açısından da düşündüğümüz zaman durabilitesi yüksek ve bakım-onarım gereksinimi az olan yapılar, uzun vadeli maliyetleri azaltarak ekonomik sürdürülebilirliğe de katkı sağlamaktadır (Eser & Ayhün, 2024). Bundan dolayı, lif katkılı betonun geleneksel betondan daha az bakım gerektirmesi, servis ömrünün daha uzun olması ve mikro-çatlak gelişimini engelleyerek yapının durabilitesini artırması gibi özellikleri, lif katkılı betonu sürdürülebilir inşaat anlayışının bir parçası haline getirmektedir (Kanbak & ark., 2023).

Genel olarak agrega, su, çimento ve katkı malzemelerinden oluşan beton, dünyada yapı malzemesi olarak en çok tercih edilen kompozit bir malzemedir (Acar & Ramyar, 2024; Topçu & Uygunoğlu, 2021). Gevrek bir malzeme olan betonun uygulama alanının çok geniş olmasından dolayı mühendislik özelliklerinin geliştirilmesi için yoğun çalışmalar yapılmaktadır (Yıldız & ark., 2010). Betonun özellikle basınç dayanımının iyileştirilmesine yönelik çalışmalar günden güne artmaktadır ama basınç dayanımındaki iyileştirmeler yanında betonun çekme dayanımındaki iyileşmeler basınç dayanımındaki artışa oranla düşük kalmaktadır (Gülan & ark., 2016).

Betonun özelliklerine yeni kazanımlar sağlamak ve özellikle eğilme dayanımı arttırmak için doğal, polimer, çelik, alkali dirençli cam ve karbon gibi çeşitli lifler beton içerisinde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Demirel & Gönen, 2008). Lifli beton, beton

karışımına çeşitli türlerde, boyutlarda ve oranlarda liflerin eklenmesiyle elde edilen bir kompozit malzemedir (Taşdemir & ark, 2005; Çivici & Güngör, 2016). Lifli beton, bu bağlamda, betonun çekme, eğilme ve darbe dayanımını artıran, çatlak oluşumunu engelleyen ve durabilitesini artıran bir kompozit malzeme olarak öne çıkmaktadır (Kozak, 2013; Şenol, 2022; Araz & ark., 2018). İnşaat sektöründe lifli beton, çeşitli inşaat uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır (Nasery & ark., 2020). Farklı lif türleri ve oranları, betonun mekanik ve fiziksel özelliklerini çeşitli şekillerde etkileyebilmektedir (İskender & Karasu, 2018; Aygen, 2024; Yıldız & Ulucan, 2008; Şimşek & ark., 2021). Betonun bazı özelliklerini iyileştirmek için kullanılan polipropilen lifler düşük yoğunlukları, kimyasal dirençleri ve ekonomik olmaları gibi özelliklerinden dolayı yaygın olarak kullanılmaktadır (Avcı & ark., 2019). Literatürde (Grzybowski & Shah, 1990; Bentur & Mindess, 1990; Liu & ark., 2016; Mardani-Aghabaglou & ark., 2017) beton içerisinde polipropilen liflerin kullanılmasıyla betonun çekme dayanımını artırdığı ve çatlakların yayılmasını engellediği belirtilmektedir. Yüksek çekme ve eğilme dayanımına sahip çelik lifler ise üretim açısından düz, şekil verilmiş, kıvrımlı, kancalı gibi şekillerde piyasada bulunmaktadır (Şenol, 2022; Ünal & ark., 2011; Şimşek, 2004; Ekincioğlu, 2002; Halilov, 2003; Yaprak & ark., 2004). Ayrıca, çelik liflerin yüzey pürüzlülüğü sayesinde, çelik lifler ve çimento matrisi güçlü bir aderans oluşturmaktadırlar (Araz & ark., 2018). Diğer bir lif türü olan karbon lifler yüksek çekme dayanımı, düşük termal genleşme ve yüksek elektriksel iletkenlik gibi özelliklere sahiptir (Eryılmaz, 2017). Karbon liflerin bu özellikleri sayesinde karbon lifli betonlar iyi mekanik özelliklere sahip, termal genleşmesi az ve elektriksel iletkenliğini daha yüksek bir beton olarak sayılabilir (Eryılmaz, 2017). Cam lifler ise yüksek çekme dayanımı, kimyasal direnç ve ekonomiklik gibi özelliklere sahiptir (Engineering Design Handbook, 1981; İlhan & Feyzullahoğlu, 2019). Bu lifler, betonun içsel gerilmelerini önlemeleri sayesinde çatlak oluşumunu

engellerler ve yapının genel dayanıklılığını artırır (Yaprak & ark., 2004).

Doğal bir bitki lifi olan jüt, özellikle Asya kıtasında (Bangladeş ve Hindistan) yetiştirilen *Corchorus* bitkisinden elde edilen 2-4 m aralığında bir boya sahip odunsu bir bitkidir (Mutlu, 2012). Kenevir ve keten gibi selüloz bazlı olan jüt ucuz, bol miktarda bulunabilen ve biyolojik olarak parçalanabilen bir liftir (Bilgili & ark, 2018; URL-1, 2025). Bu liflerin kullanım alanları genel olarak çuval, halat ve giysidir (Shah & Marikunte, 1995; Arslan & Sarıkaya, 2021). İnşaat sektörü açısından jüt lifleri, betonun çekme, aşınma, eğilme dayanımlarını iyileştirmek ve çatlak kontrolünü sağlamak gibi avantajları için kullanılmaktadır (Arslan & Sarıkaya, 2021). Ancak, doğal bir malzeme olan jüt lifinin su emme ve bozulma riski gibi özellikleri beton üretiminde kullanılmasında dezavantaj olarak sayılabilir (Arslan & Sarıkaya, 2021). Farias ve ark. (Farias & ark., 2024) yaptıkları çalışmada 20 mm ve 40 mm uzunluğunda jüt liflerinin %2, %3 ve %4 oranlarında harca eklenmesiyle üretilen harçların özelliklerini incelemişlerdir. Elde ettikleri sonuçlara göre, lif oranı arttıkça harcın çekme dayanımının azaldığını belirtmişlerdir. Özellikle harçlara lif eklenmesiyle harçlarda tokluk artışının meydana geldiğini fakat elastisite modülünde yaklaşık %38'e kadar bir azalma olduğunu belirtmişlerdir (Farias & ark., 2024). Majumder ve ark. (Majumder & ark., 2023) yaptıkları çalışmada, üç farklı uzunluğa (5 mm, 10 mm ve 30 mm) sahip jüt lifleri dört farklı oranda (%0,5, %1, %1,5 ve %2) karışımlara eklenerek harç numuneler üretmişlerdir. Elde ettikleri sonuçlara göre, lif takviyesiz harçlara kıyasla lif katkılı harçların yüksek süneklik gösterdiklerini ama daha düşük basınç dayanımı gösterdiklerini vurgulamışlardır (Majumder & ark., 2023). Dayananda ve ark. (Dayananda & ark., 2018) yaptıkları çalışmada, %0.2, %0.4, %0.6, %0.8, %1, %1.2, %1.4, %1.6 and %1.8 oranlarında jüt lifleri eklenen çimento kompozitlerinin basınç

dayanımı incelenmiştir. Sonuçlar, %0,4 oranında jüt lifi eklemenin basınç dayanımını artırdığını, ancak lif oranı arttıkça dayanımın azaldığını göstermektedir (Dayananda & ark., 2018). Khan ve ark. (Khan & ark., 2023) yaptıkları çalışmada, ağırlıkça %0, %0.10, %0.25, %0.50, and %0.75 oranında jüt lifi eklenen taze ve sertleşmiş betonun özelliklerini incelemişlerdir. Elde ettikleri sonuçlara göre, optimum jüt lifi oranının %0,10 olduğunu ve ayrıca jüt liflerinin betonun işlenebilirliğini azalttığını, ancak dayanıklılığını artırdığını belirtmişlerdir (Khan & ark., 2023).

Bu çalışmada, 10 mm ve 20 mm uzunluğa sahip jüt lifleri, hacimce %0,5, %1,0 oranlarında karışımlara eklenmiş ve üretilen harçların özellikleri araştırılmıştır.

Materyal ve Metot

Materyal

Çimento

Bu çalışmada, bağlayıcı olarak özellikleri Tablo 1’ de verilen CEM II/A-M(L-V) 42.5 R çimentosu kullanılmıştır.

Tablo 1. Çalışmada kullanılan çimento özellikleri

Oksitler	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K.K.
Değer (%)	22.03	6.93	5.18	59.01	1.75	3.2	3.5

*K.K.=Kızdırma Kaybı

Agrega

Lif katkılı harç üretiminde agrega olarak TS EN 196-1 (TS EN 196-1, 2016) standardına uygun CEN standart kumu kullanılmıştır (Şekil 1).

Şekil 1. CEN Standard Kumu



Jüt Lifi

Bu çalışmada kullanılmak üzere temin edilen jüt iplikleri, 10 mm ve 20 mm olacak şekilde kesilmiş ve her bir jüt ipliği tel tel ayrılarak harç karışımına katılmaya uygun hale getirilmiştir (Şekil 2). Çalışmada kullanılan jüt lifine ait fiziksel özellikler Tablo 2' de verilmiştir.

Şekil 2. Çalışmada kullanılan farklı uzunluklara sahip jüt lifleri



Tablo 2. Jüt lifine ait fiziksel özellikler

Özellikler	Değer
Gerçek Yoğunluk	1.45 g/cc
Görünen Yoğunluk	1.34 g/cc
Birim Hacim Ağırlığı	0.4-0.5 g/cc
Kristallenme Derecesi (X-ray)	%55-%60
Nem Yeniden Kazanımı (%65 RH)	%13.8
Nem Yeniden Kazanımı (%100 RH)	%36
Su Tutma Kapasitesi	%500
Kopma Uzaması	%1-%1.8

Su

Bu çalışmada, Çorlu şebeke suyu kullanılmıştır.

Metot

3 birim standart kum, 1 birim çimento ve 0.5 birim su ve hacimce %0, %0,5, %1 oranlarında jüt lifleri karışıma ilave edilerek toplam 45 harç numunesi hazırlanmıştır (Şekil 3). Karışımlara ait malzeme miktarları Tablo 3' te verilmiştir. Jüt liflerinin uzunluk ve oranlarının harç üzerinde etkilerini gözlemlemek amacıyla ise yayılma tablası deneyi, 3., 7. ve 28. günlerde basınç ve eğilme dayanım deneyleri yapılmıştır.

Şekil 3. Üretilen Harçlar



Tablo 3. Karışım Miktarları

Numune Kodu	Lif oranı (Hacimce)	Çimento	Standard kum	Su	Lif miktarı	Lif uzunluğu
	%	g	g	g	g	mm
Referans	0	450	1350	225	0	-
J10-%0,5	0,5	450	1350	225	6,39	10
J10-%1	1	450	1350	225	12,78	10
J20-%0,5	0,5	450	1350	225	6,39	20
J20-%1	1	450	1350	225	12,78	20

Kısaltmalar:

Referans =Jüt lifi içermeyen numune=450 g çimento+1350 gr Standard kum+225 g su

J10-%0,5=450 g çimento+1350 gr Standard kum+225 g su+6.39 gr 10 mm uzunlukta jüt lifi (Hacimce %0.5)

J10-%1=450 g çimento+1350 gr Standard kum+225 g su+12.78 gr 10 mm uzunlukta jüt lifi (Hacimce %1)

J20-%0,5=450 g çimento+1350 gr Standard kum+225 g su+6.39 gr 20 mm uzunlukta jüt lifi (Hacimce %0.5)

J20-%1=450 g çimento+1350 gr Standard kum+225 g su+12.78 gr 20 mm uzunlukta jüt lifi (Hacimce %1)

Yayılma Tablası Deneyi

TS EN 1015-3 (TS EN 1015-3, 2000) standardına uygun olarak harçlara yayılma tablası deneyi yapılmıştır (Şekil 4).

Şekil 4. Yayılma Tablası Deneyi



Basınç ve Eğilme Dayanım Deneyi

3., 7. ve 28.günlerde üretilen numuneler üzerinde TS EN 196-1 (TS EN 196-1, 2016) standardına uygun olarak basınç ve eğilme dayanım deneyleri gerçekleştirilmiştir (Şekil 5).

Şekil 5. (a) Eğilme Deneyi (b) Basınç Deneyi



(a)



(b)

Bulgular ve Tartışma

Yayıma Tablası Deneyi

Yayıma tablası sonuçları Tablo 4’ te verilmiştir. Bu sonuçlar, jüt lifi katkısının taze harcın işlenebilirliği üzerindeki etkisini ortaya koymaktadır. Tablo 4’de görüldüğü üzere, referans numunesinin yayılma değeri 17 cm olarak ölçülmüşken, %0.5 ve %1 oranlarında jüt lifi eklenen numunelerde bu değer belirgin şekilde azalmıştır. Özellikle J10-%1 ve J20-%1 kodlu numunelerde sırasıyla 9.5 cm ve 8.5 cm’lik yayılma değerleri gözlemlenmiştir. Bu durum, lif oranı arttıkça karışımın viskozitesinin arttığını ve yayılma değerlerinde azalmalara sebebiyet verdiğini göstermektedir. Ayrıca, lif oranlarının aynı oranda olduğu örneğin J10-%5 ve J20-%5 numuneleri kıyaslandığında, J20-%5’ in daha düşük yayılma değeri göstermesi, lif uzunluğunun işlenebilirlik açısından etkili olabileceğine işaret etmektedir.

Tablo 4. Taze haldeki numunelerin yayılma değerleri

Numune kodu	Yayıma Değeri (cm)
Referans	17
J10-%0,5	11.5
J10-%1	9.5
J20-%0,5	10.5
J20-%1	8.5

Bu veriler, lif katkısının işlenebilirliği olumsuz yönde etkilediğini, ancak bu etkinin karışımdaki diğer parametrelerle birlikte değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Dolayısıyla jüt lifi katkısı yapılacak uygulamalarda hem oran hem de karışım tasarımı dikkatle optimize edilmelidir.

Basınç ve Eğilme Dayanımı

Tablo 5’ te referans ve farklı uzunluk ve katkı oranlarına sahip dört farklı numunenin 3, 7 ve 28 günlük eğilme ve basınç dayanımı sonuçları verilmiştir.

Tablo5. Numunelere ait basınç ve eğilme dayanımı sonuçları

Numune kodu	Eğilme Dayanımı (MPa)			Basınç Dayanımı (MPa)		
	3. gün	7. gün	28.gün	3. gün	7. gün	28.gün
Referans	6,2	6,9	7,9	25,5	33,5	45,2
J10-%0,5	5,8	6,3	7,2	22,3	32,2	40,1
J10-%1	4,3	4,9	5,6	18,1	28,4	36,4
J20-%0,5	5,1	6,0	6,7	21,5	28,9	37,2
J20-%1	4,1	4,7	5,1	15,7	25,8	31,7

Tablo 5’ e göre, referans numunesi, eğilme dayanımı deneyinde 3. günde 6,2 MPa, 7. günde 6,9 MPa ve 28. günde 7,9 MPa’ lık eğilme dayanımı göstermiştir. Ayrıca, J10-%0,5 numunesi, 28. günde 7.2 MPa ile referans numunesinden sonra en yüksek eğilme dayanımı göstermiştir. Bu değer, referans numuneye kıyasla yaklaşık %8 oranında bir azalışa işaret etmektedir. J10-%1 numunesinde ise 28. günde eğilme dayanımı 5,6 MPa olup, lif oranının artmasıyla eğilme dayanımında düşüş yaşandığını görülmektedir. J20-%1 numunesi, lif oranının ve lif uzunluğunun artmasıyla birlikte daha düşük eğilme dayanımı göstermiştir. Özellikle J20-%1 numunesi 28. günde 5,1 MPa ile en düşük eğilme dayanım değerini vermiştir. Bu sonuçlar, düşük oranlı jüt lifinin eğilme dayanımını düşürdüğünü, ancak jüt lif oranının ve uzunluğunun artmasıyla bu etkinin daha da kötüleştiğini göstermektedir.

Basınç dayanımı açısından Tablo 5 incelendiğinde, referans numunesinin 3. günde 25,5 MPa, 7. günde 33,5 MPa ve 28. günde 45,2 MPa’ lık basınç dayanımı verdiği görülmektedir. J10-%0,5 numunesi, 28. günde 40,1 MPa ile referans numuneye göre yaklaşık

%11 daha düşük basınç dayanımı göstermiştir. J10-%1 numunesinde ise bu düşüş daha belirgin olup (36,4 MPa), jüt lif oranının artışı ile dayanımda düşüş meydana gelmiştir. J20-%0,5 ve J20-%1 numunelerinde 28. gün basınç dayanımlarının sırasıyla 37,2 MPa ve 31,7 MPa olduğu Tablo 5' te görülmektedir. Bu basınç dayanım değerleri, referans numuneye kıyasla sırasıyla yaklaşık %18 ve %30 oranında daha düşüktür. Bu sonuçlar jüt lifinin uzunluk ve oranı arttıkça referans numuneye göre basınç dayanımında belirgin bir düşüş meydana getirdiğini göstermektedir. Özellikle J20-%1 numunesi hem eğilme hem de basınç dayanımı açısından olumsuz etkiler yaratmıştır.

Sonuç

- Eğilme dayanımı açısından, J10%0,5 numunesi daha fazla oran ve uzunlukta jüt lifi içeren numunelere kıyasla olumlu etki göstermektedir.
- Basınç dayanımı açısından ise tüm lif içeren numuneler referans numuneye göre daha düşük performans sergilemişlerdir.
- Jüt lifinin oranının artması, hem eğilme hem de basınç dayanımı üzerinde olumsuz etki yaratmaktadır.

Sonuç olarak, jüt lifinin harç içerisinde uygun oran ve uygun uzunluk seçiminin son derece kritik olduğu söylenebilir.

Kaynakça

Acar, C. T., & Ramyar, K. (2024). Ham Perlit agregasının betonun mekanik ve taşınım özelliklerine etkisi. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 30(3), 386-394.

Ali, M., Liu, A., Sou, H., & Chouw, N. (2012). Mechanical and dynamic properties of coconut fibre reinforced concrete. Construction and Building Materials, 30, 814-825.

Araz, N. G., Aksoy, A., İskender, E., & Sayın, A. (2018). Beton Üretiminde Bazalt Fiber Kullanımının Değerlendirilmesi. 9. Kıyı Mühendisliği Sempozyumu.

Arslan, E., & Sarıkaya, H. (2021). Farklı Boyutlardaki Poliamid, Poliester ve Jüt Liflerinin Betonun Mekanik Davranışına Etkisi. Uşak Üniversitesi Fen ve Doğa Bilimleri Dergisi, 5(1), 30-49.

Avacı, H., Üreyen, M. E., Kılıç, A., Sağlam, A. E., vd. (2019). Güç tutuşur polipropilen polimeri ve lif uygulamalarında son gelişmeler ve gelecek beklentileri. Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 24(2), 609-632.

Aygen, A. (2024). Ultra yüksek performanslı beton içeren kirişlerin kesme davranışında karma çelik lif kullanımının etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi, Türkiye.

Bentur, A., Mindess, S., (1990). Fiber Reinforced Cementitious Composites, Elsevier Applied Science, London.

Bilgili, M. E., Süllü, S., & Sevilmiş, U. (2018). Jüt tarımı ve mekanizasyonu. Bahri Dağdaş Bitkisel Araştırma Dergisi, 7(2), 66-75.

Bulut, G. ve Özer, M. A. (2024). Ekolojik modernleşmeye iklim değişikliği ve “çevresel ayak izleri” üzerinden bakmak.

Çankırı Karatekin Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, 14(3), 752-778.

Cengiz, A. (2015). İnşaat endüstrisine yönelik doğal elyaf katkılı kompozit malzemelerin hazırlanması. Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Çivici, F., & Güngör, E. (2016). Karma lifli betonların tokluk açısından değerlendirilmesi. Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi, 7(3), 365-376.

Dayananda, N., Keerthi Gowda, B. S., & Easwara Prasad, G. L. (2018, June). A study on compressive strength attributes of jute fiber reinforced cement concrete composites. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Vol. 376, p. 012069). IOP Publishing.

Demirel, B., & Gönen, T. (2008). Yüksek sıcaklığın karbon lif takviyeli hafif betonda basınç dayanımı ve poroziteye etkisi. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 14(2), 223-228.

Ekincioglu, Ö., (2022). Karma lif içeren çimento esaslı kompozitlerin mekanik davranışının incelenmesi”. Sika Teknik Bülten.

Engineering Design Handbook-Discontinuous Fiberglass Reinforced Thermoplastics:(DARCOM-P 706-314), U.S. Army Materiel Command, (1981)

Eser, N. S., & Ayhün, S. E. Disiplinlerarası yaklaşımlarla sürdürülebilir çevre. Lyon 2024

Eryilmaz, O. (2017). Karbon lif takviyeli kompozit yapıların mekanik özelliklerinin geliştirilmesi. Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Farias, L. D. N., Lima, P. R. L., & Filho, R. D. T. (2024). Short Jute Fiber Reinforced Cement Mortar for Out-of-Plane Strengthening of Masonry Prisms. *Sustainability*, 16(13), 5675.

Gelişen, G., & Guzelkokar, O. (2019). Mevcut yapıların sürdürülebilir yeşil binalara dönüştürülmesi. *Ulusal Çevre Bilimleri Araştırma Dergisi*, 2(2), 76-90.

Grzybowski, M., Shah, S.P. (1990). Shrinkage cracking of fiber reinforced concrete. *Materials Journal*, 87(2), 138-148.

Gülan, L., Yıldız, S., & Keleştemur, O. (2016). Atık mermer tozu ve cam lif katkılı betonun mekanik ve fiziksel özellikleri üzerine karbonatlaşmanın etkisi. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 28(2), 189-200.

Halilov, S. (2003). Silis Dumanı ve Süper Akışkanlaştırıcı Katkılı Lifli Betonların Özellikleri. *Doktora Tezi. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.*

İlhan, R., & Feyzullahoğlu, E. (2019). Cam elyaf takviyeli polyester (CTP) kompozit malzemelerde kullanılan doğal elyaflar ve dolgu maddeleri. *El-Cezeri*, 6(2), 355-381.

İskender, M., & Karasu, B. (2018). Cam lif takviyeli beton (GFRC). *El-Cezeri*, 5(1), 136-162.

Kanbak, C., Ozcanan, S., Akpınar, M. V., & Atahan, A. (2023). Lif takviyeli beton yol kaplamalarının dinamik yük altındaki yorulma davranışının incelenmesi. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 13(4), 1009-1018.

Kara, C. (2018). Çay atığının doğal lif olarak betonda kullanılabilirliği. *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*, 4(2), 156-161.

Khan, M. B., Shafiq, N., Waqar, A., Radu, D., Cismaş, C., Imran, M., ... & Benjeddou, O. (2023). Effects of jute fiber on fresh

and hardened characteristics of concrete with environmental assessment. *Buildings*, 13(7), 1691.

Kozak, M. (2013). Çelik lifli betonlar ve kullanım alanlarının araştırılması. *Teknik Bilimler Dergisi*, 3(1), 26-35.

Liu, L., Wang, X., Chen, H., Wan, C. (2016). Microstructure-based modelling of drying shrinkage and microcracking of cement paste at high relative humidity, *Construction and Building Materials*. 126, 410–425.

Majumder, A., Stochino, F., Frattolillo, A., Valdes, M., Mancusi, G., & Martinelli, E. (2023). Jute fiber-reinforced mortars: mechanical response and thermal performance. *Journal of Building Engineering*, 66, 105888.

Mardani-Aghabaglou, A., Altun, M. G., & Yılmaz, G. Polipropilen Lif Kullanım Oranının Beton Karışımlarının Dayanımına Etkisi. XX. Ulusal mekanik kongresi, 05-09 Eylül 2017, Uludağ Üniversitesi, Bursa.

Mutlu, S. (2012). Jüt lifi ve tekstil-hazır giyim sektöründe kullanım alanları. *Akdeniz Sanat*, 4(8).

Nasery, M. M., Ağcakoca, E., & Yaman, Z. (2020). Lif Katkılı Betonlarda Fiber Oranının Basınç Dayanımına Etkisinin Deneysel ve Nümerik İncelenmesi. *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 7(2), 850-862.

Özcan, U., & Güngör, S. (2019). Sürdürülebilir bir yöntem/betonda puzolan kullanımı. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (15), 176-182.

Serin, S., Macit, M. E., Çınar, E. C., & Çelik, S. (2018). Doğal kenevir lifi kullanımının asfalt beton karışımlara etkisi. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 6(4), 732-744.

Shah, S. P., Marikunte, S. (1995). Extruded fiber-reinforced composite. American Concrete Institute, 17(4), 48-53.

Şenol, A. F. (2022). Beton Teknolojisinde Lif Türleri ve Lif Takviyeli Betonların Özellikleri. Mühendislik Biliminde Güncel Tartışmalar.

Şimşek O., Beton ve Beton Teknolojisi. Seçkin Yay. San. ve Tic. A.Ş., Ankara, 2004

Şimşek, O., Toklu, K., & Ünal, M. T. (2021). Çelik liflerin geometrik şeklinin ve oranının beton özelliklerine etkisinin araştırılması. Politeknik Dergisi, 24(2), 409-415.

Taşdemir M.A., Kocatürk, A.N., Haberveren, S. ve Aslan, G., (2005). “Özel Prefabrike Elemanların Ultra Yüksek Performanslı Betonlarla Üretimi”, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, 6. Ulusal Beton Kongresi-Yüksek Performanslı Betonlar, 16-18, 447- 457, İstanbul.

Topçu, İ. B., & Uygunoğlu, T. (2021). Yapı Malzemesi. Nobel Akademik Yayıncılık.

Tufan, M. Z., & Özel, C. (2012). Sürdürülebilirlik kavramı ve yapı malzemeleri için sürdürülebilirlik kriterleri. Uluslararası sürdürülebilir mühendislik ve teknoloji dergisi, 2(1), 6-13.

TS EN 196-1. (2016). Çimento Deney Metotları-Bölüm 1: Dayanım tayini. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara

TS EN 1015-3. (2000). Kagit Harcı- Deney Metotları- Bölüm 3: Taze Harç Kıvamının Tayini (yayılma tablası ile). Türk Standartları Enstitüsü. Ankara.

URL-1: <https://www.thbbakademi.org/yapi-malzemelerinde-nanoselulozun-kullanimi/> son erişim tarihi:24.04.2025

Ünal, O., Uygunoğlu, T., & Gençel, O. (2011). Çelik Liflerin Beton Basınç Ve Eğilme Özelliklerine Etkisi. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 13(1), 23-30.

Yaprak, H., Şimşek, O., & Öneş, A. (2004). Cam ve Çelik Liflerin Bazı Beton Özelliklerine Etkisi. Politeknik Dergisi, 7(4), 353-358.

Yıldız, S., Bölükbaş, Y., & Keleştemur, O. (2010). Cam elyaf katkısının betonun basınç ve çekme dayanımı üzerindeki etkisi. Politeknik Dergisi, 13(3), 239-243.

Yıldız, S., & Ulucan, Z. Ç. (2008). Beton borularda cam lif katkısının tepe yük dayanımına etkisinin araştırılması. Journal of the Faculty of Engineering & Architecture of Gazi University/Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 23(2).

BÖLÜM 2

KOCAELİ KÖRFEZ DENİZ KATI ATIKLARININ BAĞLAYICI MALZEME OLARAK GEOPOLİMER KOMPOZİT ÜRETİMİNDE DEĞERLENDİRİLMESİ

ÖZLEM TAŞTEMÜR¹
MÜCTEBA UYSAL²

Giriş

Beton; yüksek dayanım ve dayanıklılık, uygulama esnasında kolay şekil alma, kalıplanmasının kolay olması ve diğer yapı malzemelerine kıyasla maliyetinin daha az olması gibi özelliklerinden dolayı inşaat sektöründe dünyada en fazla kullanılan yapı malzemelerinden biridir (Habert, d'Espinose de Lacaillerie, & Roussel, 2011; Younis, K.H., 2021). Ayrıca nüfusun artmasının da bir etkisi olarak beton, suyun ardından en çok kullanılan malzemedir. Beton üretiminde bağlayıcı malzeme olarak çimento kullanılmaktadır. Çimento, kalker ve kilin homojen ve uygun oranlarda karıştırıldıktan sonra yüksek sıcaklıkta (1400-1600)

¹ Yüksek Lisans Öğrencisi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Yapı Malzemeleri Programı, Orcid: 0009-0009-5691-8770

² Prof. Dr., Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği, Orcid: 0000-0002-6827-9904

yakılması sonucunda üretilir (Akbulut, F.,2021). Çimentonun üretimi için yüksek sıcaklığın gerekli olması, üretim esnasında yüksek enerji tüketimini meydana getirmektedir. Çimentonun kalsine işlemi büyük miktarda karbondioksit salınımına yol açmaktadır (Nawaz M, Heitor A, Sivakumar M., 2020). Bunların yanı sıra üretiminde doğal hammaddelerin kullanılması, doğal kaynaklarımızın gün geçtikçe azalması açısından bir tehdit oluşturmaktadır. Bütün bu sorunlar göz önüne alındığında, inşaat yapım uygulamalarında çimento üretiminin azaltılması ve alternatif bağlayıcı malzemeler olarak daha çevreci ve sürdürülebilir malzemelerin kullanılabilirliğinin araştırılması ihtiyacı ortaya çıkmıştır. Bu sebeple araştırmacılar, beton üretiminde bağlayıcı malzeme olarak geleneksel çimento yerine daha sürdürülebilir malzeme olan geopolimer harçlara yönelmişlerdir. Geopolimerler çeşitli alüminosilikat kaynaklarından sentezlenebilen inorganik polimerik malzeme türüdür (Davidovits J., 1991). Geopolimer harçların üretiminde pirinç kabuğu külü, kaolin, metakaolin gibi doğal olarak meydana gelen malzemeler kullanılabileceği gibi seramik tozu ve yüksek fırın cürufu gibi alümina ve silikat bakımından zengin olan endüstriyel atıklar da kullanılmaktadır. Ayrıca geopolimerler geleneksel beton ile karşılaştırıldığında; yüksek erken dayanım, yüksek sıcaklığa ve aşınmaya direnç göstermeleri gibi üstün özelliklere sahiptir (Van Deventer JSJ, Provis JL, Duxson P.,2012., Provis JL, Bernal SA., 2014).

Geopolimer kompozitlerin tokluğunu arttırmak ve kompozitin mekanik özelliklerini iyileştirmek amacıyla araştırmacılar lifler kullanmaktadır. Yaygın bir şekilde kullanılan lifler arasında organik polimer lifler ve inorganik lifler yer almaktadır. Organik lifler arasında PVA (polivinil alkol) lifleri bulunur (Shaikh, FUA; Patel, A.,2018).

Yapılan bir çalışmada PVA lif kullanılarak üretilen betonun dinamik özelliklere karşı etkisi araştırılmıştır. Üretimlerde PVA lif

hacimce %0,25 ve %0,50 oranlarında kullanılmıştır. Harçlarda bağlayıcı malzeme olarak Portland çimentosu ve uçucu kül kullanılmıştır. 28 günlük numuneler üzerinde testler yapılmıştır. %0,25 oranında PVA lifli kullanılan numunelerin mekanik özelliklerinde artış görülmüştür. Ancak bu numunelerin malzeme sönümlemeye karşı fazla bir etkisinin olmadığı görülmüştür (Noushini A., Samali B., Vessalas K., 2013).

Bazalt fiber inorganik bir liftir. Bazalt fiberin mukavemet özellikleri iyidir ve ısı işlemlere karşı direnci yüksektir (Zheng YX, Zhang Y, Zhuo JB, Zhang YM, Wan C. A., 2022). Ayrıca bazalt fiberin aşınmaya karşı direnci de yüksektir (Monaldo E, Nerilli F, Vairo G., 2019). Yapılan bir araştırmada, karışıma hacimce %0,3, %0,8, %1,3 ve %1,8 oranlarında bazalt fiber eklenmiş ve üretilen numunelerin mekanik özellikleri incelenmiştir. İçerisinde lif olan numunelerin eğilme dayanımlarının daha yüksek olduğu görülmüştür (Deb S., 2012).

Geopolimerin çatlama davranışı üzerinde etkili olan mikro çelik lifler, özellikle eğilme davranışı altındaki gerilmelerin absorbe edilmesinde önemli rol oynar. Zhang ve arkadaşlarının (2021) yaptıkları çalışma sonucunda, liflerin homojen olarak dağılması ile yalnızca mukavemet artışı değil aynı zamanda kırılma tokluğunda da önemli gelişmeler elde edilmiştir. Liflerin geopolimer içerisindeki varlığı, çatlak ilerlemesini sınırlandırarak malzemenin kırılmadan önce daha çok deformasyon taşımasını sağlamaktadır (Zhang, P., Wang, J., Li, Q., Wan, J., & Ling, Y., 2021).

Deniz dibinde yer alan tarama malzemeleri, su yollarının derinliğini artırabilmek amacıyla denizin dibinden çıkarılan malzemelerdir. Bu malzemeler genellikle atık olarak kabul edilmektedir. Bu malzemelerin çevresel sorunlara yol açtığı bilinmektedir. Ancak son yıllarda bu malzemelerin inşaat sektöründe hammadde olarak kullanılabilirliği ile ilgili araştırmalar yapılmakta

ve çalışmalar sürdürülmektedir (Zouch et al., 2022; Brahim et al., 2022).

Limanlarda veya su kanallarında yapılan tarama çalışmaları ile atık malzeme olarak kabul edilen tortul tabakanın yönetilmesi dünya da birçok ülkede çözülmesi gerekli önemli bir konudur. Temiz ve taranmış olan bu atık malzemeler; havaalanı ve yol gibi yerlerde inşaat dolgu malzemesi olarak, tuğla veya asfalt imalatında katkı maddeleri olarak kullanılabilir. (Lirer S, Liguori B, Capasso., 2017).

Yapılan bir çalışmada Tunus'taki iki limandan elde edilen deniz dibindeki tarama malzemeleri geopolimer harç erisinde %10 ve %25 arasında bağlayıcı malzeme olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır. Araştırmadan elde edilen sonuçlara göre deniz dibinden elde edilen bu tarama malzemelerinin geopolimer harç erisinde kullanımı, geopolimer harcın performansını iyileştirebileceğini göstermektedir (Zouch, A., Mamindy-Pajany, Y., Bouchikhi, A. ,2022).

Başka bir çalışmada volkanik kökenli Sidoarja amurunun tane boyutuna bağlı olarak geopolimer harcın özelliklerini etkilediği görülmüştür. Daha ince tane boyutuna sahip malzemenin geopolimer harcın basınç dayanımını iyileştirdiği görülmüştür (Hardjito et al., 2014).

Kocaeli İzmit körfezinden 15 m derinliğe kadar msilaja da sebep olduğu düşünülen dip çamurunun çıkartılması çalışmaları yaklaşık olarak bir yıldır devam etmektedir. Saha çalışmalarında çıkartılan çamurun süreklilik oluşturduğu ve genelde aynı türde olduğu görülmüştür. İZAYADAş tarafından ağır metal analiz sonuçları için sunulan raporda, ağır metallerin tehlike seviyesinde olmadığı ve alandan çıkartılan çamurun kullanılabilir olduğunu göstermektedir. Laboratuvar çalışmalarında körfezden çıkartılan çamurun yaklaşık olarak %40 oranında tuzlu su içerdiği görülmüştür. Yapılan çalışmada çamurun beton içerisinde katkı

malzemesi olarak kullanılmasının mümkün olduğu gör÷lmektedir (Yıldırım S., 2025).

Bu çalışmada amaç, Kocaeli-İzmit körfezinde bulunan çamuru geopolimer harç üretiminde değerlendirmektir. Dip çamurunun geopolimer kompozit içerisinde bağlayıcı malzeme olarak kullanılması ile çimentonun üretimi sonucu meydana gelen CO₂ salınımını azaltmaktır. Aynı zamanda çimentonun üretimi sırasında ortaya çıkan enerji kaybını azaltmaktır. Çalışma, endüstriyel atıkların geopolimer harç içerisinde kullanılmasının yanı sıra dip çamurunun geri dönüşüme kazandırılması açısından da sürdürülebilir ve çevreci bir araştırma niteliği taşımaktadır.

Malzeme ve Yöntem

Geopolimer Harç Üretiminde Kullanılan Malzemeler

Bu çalışmada bağlayıcı malzeme olarak yüksek fırın cürufu ve dip çamuru, kimyasal aktivatör olarak sodyum hidroksit (NaOH) ve sodyum silikat (Na₂SiO₃), ince agrega olarak granülometrisi 4 mm'nin altında doğal kum kullanılmıştır. Geopolimer kompozitin mekanik özelliklerini iyileştirmek amacıyla polivinil alkol (PVA) lifi, bazalt fiber ve mikro çelik lif kullanılmıştır.

Öğüt÷lmüş granüle yüksek fırın cürufu (GBFS) demir fabrikalarında, yüksek sıcaklıklarda demirin üretilmesi sonucu ortaya çıkan bir endüstriyel atık malzemesidir. İnce bir şekilde öğüt÷lmüş cürufun geopolimer harç içerisinde kullanılması harcın özelliklerini iyileştirmesini sağlar. Betonun performansını iyileştirip, beton dayanımını arttırmasının yanı sıra endüstriyel atık malzemesinin sürdürülebilir yapı malzemesi olarak değerlendirilmesi ile de çevreye olumlu katkı sağlar. Cürufun rengi genellikle açık renklidir. Yüksek fırın cürufunun yoğunluğu yaklaşık olarak 2.9 g/cm³'tür. Çalışmada harç içerisinde kullanılacak olan cürufun nem almamasına özen gösterilip laboratuvar da paletler üzerinde muhafaza edilmiştir.

Deneyssel çalışmada bağlayıcı malzeme olarak kullanılan dip çamuru, Kocaeli-İzmit körfezi depolama alanından getirilmiştir. Kocaeli körfezinden elde edilen dip çamurunun yapısında organik ve inorganik bileşenler yer almaktadır. Nem oranı yüksektir ve rengi koyu siyahtır. Öncelikle çamurlar ince bir tabaka halinde tepsilere serilmiştir. Tepsiler 105 derece etüvde yaklaşık 72 saat kurutma işlemine tabi tutulmuştur. Ardından Los Angeles kırma aletinde malzeme öğütülmüştür. Son olarak ise malzeme 90 mikronluk elekte eleme işlemine tabi tutularak ince toz haline getirilmiştir. Elde edilen toz malzeme laboratuvarında beton karıştırıcı mikserde homojen bir toz karışımı elde etmek amacıyla karıştırılmıştır. Daha sonra dip çamurundan elde edilen toz malzeme nem geçirmeyen paketler içerisine konulup muhafaza edilmiştir.

Geopolimerizasyon sürecinde alkali aktivatörler önemli bir yere sahiptir. Çalışmada alkali aktivatörler olarak sodyum hidroksit (NaOH) ve sodyum silikat (Na_2SiO_3) kullanılmıştır. Sodyum hidroksit kuvvetli bazik bir bileşiktir. Bu bileşik geopolimer harç üretiminde kimyasal aktivatör olarak kullanılmaktadır. Sodyum hidroksit (NaOH) başlangıçta susuz ve toz formdadır. Rengi beyazdır. Sodyum hidroksitin yoğunluğu $2,13 \text{ g/cm}^3$ 'tür. Ortamdan nem alabilen bu bileşik suda kolay bir şekilde çözünebilir. Üretimlerde kullanılacak molariteye uygun olarak NaOH'in su içerisinde çözülmesi gerekir. Sodyum hidroksit su içerisinde çözülüp 24 saat bekledikten sonra geopolimer harç üretiminde kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan sodyum silikat bileşeni ise renksiz ve sıvı formdadır. Na_2SiO_3 , yarı viskoz bir yapıdadır. Sodyum silikatın içerisinde bulunan silis, karışımın dayanımını ve işlenebilirliğini artırmaktadır. Sodyum silikatın yoğunluğu $2,4 \text{ g/cm}^3$ 'tür.

Geleneksel betondaki gibi geopolimer haç üretiminde de agregalar, karışım tasarımıda önemli bir yer tutar. Karışımın hacimce büyük bir bölümünü agregalar oluşturur. Çalışmada

geopolimer harç üretiminde standartlara uygun özelliklere sahip doğal kum kullanılmıştır.

PVA lifi mühendislikte betonarme yapılarda ve lif takviyeli beton sistemlerinde kullanılan sentetik bir lif türüdür. Bu deneysel çalışmada PVA kullanımı ile, geopolimer kompozitin mekanik özelliklerini iyileştirmek, dayanıklılığı ve çekme dayanımını artırmak amaçlanmıştır. Kullanılan PVA lifinin yoğunluğu 1.3 g/cm^3 'tür ve beyaz renktedir. PVA geopolimer harç karışımı içerisinde hacimce %0,4, %0,8 ve %1,2 oranlarında kullanılmıştır.

Bazalt Fiber volkanik bazalt kayasının yüksek sıcaklıklarda eritilmesi sonucunda, lif haline getirilmesi ile elde edilir. Yüksek sıcaklığa dayanıklı bir lif türüdür. Geopolimer harç numuneleri içerisindeki mikro çatlakları önlemesi amaçlanmıştır. Kullanılan bazalt fiberin yoğunluğu 2.73 g/cm^3 'tür. Çalışma kapsamında bazalt fiber, geopolimer harç karışımı içerisinde hacimce %0,4, %0,8 ve %1,2 oranlarında kullanılmıştır.

Mikro çelik lif, çok ince bir kesite sahip tellerdir. Mikro çelik lifin yoğunluğu 7.85 g/cm^3 'tür. Çalışmada mikro çelik lif geopolimer harç karışımı içerisinde hacimce %0,4, %0,8 ve %1,2 oranlarında kullanılmıştır.

Şekil 1- Tepsilere serilen çamurlar



Şekil 2- Etüvden çıkarılan kurutulmuş dip çamuru



Şekil 3- 90 mikronluk elekte öğütülmüş dip çamuru



Karışım Tasarımı

Karışım Oranlarının Belirlenmesi

Ön deney aşamasında farklı karışım oranları ile üretimler yapılmıştır. Dip çamurunun agrega olarak kullanıldığı ön üretimlerde; dip çamuru %25 oranında ve kum %75 oranında karışım tasarımı kullanılmıştır. Bu üretimin harç aşamasındayken işlenebilirliğinin düşük olduğu gözlemlenmiştir. Bu üretimlerden elde edilen numunelere eğilme ve basınç deneyi yapıldığında sonuçların yeterli olmadığı görülmüştür. Bundan dolayı dip çamurunun geopolimer harç üretiminde agrega olarak kullanılmasının uygun olmadığı sonucuna varılmıştır.

Dip çamurunun bağlayıcı malzeme olarak kullanıldığı ön üretim numuneleri üzerinde eğilme ve basınç deneyleri yapılmış ve elde edilen sonuçlara göre en iyi mekanik performans gösteren harç karışımı optimum karışım olarak belirlenmiştir. Üretilen numuneler 60 °C- 80 °C – 100 °C etüvlerde bir gün boyunca bekletilmiştir. En

iyi mekanik dayanım sonuçları 100 °C etüve bırakılan numunelerde gözlemlenmiştir.

Deneysel çalışmada esas bağlayıcı malzeme olarak %75 oranında yüksek fırın cürufu ve ikame malzemesi olarak ağırlıkça %25 oranında dip çamuru kullanılmıştır. Alkali/bağlayıcı oranı 0,7 olarak belirlenmiştir. Agrega/bağlayıcı oranı 2,5 olarak seçilmiştir. Optimum NaOH konsantrasyonu 12M, sodyum hidroksit miktarı ve sodyum silikat miktarı arasındaki oran 1:2 olarak belirlenmiştir. Lif kullanılan geopolimer harç numunelerinde hacimce %0,4, %0,8 ve %1,2 oranlarında polivinil alkol (PVA), bazalt fiber ve mikro çelik lif kullanılmıştır. Etüv kür sıcaklığı 100 derece, etüv kür süresi 24 saat olacak şekilde belirlenmiştir.

Tablo 1’de karışım kodlarının açıklaması yer almaktadır. Tablo 2’de bu çalışmada %25 ve %50 oranlarında kullanılan dip çamurunun karışım içerisindeki oranları yer almaktadır.

Tablo 1- Karışım kodlarının adlandırılması

Karışım İsmi	Açıklama
R	Referans Üretimi (karışım içerisinde %100 yüksek fırın cürufunun kullanıldığı üretim)
DÇ25	Karışım içerisinde bağlayıcı malzeme olarak %25 dip çamurunun ve %75 yüksek fırın cürufunun kullanıldığı üretim
DÇ50	Karışım içerisinde bağlayıcı malzeme olarak %50 dip çamurunun ve %50 yüksek fırın cürufunun kullanıldığı üretim

Tablo 2- 1 m³ Hacim İçin Karışım Oranları

Seriler	a/b Oran	YFC (kg)	DÇ (kg)	A (kg)	NaOH (kg)	Na ₂ SiO ₃ (kg)	Toplam (kg)
R	0.70	585.94	0	1464.85	136.72	273.44	2460.95
DÇ25	0.70	439.46	146.48	1464.85	136.72	273.44	2460.95
DÇ50	0.70	292.97	292.97	1464.85	136.72	273.44	2460.95
DÇ25	0.75	439.46	146.48	1464.85	146.49	292.98	2490.26
DÇ50	0.75	292.97	292.97	1464.85	146.49	292.98	2490.26

* R (%100 YFC), DÇ25 (%75 YFC + %25 DÇ), DÇ50 (%50 YFC + %50 DÇ)

Tablo 3’de karışım kodlarının açıklaması yer almaktadır. Tablo 4’de bu çalışma kapsamında hacimce %0,4, %0,8 ve %1,2 oranlarında kullanılan PVA lifi, bazalt fiber ve mikro çelik lifinin karışım içerisindeki oranları yer almaktadır.

Tablo 3- Karışım kodlarının adlandırılması

Karışım İsmi	Açıklama
PVA0,4-DÇ25	Karışım içerisinde hacimce %0,4 oranında PVA lifinin kullanıldığı ve bağlayıcı malzeme olarak %25 dip çamuru ve %75 yüksek fırın cürufu kullanılan üretim
BZ0,4-DÇ25	Karışım içerisinde hacimce %0,4 oranında bazalt fiberin kullanıldığı ve bağlayıcı malzeme olarak %25 dip çamuru ve %75 yüksek fırın cürufu kullanılan üretim
MÇ0,4-DÇ25	Karışım içerisinde hacimce %0,4 oranında mikro çelik lifinin kullanıldığı ve bağlayıcı malzeme olarak %25 dip çamuru ve %75 yüksek fırın cürufu kullanılan üretim
PVA0,8-DÇ25	Karışım içerisinde hacimce %0,8 oranında PVA lifinin kullanıldığı ve bağlayıcı malzeme olarak %25 dip çamuru ve %75 yüksek fırın cürufu kullanılan üretim
BZ0,8-DÇ25	Karışım içerisinde hacimce %0,8 oranında bazalt fiberin kullanıldığı ve bağlayıcı malzeme olarak %25 dip çamuru ve %75 yüksek fırın cürufu kullanılan üretim
MÇ0,8-DÇ25	Karışım içerisinde hacimce %0,8 oranında mikro çelik lifinin kullanıldığı ve bağlayıcı malzeme olarak %25 dip çamuru ve %75 yüksek fırın cürufu kullanılan üretim
PVA1,2-DÇ25	Karışım içerisinde hacimce %1,2 oranında PVA lifinin kullanıldığı ve bağlayıcı malzeme olarak %25 dip çamuru ve %75 yüksek fırın cürufu kullanılan üretim
BZ1,2-DÇ25	Karışım içerisinde hacimce %1,2 oranında bazalt fiberin kullanıldığı ve bağlayıcı malzeme olarak %25 dip çamuru ve %75 yüksek fırın cürufu kullanılan üretim
MÇ1,2-DÇ25	Karışım içerisinde hacimce %1,2 oranında mikro çelik lifinin kullanıldığı ve bağlayıcı malzeme olarak %25 dip çamuru ve %75 yüksek fırın cürufu kullanılan üretim

Tablo 4- Hacimce %0,4 Oranında PVA, Bazalt Fiber ve Mikro Çelik İçin Karışım Oranları

Seriler	a/b Oran	YFC (kg)	DÇ (kg)	A (kg)	NaOH (kg)	Na ₂ SiO ₃ (kg)	Lif (kg)	Toplam (kg)
PVA0,4-DÇ25	0.70	439.46	146.48	1464.85	136.72	273.44	5.20	2466.15
BF0,4-DÇ25	0.70	439.46	146.48	1464.85	136.72	273.44	10.92	2471.87
MÇ0,4-DÇ25	0.70	439.46	146.48	1464.85	136.72	273.44	31.40	2492.35
PVA0,8-DÇ25	0.70	439.46	146.48	1464.85	136.72	273.44	10.40	2471.35
BF0,8-DÇ25	0.70	439.46	146.48	1464.85	136.72	273.44	21.84	2482.79
MÇ0,8-DÇ25	0.70	439.46	146.48	1464.85	136.72	273.44	62.80	2523.75
PVA1,2-DÇ25	0.70	439.46	146.48	1464.85	136.72	273.44	15.60	2476.55
BF1,2-DÇ25	0.70	439.46	146.48	1464.85	136.72	273.44	32.76	2493.71
MÇ1,2-DÇ25	0.70	439.46	146.48	1464.85	136.72	273.44	94.20	2555.15

* PVA0,4-DÇ25(%0,4 PVA, %75 YFC + %25 DÇ), PVA0,8-DÇ25(%0,8 PVA, %75 YFC + %25 DÇ), PVA1,2-DÇ25(%1,2 PVA, %75 YFC + %25 DÇ), BF0,4-DÇ25(%0,4 BF, %75 YFC + %25 DÇ), BF0,8-DÇ25(%0,8 BF, %75 YFC + %25 DÇ), BF1,2-DÇ25(%1,2BF, %75 YFC + %25 DÇ), MÇ0,4-DÇ25(%0,4 MÇ, %75 YFC + %25 DÇ), MÇ0,8-DÇ25(%0,8 MÇ, %75 YFC + %25 DÇ), MÇ1,2-DÇ25(%1,2 MÇ, %75 YFC + %25 DÇ)

Numunelerin Üretilmesi ve Kür İşlemi

Çalışmada kullanılan malzemelerin oda sıcaklığında olmasına dikkat edilmiştir. Öncelikle 12M konsantrasyonunda NaOH çözeltisi hazırlanmıştır. Hazırlanmış olan NaOH çözeltisi bir gün boyunca bekletilip karışım içerisinde o şekilde kullanılmıştır. Çözelti hazırlanırken ısı açığa çıktığı için çözeltinin karışım içerisinde kullanılırken soğuk olmasına özen gösterilmiştir. Kap içerisine karışımında kullanılacak olan miktar kadar NaOH çözeltisi eklenmiştir. Üzerine kullanılan NaOH miktarının 2 katı olacak şekilde sıvı formdaki Na_2SiO_3 çözeltisi eklenmiştir. İlk olarak karıştırma mikserinde bağlayıcı malzeme olarak kullanılan YFC ve dip çamuru homojen bir karışım elde etmek amacıyla 1-2 dakika boyunca karıştırılmıştır. Üzerine hazırlanmış olan NaOH ve Na_2SiO_3 çözeltisi eklenmiştir. Karışım yaklaşık 3 dakika boyunca karıştırılmıştır. Son aşamada ise karışıma agrega eklenip 2 dakika boyunca karıştırılarak homojen bir karışım elde edilmiştir. Lif takviyeli üretimlerde ise kullanılan lifler karışım içerisine agregadan önce katılarak homojen bir karışım elde etmek amacıyla yaklaşık 1-2 dakika boyunca karıştırılmıştır. Hazırlanmış olan geopolimer harç karışımı önceden gres yağı ile yağlanmış olan 40*40*160 boyutlarındaki dikdörtgen prizma kalıplara, sarsma tablası üzerinde iki aşamada olacak şekilde sıkıştırılarak yerleştirilmiştir. Kalıplarda bir gün boyunca ortam koşullarında kür kabininde bekletilen numuneler, ertesi gün kalıplardan sökülüp 100 derece etüve bırakılmıştır. Numuneler etüvde 24 saat bekletilmiştir. 24 saatin sonunda numunelerin öncelikle oda sıcaklığında soğumaları beklenmiştir. Daha sonra numuneler deneylerin yapılacağı zamana kadar laboratuvarında kür kabininde bekletilmiştir.

Şekil 4- Üretilen geopolimer harç numuneleri



Geopolimer Harç Numunelere Uygulanan Deneyler

40*40*160 mm boyutlarındaki dip çamuru ikameli geopolimer harç numuneleri üzerinde 7 günlük eğilme ve basınç testleri yapılmıştır. Eğilme testi standarda uygun olarak eğilme test cihazında gerçekleştirilmiştir. Eğilme testi sonunda iki parçaya ayrılan numunelerin her birine basınç dayanım testi uygulanmıştır. Basınç dayanımı sonuçlarının ortalaması alınmıştır.

Şekil 5- Eğilme dayanımı testi



Şekil 6- Basınç dayanımı testi



Sonuçlar ve Tartışma

Çalışma kapsamında, Kocaeli-İzmit körfezinden elde edilmiş olan dip çamurunun yüksek fırın cürufu (GBFS) ile geopolimer kompozit üretiminde bağlayıcı malzeme olarak kullanılmasının, kompozitin fiziksel ve mekanik özelliklerine etkisi değerlendirilmiştir. Çalışmanın kapsamında %25 ve %50 oranlarında ikame edilen dip çamuru ile hazırlanan karışımların eğilme ve basınç dayanımı sonuçları 7 gün sonunda incelenmiştir. Elde edilen eğilme ve basınç dayanımı sonuçları referans üretimi ile karşılaştırılmıştır.

Referans (R-0.7) karışımında sadece %100 oranında yüksek fırın cürufu kullanılmıştır. Bu karışımında 7 günlük kür uygulaması sonunda ortalama olarak 17.50 MPa basınç dayanımı ve 1.22 Mpa eğilme dayanımı sonuçları elde edilmiştir. Elde edilen bu sonuçlar çalışmada kontrol sonuçları olarak değerlendirilmiştir. Üretimde yüksek fırın cürufunun tek başına bağlayıcı olarak kullanılması mekanik performans açısından uygun olduğunu göstermektedir.

Dip çamurunun geopolimer kompozitte bağlayıcı malzeme olarak %25 oranında kullanıldığı DÇ25-0.7 karışımında ise, referans karışımı ile karşılaştırıldığında, basınç dayanımı ve eğilme dayanımında artış olduğu gözlemlenmektedir. Bu seride basınç dayanımı ortalama 21.38 MPa ve eğilme dayanımı ise ortalama 1.26 MPa olarak ölçülmüştür. Mekanik performanstaki bu artış, dip çamurunun yüksek fırın cürufu ile bağlayıcılık oluşturabileceğini ve alümina- silikat yapısının geopolimerleşmeye katkı sağladığını göstermektedir. Ayrıca dip çamurunun karışımında %25 oranında kullanılmasının işlenebilirlik açısından da daha uygun olduğu gözlemlenmiştir. Lirer ve arkadaşları (2017) yaptıkları çalışmada atık çamur katkısının performans iyileştirme gücünü desteklediğini belirtmişlerdir. Elde edilen sonuçlara baktığımız zaman Lirer ve arkadaşlarının (2017) çalışmalarıyla örtüştüğünü göstermektedir.

Dip çamurunun bağlayıcı malzeme olarak %50 oranında kullanıldığı DÇ50-0.7 karışımında, eğilme dayanımı 1.48 MPa sonucuyla en iyi seviyeye ulaşmıştır. Ancak bu seri de basınç dayanımı ortalama 12.22 MPa olarak ölçülmüştür. Basınç dayanımı önemli oranda azalmıştır. Bu durum, karışım içerisinde dip çamurunun fazla miktarda kullanılmasının karışımdaki bağlayıcı sistemin bütünlüğünü olumsuz yönde etkileyebileceğini göstermektedir. Ayrıca çamur içerisinde yaklaşık olarak %40 oranında tuzlu su olduğu bildirilmiştir (Yıldırım, S. 2025). Çamurun içeriğindeki bu tuz oranının fazla olması karışımdaki kimyasal reaksiyonları engelleyebileceğini göstermektedir.

Alkali/bağlayıcı oranının 0,75 olarak belirlendiği geopolimer harç karışımlarında ise, DÇ25-0.75 serisinde elde edilen ortalama basınç değeri 16.69 MPa ve eğilme dayanımı 1.09 MPa olarak ölçülmüştür. Elde edilen bu sonuçlara göre, alkali miktarındaki artışın dayanım sonuçlarını olumlu yönde etkilemediği görülmektedir. Younis (2021), sodyum hidroksit miktarındaki artışın dayanımı her zaman olumlu yönde etkileyip artırmadığını, tam tersine belirli bir sınır değer üzerinde reaksiyon ortamını olumsuz yönde etkileyebileceğini söylemektedir.

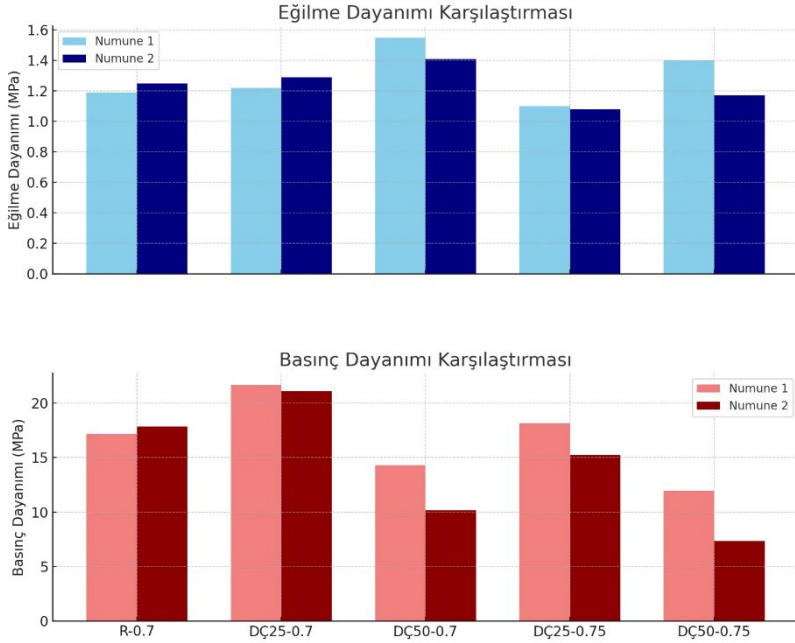
Elde edilen sonuçlara bakıldığı zaman, en düşük dayanım değeri sonuçları DÇ50-0.75 serisinde görülmektedir. Basınç dayanımı ortalama olarak 9.65 MPa ve eğilme dayanımı 1.28 MPa olarak ölçülmüştür. Yüksek oranda dip çamuru kullanımı ile alkali miktarındaki artış, karışımın mekanik bütünlüğünü zayıflatmıştır. 7 günlük kür sürecinde hidrasyonun doğru bir şekilde gerçekleşmesini engellemiştir. Hardjito ve arkadaşları (2014) ince partikül yapıli çamurların reaksiyonun fazla olduğunu ancak karışım içerisinde aşırı oranda kullanılmasının gözenekleri ve mikro yapıyı zayıflatması nedeniyle dayanım kaybı oluşturabileceğini belirtmişlerdir.

Tablo 5- Farklı dip çamuru oranlarına sahip geopolimer harçların 7 günlük eğilme ve basınç dayanımı sonuçları

SERİLER	Dayanım Sonuçları			
	Numune		Numune	
	Eğilme Dayanımı (MPa)	Basınç Dayanımı (MPa)	Eğilme Dayanımı (MPa)	Basınç Dayanımı (MPa)
R-0.7	1.19	17.16	1.25	17.85
DÇ25-0.7	1.22	21.66	1.29	21.10
DÇ50-0.7	1.55	14.27	1.41	10.17
DÇ25-0.75	1.10	18.13	1.08	15.25
DÇ50-0.75	1.40	11.95	1.17	7.35

* R-0.7 (a/b oranı 0.7, %100 YFC), DÇ25-0.7 (a/b oranı 0.7, %75 YFC+%25 DÇ), DÇ50-0.7 (a/b oranı 0.7, %50 YFC + %50 DÇ), DÇ25-0.75 (a/b oranı 0.75, %75 YFC + %25 DÇ), DÇ50-0.75 (a/b oranı 0.75, %50 YFC + %50 DÇ)

Şekil 7- Farklı dip çamuru oranlarında geopolimer harçların 7 günlük eğilme ve basınç dayanımı sonuçları



Yapılan çalışmada, %25 oranında dip çamuru içeren geopolimer harç numunelerine farklı türde ve farklı oranlarda lif takviyesinin eğilme ve basınç dayanımı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Kullanılan lif türleri polivinil alkol (PVA), basalt fiber (BF) ve mikro çelik lif (MÇ)'dir. Bu lifler geopolimer harç karışımları içerisinde hacimce %0,4, %0,8 ve %1,2 oranlarında değerlendirilmiştir.

Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, genel olarak geopolimer harç üretiminde liflerin kullanılması, numunelerin hem eğilme hem de basınç dayanımını arttırdığını göstermektedir. Tablo 4'deki sonuçlara bakıldığında, özellikle karışım içerisinde hacimce %1,2 oranında PVA kullanılan PVA1,2-DÇ25 serisinde en yüksek eğilme dayanımı (4.88 – 4.85 Mpa) ve en yüksek basınç dayanımı (32.45 – 33.83 Mpa) elde edilmiştir. Gözlemlenen bu etkinin açıklanması kullanılan PVA liflerinin harç fazı ile iyi

derecede aderans sağlamış olması ve tokluk sınırının artması ile açıklanabilir.

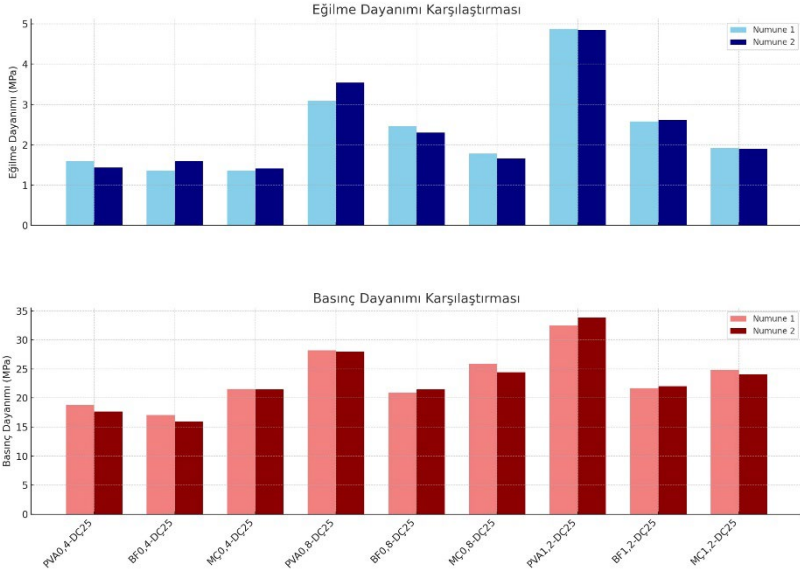
Bazalt lifleri ve mikro çelik liflerinde de benzer artışlar gözlemlenmiştir. Ancak bu dayanım artışları PVA lifleri ile üretilen seriler kadar yüksek değildir. Sonuçlar değerlendirildiğinde, bütün lif türlerinin karışım içerisinde kullanım oranlarının artmasıyla beraber, eğilme dayanımlarında pozitif anlamda ilerleme kaydedilmiştir. Bu durum, geopolimer harçlar içerisinde yer alan liflerin kullanım oranlarının önemli bir parameter olduğunu göstermektedir.

Tablo 6- Hacimce %0,4, %0,8 ve %1,2 oranlarına sahip PVA, bazalt fiber ve mikro çelik lif takviyeli geopolimer harçların 7 günlük eğilme ve basınç dayanımı sonuçları

SERİLER	Dayanım Sonuçları			
	Numune		Numune	
	Eğilme Dayanımı (MPa)	Basınç Dayanımı (MPa)	Eğilme Dayanımı (MPa)	Basınç Dayanımı (MPa)
PVA0,4-DÇ25	1.59	18.78	1.43	17.66
BF0,4-DÇ25	1.36	17.06	1.59	15.96
MÇ0,4-DÇ25	1.36	21.52	1.41	21.50
PVA0,8-DÇ25	3.09	28.22	3.54	27.96
BF0,8-DÇ25	2.46	20.92	2.30	21.50
MÇ0,8-DÇ25	1.78	25.89	1.66	24.46
PVA1,2-DÇ25	4.88	32.45	4.85	33.83
BF1,2-DÇ25	2.58	21.68	2.62	22.05
MÇ1,2-DÇ25	1.92	24.82	1.90	24.10

* R-0.7 (a/b oranı 0.7, %100 YFC), DÇ25-0.7 (a/b oranı 0.7, %75 YFC+%25 DÇ), DÇ50-0.7 (a/b oranı 0.7, %50 YFC + %50 DÇ), DÇ25-0.75 (a/b oranı 0.75, %75 YFC + %25 DÇ), DÇ50-0.75 (a/b oranı 0.75, %50 YFC + %50 DÇ)

Şekil 8- Hacimce %0,4, %0,8 ve %1,2 oranlarına sahip PVA, bazalt fiber ve mikro çelik lif takviyeli geopolimer harçların 7 günlük eğilme ve basınç dayanımı sonuçları



Sonuçlar

Dip çamuru karışım içerisinde bağlayıcı malzeme olarak %25 oranında kullanıldığında hem eğilme dayanımı hem de basınç dayanımı açısından olumlu sonuçlar vermiştir.

Dip çamurunun karışım içerisinde %50 oranında kullanılması özellikle basınç dayanımı sonuçlarında belirgin bir azalmaya neden olmuştur.

Alkali/bağlayıcı oranındaki artış dayanımı her zaman olumlu yönde etkilememektedir. Optimum NaOH konsantrasyonunun 12M olması ve alkali/bağlayıcı oranının 0,7 olarak tercih edilmesi ile daha verimli sonuçlar elde edilmektedir.

Ayrıca bu çalışma sadece dayanım açısından değil sürdürülebilirlik açısından da önemlidir. Bu şekilde alternatif bağlayıcı malzemeler karbon ayak izini azaltma potansiyeline sahiptir.

Sonuç olarak, optimum şartlarda geopolimer harç üretiminde bağlayıcı malzeme olarak, dip çamuru %25 oranında başarılı bir

şekilde kullanılabilir. Karışım içerisindeki dip çamuru oranı arttıkça mekanik özelliklerde düşüşe sebep olmaktadır. Dip çamuru ikamesi ile üretilen geopolimer kompozitlerde lif takviyesi önemlidir. Ayrıca geopolimer kompozitlerin mekanik performansının artırılmasında hem lif türü hem de bu liflerin harç içerisinde kullanım oranları da önemlidir. Bundan dolayı dip çamuru ile üretilen geopolimer harçlara lif takviye edilmesi ile geopolimerin eğilme ve basınç dayanımları iyileştirilebilir.

Kaynakça

Akbulut, F. (2021). *Erzurum Pasinler Bölgesi Perlitinin Geopolimer Üretiminde Kullanımının Araştırılması* [Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi].

Antoni, A., Wiyono, D., Vianthi, A., Putra, P., Kartadinata, G., & Hardjito, D. (2014). Effect of particle size on properties of Sidoarjo mud-based geopolimer. *Materials Science Forum, 803*, 44–48. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.803.44>

Davidovits, J. (1991). Geopolymers: Inorganic polymeric new materials. *Journal of Thermal Analysis*, *37*(8), 1633–1656.

Deb S. "The impact of basaltic fibre on selected physical and mechanical properties of cement mortar", Composite Materials, 2012, 46(3):286-290.

Habert, G., d'Espinose de Lacaillerie, J. B., & Roussel, N. (2011). An environmental evaluation of geopolimer based concrete production: Reviewing current research trends. *Journal of Cleaner Production, 19*, 1229–1238.

Lirer, S., Liguori, B., & Capasso, I. (2017). Mechanical and chemical properties of composite materials made of dredged sediments in a fly-ash based geopolimer. *Journal of Environmental Management, 191*, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.01.001>

Monaldo E, Nerilli F, Vairo G. Basalt-based fiber-reinforced materials and structural applications in civil engineering. Compos Struct 2019; 214:246–63.

Nawaz, M., Heitor, A., & Sivakumar, M. (2020). Geopolymers in construction – recent developments. *Construction and Building Materials, 260*, 120472.

Noushini A., Samali B., Vessalas K., ‘Effect of polyvinyl alcohol (PVA) fibre on dynamic and material properties of fibre reinforced concrete’, School of Civil and Environmental Engineering, University of Technology Sydney, Australia, Elsevier, (2013).

Provis, J. L., & Bernal, S. A. (2014). Geopolymers and related alkali-activated materials. **Annual Review of Materials Research*, 44*, 299–327.

Shaikh, FUA; Patel, A. Hibrit PVA Elyaf ve AR-Cam Tekstil Takviyeli Geopolimer Kompozitlerin Eğilme Davranışı. *Elyaf lar* 2018, 6, 2.

Van Deventer, J. S. J., Provis, J. L., & Duxson, P. (2012). Technical and commercial progress in the adoption of geopolymer cement. **Minerals Engineering*, 29*, 89–104.

Younis, K. H. (2021). Influence of sodium hydroxide (NaOH) molarity on fresh properties of self-compacting slag-based geopolymer concrete containing recycled aggregate. **Materials Today: Proceedings*, 56*(4), 1733–1737.

Yıldırım, S. T. (2025). Kocaeli İzmit Körfez Dip Çamurunun Yapı Malzemesi Olarak Kullanılabilirliği ve Üretilen Yapı Malzemelerinin Çevreye Katkısı. **Journal of Şura Akademi**.

Zhang, P., Wang, J., Li, Q., Wan, J., & Ling, Y. (2021). Mechanical and fracture properties of steel fiber-reinforced geopolymer concrete. *Science and Engineering of Composite Materials*, 28(1), 299-313.

Zheng YX, Zhang Y, Zhuo JB, Zhang YM, Wan C. A review of the mechanical properties and durability of basalt fiber-reinforced concrete. *Constr. Build. Mater.* 2022;359:129360.

Zouch, A., Mamindy-Pajany, Y., & Bouchikhi, A. (2022). Jeopolimer harçlarda deniz tortularının değerlendirilmesi:

laboratuvar ölçeğinde fiziko-mekanik, mikro yapısal ve çevresel araştırmalar. *Journal of Material Cycles and Waste Management, 24*, 1109–1123. <https://doi.org/10.1007/s10163-022-01382-0>

Zouch, M., Brahim, S. B., & Khatib, J. (2022). Mechanical and durability properties of geopolymer concrete – A review. *BAU Journal - Science and Technology, 3*(2), Article 8. <https://doi.org/10.54729/SUIQ7034>

BÖLÜM 3

ELEKTRİKSEL KÜRLEME YOLUYLA GERİ DÖNÜŞTÜRÜLMÜŞ BETON AGREGALARIYLA GEOPOLİMER HARÇLARIN GELİŞTİRİLMESİ

Şahin EKMEKCİ¹
Mücteba UYSAL²

Giriş

Geleneksel beton ve çimento esaslı harçlar, inşaat sektöründe sıkça tercih edilen ve uzun süredir kullanılmaktadırlar. Bu beton ve harçlar; yüksek basınç dayanımı, kolay işlenebilirlik ve uzun servis ömrü gibi avantajları da sağlamaktadır (Neville, 2012). Ancak Portland çimentosunun baştan sona olan üretim aşaması, küresel karbon dioksit (CO₂) emisyonlarının yaklaşık %8'inden sorumlu olması nedeniyle önemli derecede çevresel soruna sebep olmaktadır (Mehta & Monteiro, 2014). Ayrıca, tüm bu olumlu etkilerine rağmen sık sık tercih edilen bu beton ve harçların olumsuz yönleri de hala bulunmaktadır. Hidratasyon reaksiyonları sonucu çimento esaslı malzemelerde ortaya çıkan ürünlerin (örneğin kalsiyum hidroksit) uzun vadede ve ileri yaşlarda bulunduğu ortam koşullarına göre

¹ Yüksek Lisans Öğrencisi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Yapı Malzemeleri Programı, Orcid: 0009-0003-3415-1675

² Prof. Dr., Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği, Orcid: 0000-0002-6827-9904

durabilite sorunlarına (kimyasal saldırı, karbonatlaşma) açık olduğu bilinmektedir. Bu nedenle, bu olumsuz etkileri ortadan kaldırmak adına sürdürülebilir alternatif bağlayıcı sistemlerin geliştirilmesi, hem çevresel etkilerin azaltılması hem de daha dayanıklı ve uzun ömürlü yapı malzemelerinin üretimi için oldukça önemli bir konuma gelmiştir (Scrivener et al., 2018).

Bu amaca yönelik olarak geopolimer harçlar, endüstriyel atıkların geri dönüştürülerek değerlendirilmesi, karbon emisyonu miktarının azaltılması ve yüksek dayanım ve dayanıklılık özellikleri sunması nedeniyle dikkat çekici bir seçenek olarak sektörde kendine yer edinmiştir (Torgal & Jalali, 2011; Pacheco-Torgal et al., 2008). Geopolimer üretiminde, uçucu kül, silis dumanı ve granüle yüksek fırın cürufu (YFC) gibi yan ürünlerin kullanımı yayginken, günümüzde seramik tozu, cam tozu, mermer tozu ve alüminyum çamuru gibi alternatif alüminosilikat kaynaklarının da başarılı ve etkili sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir (Medina et al., 2015; Türker et al., 2020).

Geopolimer harçların üretimi sırasında kullanılan aktivatörler arasında sodyum hidroksit (NaOH) ve sodyum silikat (Na_2SiO_3) çözeltileri öne çıkmakta ve çokça tercih edilmektedir. Bunun sebebi, NaOH , alüminosilikat yapıların çözünmesini sağlayıp etkileşime girecek olan madde miktarını arttırırken, sodyum silikat çözeltisi sistemdeki silika miktarını artırarak yoğun, dayanıklı bir matris oluşumuna katkı sağlaması olarak açıklanabilir. (Duxson et al., 2007; García-Lodeiro et al., 2015). Düşük molariteli NaOH çözeltileri (2M–6M) kullanılarak hem çevre dostu hem de düşük maliyetli üretim süreçleri gerçekleştirilebilmekte ve ek olarak iş güvenliği riskleri de yüksek molariteli üretimlere kıyasla daha az olmaktadır (Younis, 2022). Geopolimer beton ve harçların kürleme sürecinde ise, geleneksel ortam ve termal yöntemlerin yerine elektriksel kürleme gibi yenilikçi tekniklerin kullanılması, hem enerji verimliliğini ve kolay uygulanabilirliği artırmakta hem de kısa

sürede kullanılabilir düzeyde bir dayanım kazanımı sağlamaktadır (Aygün, 2023).

Geopolimerizasyon süreci, alkali bir ortamda alüminosilikat kaynaklarının çözünmesi ve yeniden polimerizasyonu ile gerçekleşmektedir. Sodyum hidroksit gibi alkali aktivatörlerin karışım içerisindeki çokluğuna bağlı olarak, geopolimerin reaksiyon miktarı, hızı ve elde edilen ürünün mekanik özellikleri doğrudan etkilenmektedir. Yapılan diğer çalışmalar incelendiğinde yüksek molariteye sahip çözeltiler (10M-16M) daha hızlı dayanım sonuçları vermektedir; ancak yüksek molariteye bağlı olarak hem maliyet hem de üretim sırasında karşılaşılabilecek riskler artmaktadır. Buna karşılık düşük molariteli sodyum hidroksit çözeltileri (2M-6M) kullanılarak hazırlanan geopolimer harçlar üzerinde de kayda değer ve kabul edilebilir dayanım değerleri elde edilebilmektedir (Gautam et al., 2015). Özellikle 6M molarite ile üretilmiş olan harçlar hem yeterli dayanımı sağlamakta hem de ekonomik ve güvenli bir seçenek olmaktadır (Younis, 2022). Harçların üretimi sonrasında tıpkı geleneksel tarzda olduğu gibi geopolimer harçlar ve betonlar da kürlenme ihtiyacı duymaktadır. Geleneksel kür yöntemleri yeni alternatifler karşısında yüksek enerji tüketimi ve zaman kaybı gibi olumsuz yönler barındırmaktadır. Alternatif bir seçenek olarak elektriksel kürlenme yöntemi, taze haldeki harca doğrudan düşük voltaj uygulanması ile iç sıcaklığın artmasına sebep olarak hidratasyon olayını ve dayanım kazanımını hızlandırmaktadır (Aygün, 2023). Benzer şekilde, Halis Alakara (2022), geri dönüştürülmüş asfalt tozu esaslı agrega içeren alkali aktivatör içeren geopolimerlerde de elektriksel kürün mekanik dayanımı artırdığını ve özellikle erken yaş dayanımının gerekli olduğu uygulamalarda avantajlı olabileceğini göstermiştir. Alternatif beton üretimi ve yenilikler kapsamında düşük maliyet ve sürdürülebilirlik hedeflerinin devam ettirilebilmesi için beton atıklarının da yeniden kullanıma sunulması, sürdürülebilir inşaat uygulamaları açısından

oldukça önemlidir. Geri dönüşüm agregasının (GDA) geopolimer harçlarda kullanılıyor oluşu, doğal kaynak ve ham madde tüketimini azaltmasının yanında, atıkların değerlendirilmesi ve bertaraf edilmesine olanak sağlamaktadır. Ancak GDA tanelerinin yüzey pürüzlülüğü ve gözenekliliği, bağlanma mekanizmalarını etkileyerek mukavemet kayıplarına neden olabilmektedir. Bu nedenle, GDA kullanılan harçlarda düşük molariteli alkali çözeltile ve etkin kürlenme yöntemleriyle çalışılması gerekmektedir (Alakara, 2022).

Bu çalışmada, %50 oranında granüle yüksek fırın cürufu ve %50 seramik tozundan oluşan bir bağlayıcı sistemi temelde ele alınarak, %100 oranında standart kum ya da dere kumu yer değiştirilmiş geri dönüştürülmüş beton agregası (GDA) ile geopolimer harçlar üretilmiştir. Alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit ve sodyum silikat kullanılmış, düşük molariteli NaOH çözeltile tercih edilmiştir. Alkali aktivatör/bağlayıcı oranı ise değişen düşük molaritelere göre de uygun işlenebilirlik göz önüne alınarak değişiklik göstermiştir. Harç numuneleri, ortam kürlenmesi, termal kürlenme ve elektriksel kürlenme yöntemleriyle kürlenmiş ve bu yöntemlerin basınç ve eğilme dayanımları üzerindeki etkileri incelenmiştir. Böylece, hem geri dönüşüm agregalarının yapı malzemelerinde %100 oranında kullanım potansiyeli hem de alternatif kürlenme yöntemlerinin etkinliği araştırılıp sonuçları da gözler önüne serilmiştir.

Ayrıca, gerçekleşen ön denemeler sonucunda en iyi performans gösteren molarite değeri üzerinde esas üretimler gerçekleştirilmiş olup geopolimer harçların mekanik performanslarını iyileştirmek amacıyla farklı türde lif takviyeleri ile güçlendirmeler hedeflenmiştir. Liflerin beton ve harçlar üzerinde sağlamış olduğu matris çatlaklarını engelleme ve enerji sönmleme gibi etkileri sayesinde dayanım ve sünekliğe olumlu katkılar sağlamasından dolayı bu çalışmada 3 farklı lif tipi, hem mekanik etki

hem de kür koşullarına bağı sonuçların incelenmesi adına tercih edilmiştir. Bu çalışmada da 6 mm boyutundaki karbon fiber, mikro çelik ve atık erozyon teli lifleri, sırasıyla hacimce %0,4, %0,8 ve %1,2 oranlarında harç matrisine eklenmiş; bu sayede eğilme ve basınç dayanımı üzerinde liflerin etkisi detaylı olarak incelenmiştir.

Materyaller ve Yöntemler

Materyaller

Düşük molarite ve farklı kür koşullarının etkinliğini ve farkını daha net bir şekilde anlayabilmek için bağlayıcı olarak granüle yüksek fırın cürufu (YFC) ve seramik tozu (CP) olmak üzere iki temel malzeme kullanılmıştır. Yüksek fırın cürufu, erken ve yüksek dayanım sağlaması sebebi ile düşük molarite ile üretilen geopolimer harçlar için etkili bir tercih olacağı düşünülmüştür. Seramik tozu ise, sıcaklık düzeyleri ile olan yakınlığı ve etkileşiminin daha iyi gözlemlenebileceği sebebi ile farklı kür koşullarında sonuçların daha yorumlanabilir olması için tercih edilmiştir.

Yüksek fırın cürufu, demir cevherinin yüksek fırınlarda ergitilmesi sırasında yan ürün olarak oluşan atık bir malzemedir. Granüle edilmiş formu, çimento ve beton üretiminde bağlayıcı madde olarak tercih edilebilmektedir. Cürufun yavaş yerine hızla soğutulması halinde, silis ve alüminyum oksit açısından zengin amorf bir yapıya dönüşür ve bu özellikleri sayesinde puzolanik davranış özelliği gösterir. Öğütülerek ince taneli hale getirildiğinde, çimento hidrasyon ürünleriyle reaksiyona girerek dayanımı artırır ve ortaya çıkacak dayanımın büyük çoğunluğunu sağlamaktadır. Ek olarak çevresel sürdürülebilirliğe katkı sağlar. Genellikle açık renkli ve camsı tane yapısına sahiptirler. Yoğunlukları 2.9 g/cm^3 civarında seyretmektedir.

Seramik tozu, seramik üretimi sırasında oluşan atıkların öğütülmesiyle elde edilen ince taneli bir malzemedir ve genellikle

turuncuya yakın açık renklidir. Yoğunluğu $2.5-2.7 \text{ g/cm}^3$ civarındadır. Bu toz, yüksek oranda silika ve alümina içerdiğinden dolayı puzolanik özellik gösterir ve çimento yerine ikame edilerek beton ve harçlarda kullanılabilir. Seramik tozunun kullanımı da tıpkı diğer puzolanik malzemelerde olduğu gibi atık yönetimine katkı sağlar ve çevresel etkileri azaltır. Tablo 1’de bu çalışmada kullanılan granüle yüksek fırın cürufu ve seramik tozunun kimyasal bileşenlerine yer verilmiştir.

Bağlayıcılar ile etkileşime girmesi için sodyum hidroksit (NaOH) ve sodyum silikat (Na_2SiO_3) kullanılmış olup oranları sırasıyla 1/2 birim şeklindedir. Sodyum hidroksit, pH değeri yaklaşık 13.4 olan güçlü bir alkali olup, geopolimer üretiminde aktivatör olarak kullanılır. NaOH, alüminosilikatların çözünmesini sağlayarak polimerizasyon sürecini başlatır. Beyaz ve opak kristaller halinde tuza benzer bir görünüme sahiptir ve kullanılmadan önce istenilen molariteye göre su içerisinde çözdürülmesi gerekmektedir. Yoğunluğu 2.13 g/cm^3 olarak ifade edilebilir. Sodyum silikat, geopolimer harç üretiminde sodyum hidroksit ile birlikte kullanılan ikinci aktivatördür. Silika içeriği sayesinde, polimer zincirlerinin oluşumunu destekler ve harcın mekanik özelliklerini iyileştirir. Ayrıca, sodyum silikatın viskozitesi, karışımın işlenebilirliğini etkiler. Renksiz ancak biraz kıvamlı, şurup gibi bir görünüme sahiptir. Yoğunluğu 2.4 g/cm^3 ’tür. SiO_2 içeriği %24–26, Na_2O içeriği ise %11.5–13.5 civarındadır. Modül çoğu zaman ($\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ oranı): 1.90–2.25 aralığında seyretmektedir.

Agrega olarak, tane boyutu $<2 \text{ mm}$ olmak üzere %100 oranında tamamen geri dönüştürülmüş agrega (GDA) kullanılmıştır. Geri dönüştürülmüş agrega, yıkılmış beton yapıların kırılmasıyla ya da eski test numunelerinden elde edilen malzemedir. GDA, doğal agregalara göre daha gözenekli bir yapıya sahip olduğundan dolayı su emme kapasitesi de daha yüksektir. Bu özellikleri, geopolimer harçların dayanımını ve dayanıklılığını etkileyebilir. Ancak, uygun

karışım tasarımı ve kürleme yöntemleri ile GDA'nın olumsuz etkileri minimum düzeye indirilebilmektedir. Bu çalışmada kullanılan agregalar ise üniversite içerisinde yer alan test laboratuvarından temin edilmiştir. Kullanılan numuneler birbirinden farklı dayanım sınıfına ve içeriklere sahip olup üzerlerinde daha önce ilgili testleri gerçekleştirilmiş atık numunelerdir. Bu agregaların görünümü düzensiz şekilli, gözenekli ve gri renktedir. Yoğunluğu $2.3\text{--}2.5\text{ g/cm}^3$ civarındadır. Su emme oranı %5–10 gibi diğer agregalara kıyasla daha yüksektir. Tablo 2’de 1 m^3 için bu çalışmada üretilen farklı molaritelerdeki harçlara ilişkin karışım hesabı, reçeteye yer verilmiştir.

Bu çalışmada, eğilme ve basınç dayanımını arttırabileceği ve çatlak kontrolü açısından etkili sonuçlar verebileceği değerlendirilen üç farklı lif türü kullanılmıştır. Karbon fiberler, yüksek çekme dayanımı ve düşük yoğunlukları sayesinde üretilen geopolimer harç sistemlerinde matris çatlaklarını kontrol altına almakta etkili sonuçlar göstermiş, elektriksel iletkenlik özellikleri nedeniyle kürleme yöntemleriyle gereken uyumu yakalamıştır (Zhang et al., 2023). Mikro çelik lifler, yüksek elastisite modülü değeri sayesinde çekme yüklerinin dengeli dağılımını üstlenerek harcın sünekliğini artırma amacı ile kullanılmıştır (Zhang et al., 2021). Atık erozyon telleri ise diğer liflerden daha farklı bir amaca hizmet ederek sürdürülebilirlik ilkesi doğrultusunda geri kazanılmış metal tel formunda olup, hem ekonomik hem de çevreci bir takviye malzemesi olarak ele alınmıştır (Umer et al., 2025). Tüm lif türleri 6 mm civarında boyutu olup karışımlara %0,4, %0,8 ve %1,2 hacim oranlarında ayrı ayrı ilave edilmiştir. Kullanılan liflerin yoğunlukları da sırasıyla $1,85\text{ gr/cm}^3$, $7,85\text{ gr/cm}^3$ ve $8,48\text{ gr/cm}^3$ olarak belirtilmektedir. Tablo 3’te lifli serilerin lif yüzdelerine ait karışım miktarlarına yer verilmiştir.

Tablo 1 - Bağlayıcıların kimyasal bileşimi.

Ana Oksit (%)	GBFS	CP
SiO ₂	40.5	65.44
Al ₂ O ₃	12.8	15.45
Fe ₂ O ₃	1.1	7.11
CaO	35.5	4.65
MgO	5.8	1.28
Na ₂ O	0.79	0.8
K ₂ O		2.15
SO ₃	0.18	0.06
TiO ₂	0.75	
LOI	0.03	3.06

Tablo 2 - 1 m³ hacim için karışım oranları

Seriler	a/b Oranı	YFC (kg)	CP (kg)	GDA (kg)	NaOH (kg)	Na ₂ SiO ₃ (kg)	Toplam (kg)
2M	1.00	292.97	292.97	1464.85	195.31	390.62	2636.72
4M	0.85	292.97	292.97	1464.85	166.02	332.04	2548.85
6M	0.85	292.97	292.97	1464.85	166.02	332.04	2548.85
8M	0.70	292.97	292.97	1464.85	136.72	273.44	2460.95

*2M,4M,6M,8M - (%50 YFC + %50 CP + %100 GDA)

Tablo 3 - Hacimce sırasıyla %0,4-%0,8-%1,2 oranında Karbon fiber, Mikro çelik ve Atık erozyon teli için 1 m³'e göre hazırlanmış karışım oranları

Seriler	a/b Oranı	YFC (kg)	CP (kg)	GDA (kg)	NaOH (kg)	Na ₂ SiO ₃ (kg)	Lif (kg)	Toplam (kg)
R	0.85	292.97	292.97	1464.85	166.02	332.04	-	2548.85
0,4KF	0.85	292.97	292.97	1464.85	166.02	332.04	7.38	2556.23
0,8KF	0.85	292.97	292.97	1464.85	166.02	332.04	14.76	2563.61
1,2KF	0.85	292.97	292.97	1464.85	166.02	332.04	22.14	2570.99
0,4MÇ	0.85	292.97	292.97	1464.85	166.02	332.04	31.40	2580.25
0,8MÇ	0.85	292.97	292.97	1464.85	166.02	332.04	62.80	2611.65
1,2MÇ	0.85	292.97	292.97	1464.85	166.02	332.04	94.20	2643.05
0,4AT	0.85	292.97	292.97	1464.85	166.02	332.04	33.90	2582.75
0,8AT	0.85	292.97	292.97	1464.85	166.02	332.04	67.80	2616.65
1,2AT	0.85	292.97	292.97	1464.85	166.02	332.04	101.70	2650.55

* R- Referans, KF- Karbon fiber, MÇ-Mikro çelik, AT- Atık erozyon teli

Yöntemler

İlk aşamada yapı test laboratuvarından temin edilen farklı dayanım sınıfına ve bileşenlere sahip birçok farklı numuneler Los Angeles cihazında bilyeler aracılığı ile döndürülerek öğütülmüştür. Daha sonrasında 2 mm elek açıklığına sahip elek kullanılarak, kullanılacak agrega tane boyutunun ≤ 2 mm olması sağlanmıştır. 2 mm'nin altında kalan elde edilen tüm agregalar homojen olması için mikser içerisinde kuru halde karıştırılmış ve o şekilde paketlenerek kullanıma hazır hale getirilmiştir.

Numunelerin üretilmesine geçildiğinde ise üretim, reçeteye bağlı kalınarak gerçekleştirilmiştir ve üzerlerinde ASTM C349 ve TS EN 196-1 standartlarına uygun olacak şekilde 7 günlük eğilme ve basınç dayanım sonuçlarının elde edilmesi için 40x40x160 mm boyutlarında prizmatik numuneler üretilmiştir. İki adet ortam, iki adet ısı ve iki adet elektriksel kür koşullarına maruz bırakılmak üzere her seri için toplamda altışar adet prizmatik numune üretimi gerçekleştirilmiştir.

Harç hazırlanırken miksera ait kap içerisine ilk olarak granüle yüksek fırın cürufu ve seramik tozu kuru halde karıştırılıp homojen hale getirilmiştir. Ardından, 1 birim sodyum hidroksit 2 birim sodyum silikat çözeltisi istenilen molariteye göre sıvı faz olarak bağlayıcıların üzerine eklenerek karıştırılmıştır. Son olarak harcın oluşması için belirlenen miktardaki geri dönüşüm agregası da eklenerek karıştırıldıktan sonra harç, kalıplara yerleştirilmiştir.

Ortam kürüne maruz kalacak olan numuneler, 24 saatlik priz alma süresini tamamladıktan sonra kalıptan çıkarılarak 23 ± 2 °C sıcaklığa ve %95 bağıl nem oranına sahip kürleme kabineye yerleştirilerek 7 günlük bekleme sürelerinin tamamlanması sağlanmıştır. Isıl küre maruz kalacak numuneler, 24 saatlik priz alma süresini tamamladıktan sonra kalıptan çıkarılarak 80°C sıcaklıktaki etüve yerleştirilecek 24 saat boyunca bekletilmiştir. Ardından

etüvden çıkarılan numuneler oda sıcaklığında soğuduktan sonra 7 günlük bekleme süresini tamamlaması için aynı küreme kabineye yerleştirilmiştir. Son olarak elektriksel küre maruz kalacak numuneler ise henüz taze ve akışkan haldeyken iki ucunda bakır levhalar bulunan tahta kalıplara yerleştirilmiş ve 20V değerine karşılık gelecek alternatif akım etkisine 24 saat boyunca maruz bırakılmıştır. Bir günün sonunda bu kalıplardan da çıkarılan numuneler küreme kabineye 7 günü tamamlamaları için yerleştirilmişlerdir.

Bir haftalık bekleme süresinin ardından tüm prizmatik numuneler üzerinde daha önce belirtilen standartlara uygun olacak şekilde önce eğilme ardından basınç dayanımı testleri gerçekleştirilmiştir. Eğilme dayanımlarının belirlenmesi ardından prizmadan elde edilen tek numuneye ait iki parça üzerinde de basınç dayanımı testi yapılarak iki parçanın sonuçlarının ortalaması alınmıştır.

Esas üretimlere geçildiği zaman üretim şeklinde lifli serilerde biraz fark bulunmaktadır. Lifler, homojen bir dağılım sağlamak amacıyla bağlayıcılar ile alkali aktivatörün karıştırma işleminin ardından ve agrega eklenmesinden önceki aşamada miksera ilave edilmiştir. Üç farklı lif türü için ayrı ayrı %0,4, %0,8 ve %1,2 oranlarında üretim yapılmıştır. Tüm lifli seriler, ASTM C348 ve TS EN 196-1 standartlarına uygun şekilde test edilmek üzere prizmatik kalıplara dökülerek ısı ve elektriksel olmak üzere iki farklı küreme yöntemine tabi tutulmuştur. Böylece her lif tipinin ve oranının farklı küreme koşulları altındaki mekanik performansa etkisi ayrıntılı olarak değerlendirilmiştir.

Sonuçlar ve Tartışma

Bu çalışmadan elde edilen bulgular, düşük molariteli sodyum hidroksit ve sodyum silikat çözeltileri ile hazırlanmış geopolimer harçların hem küreme yöntemi farklılıklarına hem de molarite

değerine bağlı olarak mekanik dayanım performanslarının önemli ölçüde değiştiğini göstermektedir. Eğilme ve basınç dayanımı değerleri birlikte incelendiğinde, her üç kür yöntemi arasında en yüksek dayanım değerlerine genellikle ısıtılma kür (T) uygulanmış numunelerde ulaşıldığı görülmektedir. Özellikle 6M ve 8M molariteli numunelerde bu fark daha belirgin olup 6M-T serisinde basınç dayanımı yaklaşık 31.9 MPa değerine ulaşmış, eğilme dayanımı ise 4.47 MPa değerinde sonuç vermiştir. Bu bulgu, yüksek sıcaklık etkisinin geopolimerizasyon sürecini hızlandırarak daha yoğun ve güçlü bir matris oluşumunu desteklediğini göstermektedir (Duxson et al., 2007).

Isıl kür yönteminin haricinde alternatif ve yeni bir kür yöntemi olan elektriksel kür (E) yönteminin de dikkat çeken bir etkisi olduğu görülmektedir. 2M ve 4M gibi oldukça düşük molarite değerlerinde bile elektriksel kür ile kürlenmiş numunelerin hem eğilme hem de basınç dayanımında ortam koşullarına (A) gerçekleşen küre kıyasla pozitif yönde bir etkisi olduğu ve anlamlı artışlar sağladığı gözlenmiştir. Örneğin 2M-A serisine ait numuneler yaklaşık 1.1 MPa eğilme ve maksimum 6.6 MPa gibi bir basınç dayanımı değeri gösterirken, 2M-E numunesi maksimum 2.1 MPa eğilme dayanımı ve ortalama olarak yaklaşık 10 MPa basınç dayanımı değerine ulaşmıştır. Bu durum, düşük molariteli sistemlerde elektriksel kürün, matrisin iç yapısını aktive etmede etkili olduğunu ve elektriksel kürlemede olduğu gibi diğer alternatif kürleme tekniklerinin de klasik yöntemlere göre bazı durumlarda daha avantajlı olabileceğini ortaya çıkarmaktadır (Aygün, 2023; Alakara, 2022). Şekil 1’de farklı molarite ve kür koşullarına sahip numunelerin 7 günlük eğilme ve basınç dayanımı sonuçlarına ilişkin bir grafiğe yer verilmiştir.

Tablo 4’te değişken düşük molarite değerlerine sahip ve üç farklı kür koşuluna maruz kalan numuneler üzerinde yapılan tüm eğilme ve basınç testlerinin sonuçları Mpa cinsinden verilmektedir.

Referans numunelerle kıyaslandığında lif kullanımının, tüm lif türlerinde genel olarak dayanım üzerinde olumlu etkiler oluşturduğu gözlemlenmiştir. Tablo 5’te referans ve lifli serilere ait eğilme ve basınç dayanımı sonuçlarının ortalama değerlerine yer verilmiştir.

Tablo 4 - Farklı molarite değerlerine sahip ve farklı kür koşullarına maruz bırakılmış geopolimer harçların 7 günlük eğilme ve basınç dayanımı sonuçları

SERİLER	Dayanım Sonuçları			
	Numune		Numune	
	Eğilme Dayanımı (MPa)	Basınç Dayanımı (MPa)	Eğilme Dayanımı (MPa)	Basınç Dayanımı (MPa)
2M-O	1.08	6.15	1.10	6.63
2M-E	2.13	11.04	1.91	9.96
2M-I	3.15	14.60	3.61	14.53
4M-O	2.30	8.46	1.90	8.11
4M-E	3.35	19.23	3.36	20.11
4M-I	4.70	27.79	4.34	26.40
6M-O	3.32	11.39	3.30	11.87
6M-E	3.86	24.88	3.88	26.13
6M-I	4.47	31.90	4.46	28.53
8M-O	3.61	9.55	3.98	9.73
8M-E	4.99	15.40	5.48	15.44
8M-I	5.91	21.47	6.02	21.46

*2M,4M,6M,8M - (O- Ortam kürü, E- Elektriksel kür, I- Isıl kür)

Tablo 5 - Lifli serilere ait 28 günlük eğilme ve basınç dayanımı sonuçlarının ortalama değerleri.

SERİLER	Dayanım Sonuçları	
	ORTALAMA	
	Eğilme Dayanımı (MPa)	Basınç Dayanımı (MPa)
R-I	2.88	17.59
R-E	2.12	16.01
0.4KF-I	3.25	19.50
0.8KF-I	3.50	22.09
1.2KF-I	4.12	18.69
0.4KF-E	2.35	16.45
0.8KF-E	2.81	17.61
1.2KF-E	3.15	19.57
0.4MÇ-I	3.17	23.24
0.8MÇ-I	3.66	18.64
1.2MÇ-I	3.49	21.85
0.4MÇ-E	1.99	15.24
0.8MÇ-E	2.65	19.12
1.2MÇ-E	1.40	16.99
0.4AT-I	2.22	25.45
0.8AT-I	2.31	24.42
1.2AT-I	2.27	24.28
0.4AT-E	1.78	17.36
0.8AT-E	1.92	18.37
1.2AT-E	2.10	21.56

**R- Referans, KF- Karbon fiber, MÇ- Mikro çelik, AT- Atık erozyon teli (I- Isıl kür, E- Elektriksel kür)*

Karbon fiber takviyeli numuneler incelendiğinde, özellikle %1,2 oranı ile ısıl kür (1.2KF-I) uygulanmış seride eğilme dayanımı 4.12 MPa ile o lif türüne ait en yüksek değere ulaşmıştır. Bu durum, karbon liflerin matris içi mikro çatlakları azaltıcı etkisine dolayısıyla liflerin sıyrılma ve kopmasına olan direncinin fazla olması ile açıklanabilir (Zhang et al., 2023). Elektriksel kür uygulanan karbon fiberli serilerde ise %1,2 oranında yine kür koşuluna göre kendi içerisinde kabul edilebilir düzeyde yüksek eğilme dayanımı gözlemlenmiş (3.15 MPa), ancak basınç dayanımı ısıl kür uygulanan

numuneler kadar başarılı sonuç vermeyerek 19.57 MPa ile sınırlı kalmıştır.

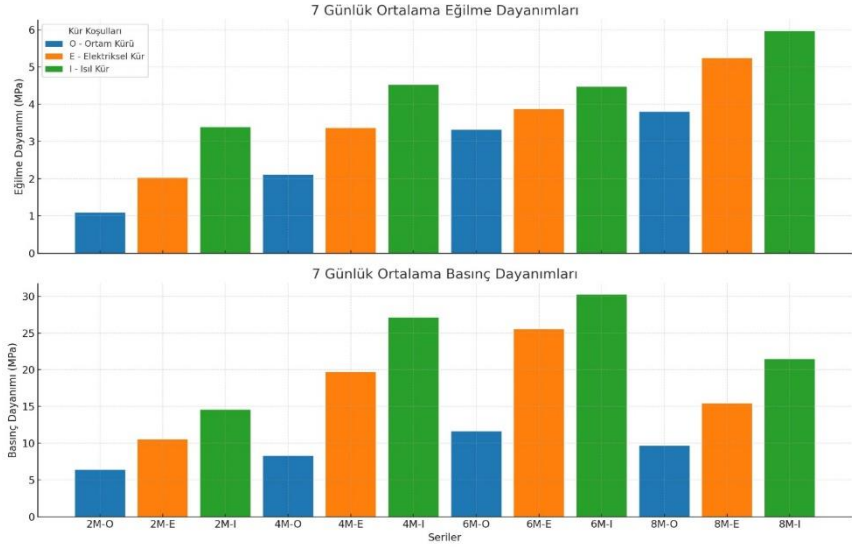
Mikro çelik lif takviyeli serilerde özellikle %0,4 hacimce kullanım oranına sahip ve ısıl kür uygulanmış (0.4MÇ-I) numuneler, ortalama 23.24 MPa ile yüksek bir basınç dayanımı göstermiştir. Eğilme dayanımı açısından ise %0,8 lif kullanım oranına sahip ısıl kür uygulanmış seri (0.8MÇ-I) 3.66 MPa ile en yüksek değere ulaşmıştır. Bu sonuçlar, çelik liflerin çekme yüklerini taşıyıp matris çatlamasını kontrol edebilme potansiyelini gösterir niteliktedir (Zhang et al., 2021).

Atık erozyon teli katkılı serilerde bir durum daha fazla dikkat çekmektedir. Isıl kür uygulanan serilerin hem eğilme hem de basınç dayanımı açısından diğer liflere kıyasla daha stabil sonuçlar vermesi olarak söylenebilir. Hacimce %0,4 oranlı atık erozyon teli kullanılan ısıl kürlü seri (0.4AT-I) 25.45 MPa ile tüm seriler arasında en yüksek basınç dayanımını vermiştir. Lif katkı oranı arttıkça eğilme dayanımında az bir miktarda artış görülürken, basınç dayanımları stabil kalmıştır. Bu durum, atık tellerin pratik anlamda homojen dağılmaması ya da segregasyona uğramış olmaları ile açıklanabilir (Umer et al., 2025).

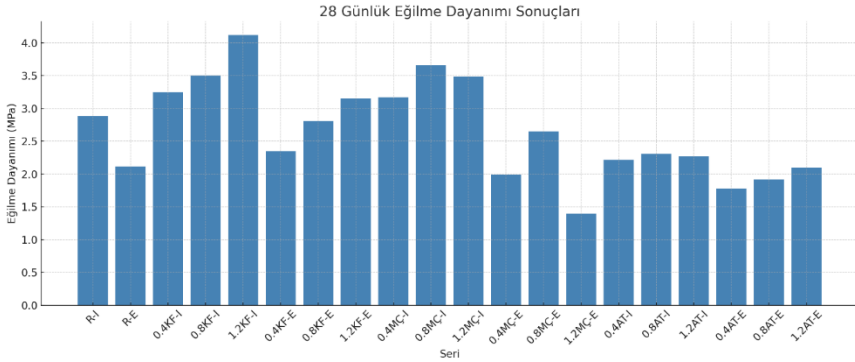
Lifli serilere ait 28 günlük ortalama eğilme dayanımı sonuçları şekil 2’de, basınç dayanımına ait sonuçlar ise şekil 3’te grafik olarak gösterilmiştir.

Şekil 1 - Farklı molarite ve kür koşullarına sahip numunelerin 7 günlük eğilme ve basınç dayanımı sonuçları

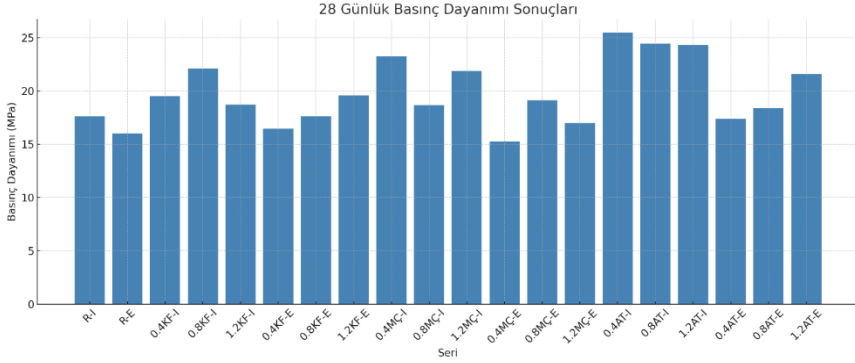
7 Günlük Dayanım Sonuçları (Ortalama) - Farklı Kür Koşullarına Göre



Şekil 2 - Lifli serilere ait 28 günlük ortalama eğilme dayanımı sonuçları



Şekil 3 - Lifli serilere ait 28 günlük ortalama basınç dayanımı sonuçları



Sonuçlar

- Kürlenme türlerine ek olarak, molarite düzeyinin de harç performansı üzerinde ciddi etkileri olduğu ortaya konmuştur. Molarite arttıkça her kür yöntemi için dayanım değerlerinin belirgin şekilde artmıştır.
- Özellikle 4M ile 6M arasında hem eğilme hem de basınç dayanımlarında sıçrama yaşanmış, bu da 6M değerinin düşük molarite sınıfı içerisinde düşük maliyet ve çevresel risklerle birlikte yüksek mekanik performans sağlayabilen bir eşik değer olabileceğini göstermiştir.
- Ancak 8M'de bazı kür tiplerinde (örn. 8M-A) dayanım değerlerinin 6M-E veya 6M-T kadar yüksek olmaması, yüksek molaritenin her koşulda en iyi sonucu garanti etmediğinin en büyük göstergesidir.
- Genel olarak bakıldığında, düşük molarite, elektriksel kürlenme ve %100 geri dönüştürülmüş agrega kullanımına ve agregaya bağlı yüzey özellikleri ve gözenekliliği gibi zayıflatıcı etkilerine rağmen birçok numunede kabul edilebilir dayanım seviyelerine ulaşılmıştır.

- Ayrıca bu çalışmada kullanılan bağlayıcı sistemi (%50 YFC + %50 Seramik Tozu) ve düşük molariteli çözeltilerle birlikte uygulanan alternatif kürleme teknikleri, geopolimer teknolojisinin daha ekonomik, çevre dostu ve uygulanabilir bir yapı malzemesi haline gelebileceğini destekler nitelikte bulunmuştur.
- Farklı lif türleri ve oranlarının geopolimer harçların mekanik açıdan özelliklerini önemli ölçüde etkilediği gözlemlenmiş; kürleme farklılıkları ile olan etkileşimleri ise performansı belirleyen temel unsurlardan biri olmuştur

Kaynakça

Alakara, E. H. (2022). Geri Dönüştürülmüş Asfalt Tozunun Alkali Aktifleştirilmiş Cüruf Harçları Üzerindeki Etkisi. *Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi*, 14(3), 362–368.

Aygün, B. F. (2023). Farklı Lifler İçeren Uçucu Kül-Cüruf Esaslı Geopolimer Kompozitlerde Farklı Kür Yönteminin Etkisiyle Mekanik Özelliklerin İncelenmesi. *THBB Akademi*.

Duxson, P., Fernández-Jiménez, A., Provis, J. L., Lukey, G. C., Palomo, A., & van Deventer, J. S. J. (2007). Geopolymer technology: the current state of the art. *Journal of Materials Science*, 42(9), 2917-2933.

García-Lodeiro, I., Palomo, A., Fernández-Jiménez, A., & Macphee, D. E. (2015). Compatibility studies between N-A-S-H and C-A-S-H gels: Study in the ternary diagram $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$. *Cement and Concrete Research*, 74, 9-17.

Gautam, L., Sheethal, K. T., & Puttiah, P. K. W. (2015). Development of High Strength Geopolymer Concrete using Low Molarity NaOH. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 4(7).

Medina, C., Juan, A., & Sánchez de Rojas, M. I. (2015). Mechanical behaviour of recycled concrete with ceramic aggregates. *Construction and Building Materials*, 68, 68-76.

Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2014). *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials* (4th ed.). McGraw-Hill Education.

Neville, A. M. (2012). *Properties of Concrete* (5th ed.). Pearson.

Pacheco-Torgal, F., Castro-Gomes, J., & Jalali, S. (2008). Alkali-activated binders: A review. *Construction and Building Materials*, 22(7), 1305-1314.

Scrivener, K., John, V. M., & Gartner, E. (2018). Eco-efficient cements: Potential, economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry. *Cement and Concrete Research*, 114, 2–26.

Torgal, F. P., & Jalali, S. (2011). Eco-efficient construction and building materials research. *Construction and Building Materials*, 25(12), 581-591.

Türker, P., Demir, İ., & Karakuzu, K. (2020). Seramik atıkları kullanılarak üretilen sürdürülebilir betonlar üzerine bir araştırma. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*.

Umer, M., Ahmad, J., Anis Khan, H., & Khushnood, R. A. (2025). Valorization of recycled steel wires from end-of-life tires as an alternative fiber reinforcement in geopolymer concrete to foster circularity: a review. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 29(4), 715-743.

Younis, K. H. (2022). Influence of sodium hydroxide (NaOH) molarity on fresh properties of self-compacting slag-based geopolymer concrete containing recycled aggregate. *Materials Today: Proceedings*, 56, 1733-1737.

Zhang, D., Wang, Y., Zhang, T., & Yang, Q. (2023). Engineering and microstructural properties of carbon-fiber-reinforced fly-ash-based geopolymer composites. *Journal of Building Engineering*, 79, 107883.

Zhang, P., Wang, J., Li, Q., Wan, J., & Ling, Y. (2021). Mechanical and fracture properties of steel fiber-reinforced geopolymer concrete. *Science and Engineering of Composite Materials*, 28(1), 299-313.

BÖLÜM 4

ELEKTRİKSEL KÜRLEME YOLUYLA GERİ DÖNÜŞTÜRÜLMÜŞ BETON AGREGALARIYLA GEOPOLİMER HARÇLARIN GELİŞTİRİLMESİ

ŞAHİN EKMEKCİ¹
MÜCTEBA UYSAL²

Giriş

Geleneksel beton ve çimento esaslı harçlar, inşaat sektöründe sıkça tercih edilen ve uzun süredir kullanılmaktadırlar. Bu beton ve harçlar; yüksek basınç dayanımı, kolay işlenebilirlik ve uzun servis ömrü gibi avantajları da sağlamaktadır (Neville, 2012). Ancak Portland çimentosunun baştan sona olan üretim aşaması, küresel karbon dioksit (CO₂) emisyonlarının yaklaşık %8'inden sorumlu olması nedeniyle önemli derecede çevresel soruna sebep olmaktadır (Mehta & Monteiro, 2014). Ayrıca, tüm bu olumlu etkilerine rağmen sık sık tercih edilen bu beton ve harçların olumsuz yönleri de hala bulunmaktadır. Hidratasyon reaksiyonları sonucu çimento esaslı malzemelerde ortaya çıkan ürünlerin (örneğin kalsiyum hidroksit) uzun vadede ve ileri yaşlarda bulunduğu ortam koşullarına göre

¹ Yüksek Lisans Öğrencisi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Yapı Malzemeleri Programı, Orcid: 0009-0003-3415-1675

² Prof. Dr., Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği, Orcid: 0000-0002-6827-9904

durabilite sorunlarına (kimyasal saldırı, karbonatlaşma) açık olduğu bilinmektedir. Bu nedenle, bu olumsuz etkileri ortadan kaldırmak adına sürdürülebilir alternatif bağlayıcı sistemlerin geliştirilmesi, hem çevresel etkilerin azaltılması hem de daha dayanıklı ve uzun ömürlü yapı malzemelerinin üretimi için oldukça önemli bir konuma gelmiştir (Scrivener et al., 2018).

Bu amaca yönelik olarak geopolimer harçlar, endüstriyel atıkların geri dönüştürülerek değerlendirilmesi, karbon emisyonu miktarının azaltılması ve yüksek dayanım ve dayanıklılık özellikleri sunması nedeniyle dikkat çekici bir seçenek olarak sektörde kendine yer edinmiştir (Torgal & Jalali, 2011; Pacheco-Torgal et al., 2008). Geopolimer üretiminde, uçucu kül, silis dumanı ve granüle yüksek fırın cürufu (YFC) gibi yan ürünlerin kullanımı yayginken, günümüzde seramik tozu, cam tozu, mermer tozu ve alüminyum çamuru gibi alternatif alüminosilikat kaynaklarının da başarılı ve etkili sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir (Medina et al., 2015; Türker et al., 2020).

Geopolimer harçların üretimi sırasında kullanılan aktivatörler arasında sodyum hidroksit (NaOH) ve sodyum silikat (Na_2SiO_3) çözeltileri öne çıkmakta ve çokça tercih edilmektedir. Bunun sebebi, NaOH , alüminosilikat yapıların çözünmesini sağlayıp etkileşime girecek olan madde miktarını arttırırken, sodyum silikat çözeltisi sistemdeki silika miktarını artırarak yoğun, dayanıklı bir matris oluşumuna katkı sağlaması olarak açıklanabilir. (Duxson et al., 2007; García-Lodeiro et al., 2015). Düşük molariteli NaOH çözeltileri (2M–6M) kullanılarak hem çevre dostu hem de düşük maliyetli üretim süreçleri gerçekleştirilebilmekte ve ek olarak iş güvenliği riskleri de yüksek molariteli üretimlere kıyasla daha az olmaktadır (Younis, 2022). Geopolimer beton ve harçların kürleme sürecinde ise, geleneksel ortam ve termal yöntemlerin yerine elektriksel kürleme gibi yenilikçi tekniklerin kullanılması, hem enerji verimliliğini ve kolay uygulanabilirliği artırmakta hem de kısa

sürede kullanılabilir düzeyde bir dayanım kazanımı sağlamaktadır (Aygün, 2023).

Geopolimerizasyon süreci, alkali bir ortamda alüminosilikat kaynaklarının çözünmesi ve yeniden polimerizasyonu ile gerçekleşmektedir. Sodyum hidroksit gibi alkali aktivatörlerin karışım içerisindeki çokluğuna bağlı olarak, geopolimerin reaksiyon miktarı, hızı ve elde edilen ürünün mekanik özellikleri doğrudan etkilenmektedir. Yapılan diğer çalışmalar incelendiğinde yüksek molariteye sahip çözeltiler (10M-16M) daha hızlı dayanım sonuçları vermektedir; ancak yüksek molariteye bağlı olarak hem maliyet hem de üretim sırasında karşılaşılabilecek riskler artmaktadır. Buna karşılık düşük molariteli sodyum hidroksit çözeltileri (2M-6M) kullanılarak hazırlanan geopolimer harçlar üzerinde de kayda değer ve kabul edilebilir dayanım değerleri elde edilebilmektedir (Gautam et al., 2015). Özellikle 6M molarite ile üretilmiş olan harçlar hem yeterli dayanımı sağlamakta hem de ekonomik ve güvenli bir seçenek olmaktadır (Younis, 2022). Harçların üretimi sonrasında tıpkı geleneksel tarzda olduğu gibi geopolimer harçlar ve betonlar da kürtleme ihtiyacı duymaktadır. Geleneksel kür yöntemleri yeni alternatifler karşısında yüksek enerji tüketimi ve zaman kaybı gibi olumsuz yönler barındırmaktadır. Alternatif bir seçenek olarak elektriksel kürtleme yöntemi, taze haldeki harca doğrudan düşük voltaj uygulanması ile iç sıcaklığın artmasına sebep olarak hidratasyon olayını ve dayanım kazanımını hızlandırmaktadır (Aygün, 2023). Benzer şekilde, Halis Alakara (2022), geri dönüştürülmüş asfalt tozu esaslı agregaya içeren alkali aktivatör içeren geopolimerlerde de elektriksel kürün mekanik dayanımı artırdığını ve özellikle erken yaş dayanımının gerekli olduğu uygulamalarda avantajlı olabileceğini göstermiştir. Alternatif beton üretimi ve yenilikler kapsamında düşük maliyet ve sürdürülebilirlik hedeflerinin devam ettirilebilmesi için beton atıklarının da yeniden kullanıma sunulması, sürdürülebilir inşaat uygulamaları açısından

oldukça önemlidir. Geri dönüşüm agregasının (GDA) geopolimer harçlarda kullanılıyor oluşu, doğal kaynak ve ham madde tüketimini azaltmasının yanında, atıkların değerlendirilmesi ve bertaraf edilmesine olanak sağlamaktadır. Ancak GDA tanelerinin yüzey pürüzlülüğü ve gözenekliliği, bağlanma mekanizmalarını etkileyerek mukavemet kayıplarına neden olabilmektedir. Bu nedenle, GDA kullanılan harçlarda düşük molariteli alkali çözeltilerle ve etkin kürlenme yöntemleriyle çalışılması gerekmektedir (Alakara, 2022).

Bu çalışmada, %50 oranında granüle yüksek fırın cürufu ve %50 seramik tozundan oluşan bir bağlayıcı sistemi temelde ele alınarak, %100 oranında standart kum ya da dere kumu yer değiştirilmiş geri dönüştürülmüş beton agregası (GDA) ile geopolimer harçlar üretilmiştir. Alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit ve sodyum silikat kullanılmış, düşük molariteli NaOH çözeltileri tercih edilmiştir. Alkali aktivatör/bağlayıcı oranı ise değişen düşük molaritelere göre de uygun işlenebilirlik göz önüne alınarak değişiklik göstermiştir. Harç numuneleri, ortam kürlenmesi, termal kürlenme ve elektriksel kürlenme yöntemleriyle kürlenmiş ve bu yöntemlerin basınç ve eğilme dayanımları üzerindeki etkileri incelenmiştir. Böylece, hem geri dönüşüm agregalarının yapı malzemelerinde %100 oranında kullanım potansiyeli hem de alternatif kürlenme yöntemlerinin etkinliği araştırılıp sonuçları da gözler önüne serilmiştir.

Ayrıca, gerçekleşen ön denemeler sonucunda en iyi performans gösteren molarite değeri üzerinde esas üretimler gerçekleştirilmiş olup geopolimer harçların mekanik performanslarını iyileştirmek amacıyla farklı türde lif takviyeleri ile güçlendirmeler hedeflenmiştir. Liflerin beton ve harçlar üzerinde sağlamış olduğu matris çatlaklarını engelleme ve enerji sönmeme gibi etkileri sayesinde dayanım ve sünekliğe olumlu katkılar sağlamasından dolayı bu çalışmada 3 farklı lif tipi, hem mekanik etki

hem de kür koşullarına bağı sonuçların incelenmesi adına tercih edilmiştir. Bu çalışmada da 6 mm boyutundaki karbon fiber, mikro çelik ve atık erozyon teli lifleri, sırasıyla hacimce %0,4, %0,8 ve %1,2 oranlarında harç matrisine eklenmiş; bu sayede eğilme ve basınç dayanımı üzerinde liflerin etkisi detaylı olarak incelenmiştir.

Materyaller ve Yöntemler

Materyaller

Düşük molarite ve farklı kür koşullarının etkinliğini ve farkını daha net bir şekilde anlayabilmek için bağlayıcı olarak granüle yüksek fırın cürufu (YFC) ve seramik tozu (CP) olmak üzere iki temel malzeme kullanılmıştır. Yüksek fırın cürufu, erken ve yüksek dayanım sağlaması sebebi ile düşük molarite ile üretilen geopolimer harçlar için etkili bir tercih olacağı düşünülmüştür. Seramik tozu ise, sıcaklık düzeyleri ile olan yakınlığı ve etkileşiminin daha iyi gözlemlenebileceği sebebi ile farklı kür koşullarında sonuçların daha yorumlanabilir olması için tercih edilmiştir.

Yüksek fırın cürufu, demir cevherinin yüksek fırınlarda ergitilmesi sırasında yan ürün olarak oluşan atık bir malzemedir. Granüle edilmiş formu, çimento ve beton üretiminde bağlayıcı madde olarak tercih edilebilmektedir. Cürufun yavaş yerine hızla soğutulması halinde, silis ve alüminyum oksit açısından zengin amorf bir yapıya dönüşür ve bu özellikleri sayesinde pozolanik davranış özelliği gösterir. Öğütülerek ince taneli hale getirildiğinde, çimento hidrasyon ürünleriyle reaksiyona girerek dayanımı artırır ve ortaya çıkacak dayanımın büyük çoğunluğunu sağlamaktadır. Ek olarak çevresel sürdürülebilirliğe katkı sağlar. Genellikle açık renkli ve camsı tane yapısına sahiptirler. Yoğunlukları 2.9 g/cm^3 civarında seyretnmektedir.

Seramik tozu, seramik üretimi sırasında oluşan atıkların öğütülmesiyle elde edilen ince taneli bir malzemedir ve genellikle

turuncuya yakın açık renklidir. Yoğunluğu $2.5-2.7 \text{ g/cm}^3$ civarındadır. Bu toz, yüksek oranda silika ve alümina içerdiğinden dolayı puzolanik özellik gösterir ve çimento yerine ikame edilerek beton ve harçlarda kullanılabilir. Seramik tozunun kullanımı da tıpkı diğer puzolanik malzemelerde olduğu gibi atık yönetimine katkı sağlar ve çevresel etkileri azaltır. Tablo 1’de bu çalışmada kullanılan granüle yüksek fırın cürufu ve seramik tozunun kimyasal bileşenlerine yer verilmiştir.

Bağlayıcılar ile etkileşime girmesi için sodyum hidroksit (NaOH) ve sodyum silikat (Na_2SiO_3) kullanılmış olup oranları sırasıyla 1/2 birim şeklindedir. Sodyum hidroksit, pH değeri yaklaşık 13.4 olan güçlü bir alkali olup, geopolimer üretiminde aktivatör olarak kullanılır. NaOH, alüminosilikatların çözünmesini sağlayarak polimerizasyon sürecini başlatır. Beyaz ve opak kristaller halinde tuza benzer bir görünüme sahiptir ve kullanılmadan önce istenilen molariteye göre su içerisinde çözündürülmesi gerekmektedir. Yoğunluğu 2.13 g/cm^3 olarak ifade edilebilir. Sodyum silikat, geopolimer harç üretiminde sodyum hidroksit ile birlikte kullanılan ikinci aktivatördür. Silika içeriği sayesinde, polimer zincirlerinin oluşumunu destekler ve harcın mekanik özelliklerini iyileştirir. Ayrıca, sodyum silikatın viskozitesi, karışımın işlenebilirliğini etkiler. Renksiz ancak biraz kıvamlı, şurup gibi bir görünüme sahiptir. Yoğunluğu 2.4 g/cm^3 ’tür. SiO_2 içeriği %24–26, Na_2O içeriği ise %11.5–13.5 civarındadır. Modül çoğu zaman ($\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ oranı): 1.90–2.25 aralığında seyretmektedir.

Agrega olarak, tane boyutu $<2 \text{ mm}$ olmak üzere %100 oranında tamamen geri dönüştürülmüş agrega (GDA) kullanılmıştır. Geri dönüştürülmüş agrega, yıkılmış beton yapıların kırılmasıyla ya da eski test numunelerinden elde edilen malzemedir. GDA, doğal agregalara göre daha gözenekli bir yapıya sahip olduğundan dolayı su emme kapasitesi de daha yüksektir. Bu özellikleri, geopolimer harçların dayanımını ve dayanıklılığını etkileyebilir. Ancak, uygun

karışım tasarımı ve kürleme yöntemleri ile GDA'nın olumsuz etkileri minimum düzeye indirilebilmektedir. Bu çalışmada kullanılan agregalar ise üniversite içerisinde yer alan test laboratuvarından temin edilmiştir. Kullanılan numuneler birbirinden farklı dayanım sınıfına ve içeriklere sahip olup üzerlerinde daha önce ilgili testleri gerçekleştirilmiş atık numunelerdir. Bu agregaların görünümü düzensiz şekilli, gözenekli ve gri renktedir. Yoğunluğu $2.3\text{--}2.5\text{ g/cm}^3$ civarındadır. Su emme oranı %5–10 gibi diğer agregalara kıyasla daha yüksektir. Tablo 2’de 1 m^3 için bu çalışmada üretilen farklı molaritelerdeki harçlara ilişkin karışım hesabı, reçeteye yer verilmiştir.

Bu çalışmada, eğilme ve basınç dayanımını arttırabileceği ve çatlak kontrolü açısından etkili sonuçlar verebileceği değerlendirilen üç farklı lif türü kullanılmıştır. Karbon fiberler, yüksek çekme dayanımı ve düşük yoğunlukları sayesinde üretilen geopolimer harç sistemlerinde matris çatlaklarını kontrol altına almakta etkili sonuçlar göstermiş, elektriksel iletkenlik özellikleri nedeniyle kürleme yöntemleriyle gereken uyumu yakalamıştır (Zhang et al., 2023). Mikro çelik lifler, yüksek elastisite modülü değeri sayesinde çekme yüklerinin dengeli dağılımını üstlenerek harcın sünekliğini artırma amacı ile kullanılmıştır (Zhang et al., 2021). Atık erozyon telleri ise diğer liflerden daha farklı bir amaca hizmet ederek sürdürülebilirlik ilkesi doğrultusunda geri kazanılmış metal tel formunda olup, hem ekonomik hem de çevreci bir takviye malzemesi olarak ele alınmıştır (Umer et al., 2025). Tüm lif türleri 6 mm civarında boyutu olup karışımlara %0,4, %0,8 ve %1,2 hacim oranlarında ayrı ayrı ilave edilmiştir. Kullanılan liflerin yoğunlukları da sırasıyla $1,85\text{ gr/cm}^3$, $7,85\text{ gr/cm}^3$ ve $8,48\text{ gr/cm}^3$ olarak belirtilmektedir. Tablo 3’te lifli serilerin lif yüzdelere ait karışım miktarlarına yer verilmiştir.

Tablo 1 - Bağlayıcıların kimyasal bileşimi.

Ana Oksit (%)	GBFS	CP
SiO ₂	40.5	65.44
Al ₂ O ₃	12.8	15.45
Fe ₂ O ₃	1.1	7.11
CaO	35.5	4.65
MgO	5.8	1.28
Na ₂ O	0.79	0.8
K ₂ O		2.15
SO ₃	0.18	0.06
TiO ₂	0.75	
LOI	0.03	3.06

Tablo 2 - 1 m³ hacim için karışım oranları

Seriler	a/b Oranı	YFC (kg)	CP (kg)	GDA (kg)	NaOH (kg)	Na ₂ SiO ₃ (kg)	Toplam (kg)
2M	1.00	292.97	292.97	1464.85	195.31	390.62	2636.72
4M	0.85	292.97	292.97	1464.85	166.02	332.04	2548.85
6M	0.85	292.97	292.97	1464.85	166.02	332.04	2548.85
8M	0.70	292.97	292.97	1464.85	136.72	273.44	2460.95

*2M,4M,6M,8M - (%50 YFC + %50 CP + %100 GDA)

Tablo 3 - Hacimce sırasıyla %0,4-%0,8-%1,2 oranında Karbon fiber; Mikro çelik ve Atık erozyon teli için 1 m³'e göre hazırlanmış karışım oranları

Seriler	a/b Oranı	YFC (kg)	CP (kg)	GDA (kg)	NaOH (kg)	Na ₂ SiO ₃ (kg)	Lif (kg)	Toplam (kg)
R	0.85	292.97	292.97	1464.85	166.02	332.04	-	2548.85
0,4KF	0.85	292.97	292.97	1464.85	166.02	332.04	7.38	2556.23
0,8KF	0.85	292.97	292.97	1464.85	166.02	332.04	14.76	2563.61
1,2KF	0.85	292.97	292.97	1464.85	166.02	332.04	22.14	2570.99
0,4MÇ	0.85	292.97	292.97	1464.85	166.02	332.04	31.40	2580.25
0,8MÇ	0.85	292.97	292.97	1464.85	166.02	332.04	62.80	2611.65
1,2MÇ	0.85	292.97	292.97	1464.85	166.02	332.04	94.20	2643.05
0,4AT	0.85	292.97	292.97	1464.85	166.02	332.04	33.90	2582.75
0,8AT	0.85	292.97	292.97	1464.85	166.02	332.04	67.80	2616.65
1,2AT	0.85	292.97	292.97	1464.85	166.02	332.04	101.70	2650.55

* R- Referans, KF- Karbon fiber; MÇ-Mikro çelik, AT- Atık erozyon teli

Yöntemler

İlk aşamada yapı test laboratuvarından temin edilen farklı dayanım sınıfına ve bileşenlere sahip birçok farklı numuneler Los Angeles cihazında bilyeler aracılığı ile döndürülerek öğütülmüştür. Daha sonrasında 2 mm elek açıklığına sahip elek kullanılarak, kullanılacak agrega tane boyutunun ≤ 2 mm olması sağlanmıştır. 2 mm'nin altında kalan elde edilen tüm agregalar homojen olması için mikser içerisinde kuru halde karıştırılmış ve o şekilde paketlenerek kullanıma hazır hale getirilmiştir.

Numunelerin üretilmesine geçildiğinde ise üretim, reçeteye bağlı kalınarak gerçekleştirilmiştir ve üzerlerinde ASTM C349 ve TS EN 196-1 standartlarına uygun olacak şekilde 7 günlük eğilme ve basınç dayanım sonuçlarının elde edilmesi için 40x40x160 mm boyutlarında prizmatik numuneler üretilmiştir. İki adet ortam, iki adet ısı ve iki adet elektriksel kür koşullarına maruz bırakılmak üzere her seri için toplamda altışar adet prizmatik numune üretimi gerçekleştirilmiştir.

Harç hazırlanırken miksera ait kap içerisine ilk olarak granüle yüksek fırın cürufu ve seramik tozu kuru halde karıştırılıp homojen hale getirilmiştir. Ardından, 1 birim sodyum hidroksit 2 birim sodyum silikat çözeltisi istenilen molariteye göre sıvı faz olarak bağlayıcıların üzerine eklenerek karıştırılmıştır. Son olarak harcın oluşması için belirlenen miktardaki geri dönüşüm agregası da eklenerek karıştırıldıktan sonra harç, kalıplara yerleştirilmiştir.

Ortam kürüne maruz kalacak olan numuneler, 24 saatlik priz alma süresini tamamladıktan sonra kalıptan çıkarılarak 23 ± 2 °C sıcaklığa ve %95 bağıl nem oranına sahip kürleme kabinine yerleştirilerek 7 günlük bekleme sürelerinin tamamlanması sağlanmıştır. Isıl küre maruz kalacak numuneler, 24 saatlik priz alma süresini tamamladıktan sonra kalıptan çıkarılarak 80°C sıcaklıktaki etüve yerleştirilecek 24 saat boyunca bekletilmiştir. Ardından

etüvden çıkarılan numuneler oda sıcaklığında soğuduktan sonra 7 günlük bekleme süresini tamamlaması için aynı kürleme kabinine yerleştirilmiştir. Son olarak elektriksel küre maruz kalacak numuneler ise henüz taze ve akışkan haldeyken iki ucunda bakır levhalar bulunan tahta kalıplara yerleştirilmiş ve 20V değerine karşılık gelecek alternatif akım etkisine 24 saat boyunca maruz bırakılmıştır. Bir günün sonunda bu kalıplardan da çıkarılan numuneler kürleme kabinine 7 günü tamamlamaları için yerleştirilmişlerdir.

Bir haftalık bekleme süresinin ardından tüm prizmatik numuneler üzerinde daha önce belirtilen standartlara uygun olacak şekilde önce eğilme ardından basınç dayanımı testleri gerçekleştirilmiştir. Eğilme dayanımlarının belirlenmesi ardından prizmadan elde edilen tek numuneye ait iki parça üzerinde de basınç dayanımı testi yapılarak iki parçanın sonuçlarının ortalaması alınmıştır.

Esas üretimlere geçildiği zaman üretim şeklinde lifli serilerde biraz fark bulunmaktadır. Lifler, homojen bir dağılım sağlamak amacıyla bağlayıcılar ile alkali aktivatörün karıştırma işleminin ardından ve agrega eklenmesinden önceki aşamada miksera ilave edilmiştir. Üç farklı lif türü için ayrı ayrı %0,4, %0,8 ve %1,2 oranlarında üretim yapılmıştır. Tüm lifli seriler, ASTM C348 ve TS EN 196-1 standartlarına uygun şekilde test edilmek üzere prizmatik kalıplara dökülerek ısı ve elektriksel olmak üzere iki farklı kürleme yöntemine tabi tutulmuştur. Böylece her lif tipinin ve oranının farklı kürleme koşulları altındaki mekanik performansa etkisi ayrıntılı olarak değerlendirilmiştir.

Sonuçlar ve Tartışma

Bu çalışmadan elde edilen bulgular, düşük molariteli sodyum hidroksit ve sodyum silikat çözeltileri ile hazırlanmış geopolimer harçların hem kürleme yöntemi farklılıklarına hem de molarite

değerine bağlı olarak mekanik dayanım performanslarının önemli ölçüde değiştiğini göstermektedir. Eğilme ve basınç dayanımı değerleri birlikte incelendiğinde, her üç kür yöntemi arasında en yüksek dayanım değerlerine genellikle ısıtılma kür (T) uygulanmış numunelerde ulaşıldığı görülmektedir. Özellikle 6M ve 8M molariteli numunelerde bu fark daha belirgin olup 6M-T serisinde basınç dayanımı yaklaşık 31.9 MPa değerine ulaşmış, eğilme dayanımı ise 4.47 MPa değerinde sonuç vermiştir. Bu bulgu, yüksek sıcaklık etkisinin geopolimerizasyon sürecini hızlandırarak daha yoğun ve güçlü bir matris oluşumunu desteklediğini göstermektedir (Duxson et al., 2007).

Isıl kür yönteminin haricinde alternatif ve yeni bir kür yöntemi olan elektriksel kür (E) yönteminin de dikkat çeken bir etkisi olduğu görülmektedir. 2M ve 4M gibi oldukça düşük molarite değerlerinde bile elektriksel kür ile kürlenmiş numunelerin hem eğilme hem de basınç dayanımında ortam koşullarına (A) gerçekleşen küre kıyasla pozitif yönde bir etkisi olduğu ve anlamlı artışlar sağladığı gözlenmiştir. Örneğin 2M-A serisine ait numuneler yaklaşık 1.1 MPa eğilme ve maksimum 6.6 MPa gibi bir basınç dayanımı değeri gösterirken, 2M-E numunesi maksimum 2.1 MPa eğilme dayanımı ve ortalama olarak yaklaşık 10 MPa basınç dayanımı değerine ulaşmıştır. Bu durum, düşük molariteli sistemlerde elektriksel kürün, matrisin iç yapısını aktive etmede etkili olduğunu ve elektriksel kürlemede olduğu gibi diğer alternatif kürleme tekniklerinin de klasik yöntemlere göre bazı durumlarda daha avantajlı olabileceğini ortaya çıkarmaktadır (Aygün, 2023; Alakara, 2022). Şekil 1’de farklı molarite ve kür koşullarına sahip numunelerin 7 günlük eğilme ve basınç dayanımı sonuçlarına ilişkin bir grafiğe yer verilmiştir.

Tablo 4’te değişken düşük molarite değerlerine sahip ve üç farklı kür koşuluna maruz kalan numuneler üzerinde yapılan tüm eğilme ve basınç testlerinin sonuçları Mpa cinsinden verilmektedir.

Referans numunelerle kıyaslandığında lif kullanımının, tüm lif türlerinde genel olarak dayanım üzerinde olumlu etkiler oluşturduğu gözlemlenmiştir. Tablo 5’te referans ve lifli serilere ait eğilme ve basınç dayanımı sonuçlarının ortalama değerlerine yer verilmiştir.

Tablo 4 - Farklı molarite değerlerine sahip ve farklı kür koşullarına maruz bırakılmış geopolimer harçların 7 günlük eğilme ve basınç dayanımı sonuçları

SERİLER	Dayanım Sonuçları			
	Numune		Numune	
	Eğilme Dayanımı (MPa)	Basınç Dayanımı (MPa)	Eğilme Dayanımı (MPa)	Basınç Dayanımı (MPa)
2M-O	1.08	6.15	1.10	6.63
2M-E	2.13	11.04	1.91	9.96
2M-I	3.15	14.60	3.61	14.53
4M-O	2.30	8.46	1.90	8.11
4M-E	3.35	19.23	3.36	20.11
4M-I	4.70	27.79	4.34	26.40
6M-O	3.32	11.39	3.30	11.87
6M-E	3.86	24.88	3.88	26.13
6M-I	4.47	31.90	4.46	28.53
8M-O	3.61	9.55	3.98	9.73
8M-E	4.99	15.40	5.48	15.44
8M-I	5.91	21.47	6.02	21.46

**2M,4M,6M,8M - (O- Ortam kürü, E- Elektriksel kür, I- Isıl kür)*

Tablo 5 - Lifli serilere ait 28 günlük eğilme ve basınç dayanımı sonuçlarının ortalama değerleri.

SERİLER	Dayanım Sonuçları	
	ORTALAMA	
	Eğilme Dayanımı (MPa)	Basınç Dayanımı (MPa)
R-I	2.88	17.59
R-E	2.12	16.01
0.4KF-I	3.25	19.50
0.8KF-I	3.50	22.09
1.2KF-I	4.12	18.69
0.4KF-E	2.35	16.45
0.8KF-E	2.81	17.61
1.2KF-E	3.15	19.57
0.4MÇ-I	3.17	23.24
0.8MÇ-I	3.66	18.64
1.2MÇ-I	3.49	21.85
0.4MÇ-E	1.99	15.24
0.8MÇ-E	2.65	19.12
1.2MÇ-E	1.40	16.99
0.4AT-I	2.22	25.45
0.8AT-I	2.31	24.42
1.2AT-I	2.27	24.28
0.4AT-E	1.78	17.36
0.8AT-E	1.92	18.37
1.2AT-E	2.10	21.56

**R- Referans, KF- Karbon fiber, MÇ- Mikro çelik, AT- Atık erozyon teli (I- Isıl kür, E- Elektriksel kür)*

Karbon fiber takviyeli numuneler incelendiğinde, özellikle %1,2 oranı ile ısıl kür (1.2KF-I) uygulanmış seride eğilme dayanımı 4.12 MPa ile o lif türüne ait en yüksek değere ulaşmıştır. Bu durum, karbon liflerin matris içi mikro çatlakları azaltıcı etkisine dolayısıyla liflerin sıyrılma ve kopmasına olan direncinin fazla olması ile açıklanabilir (Zhang et al., 2023). Elektriksel kür uygulanan karbon fiberli serilerde ise %1,2 oranında yine kür koşuluna göre kendi içerisinde kabul edilebilir düzeyde yüksek eğilme dayanımı gözlemlenmiş (3.15 MPa), ancak basınç dayanımı ısıl kür uygulanan

numuneler kadar başarılı sonuç vermeyerek 19.57 MPa ile sınırlı kalmıştır.

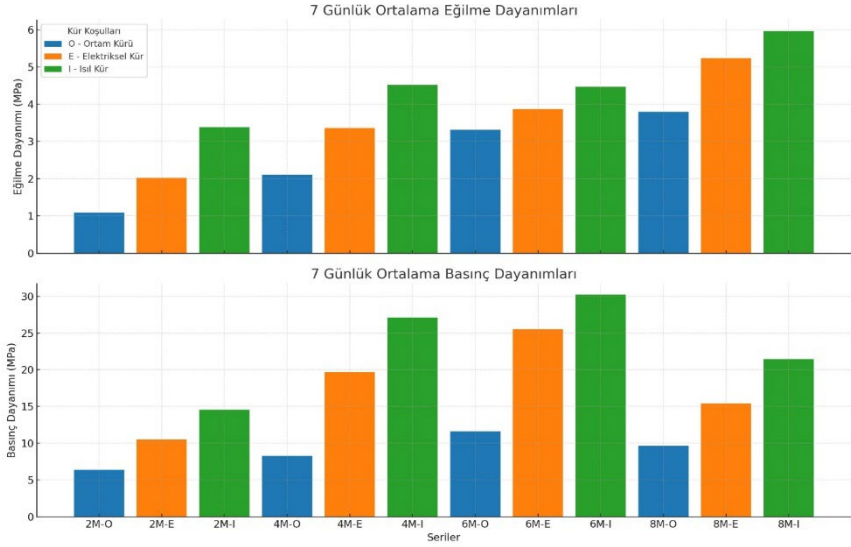
Mikro çelik lif takviyeli serilerde özellikle %0,4 hacimce kullanım oranına sahip ve ısıl kür uygulanmış (0.4MÇ-I) numuneler, ortalama 23.24 MPa ile yüksek bir basınç dayanımı göstermiştir. Eğilme dayanımı açısından ise %0,8 lif kullanım oranına sahip ısıl kür uygulanmış seri (0.8MÇ-I) 3.66 MPa ile en yüksek değere ulaşmıştır. Bu sonuçlar, çelik liflerin çekme yüklerini taşıyıp matris çatlamasını kontrol edebilme potansiyelini gösterir niteliktedir (Zhang et al., 2021).

Atık erozyon teli katkılı serilerde bir durum daha fazla dikkat çekmektedir. Isıl kür uygulanan serilerin hem eğilme hem de basınç dayanımı açısından diğer liflere kıyasla daha stabil sonuçlar vermesi olarak söylenebilir. Hacimce %0,4 oranlı atık erozyon teli kullanılan ısıl kürli seri (0.4AT-I) 25.45 MPa ile tüm seriler arasında en yüksek basınç dayanımını vermiştir. Lif katkı oranı arttıkça eğilme dayanımında az bir miktarda artış görülürken, basınç dayanımları stabil kalmıştır. Bu durum, atık tellerin pratik anlamda homojen dağılmaması ya da segregasyona uğramış olmaları ile açıklanabilir (Umer et al., 2025).

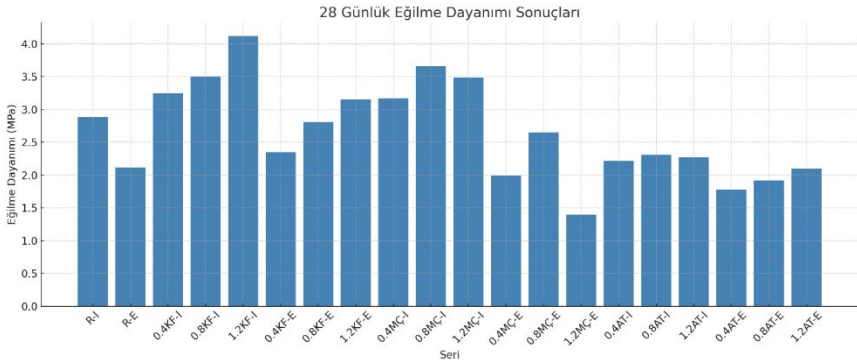
Lifli serilere ait 28 günlük ortalama eğilme dayanımı sonuçları şekil 2’de, basınç dayanımına ait sonuçlar ise şekil 3’te grafik olarak gösterilmiştir.

Şekil 1 - Farklı molarite ve kür koşullarına sahip numunelerin 7 günlük eğilme ve basınç dayanımı sonuçları

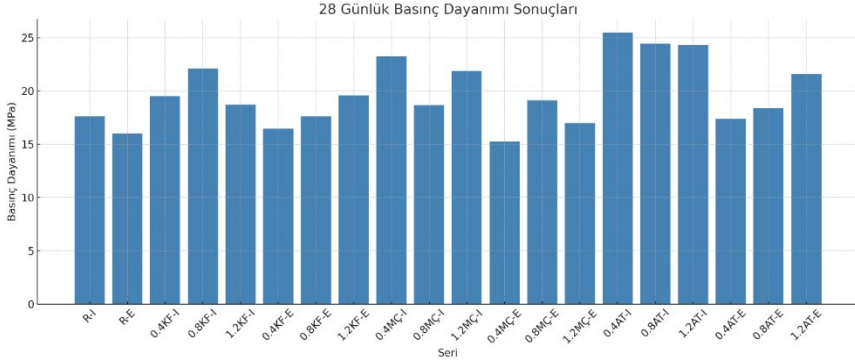
7 Günlük Dayanım Sonuçları (Ortalama) - Farklı Kür Koşullarına Göre



Şekil 2 - Lifli serilere ait 28 günlük ortalama eğilme dayanımı sonuçları



Şekil 3 - Lifli serilere ait 28 günlük ortalama basınç dayanımı sonuçları



Sonuçlar

- Kürlenme türlerine ek olarak, molarite düzeyinin de harç performansı üzerinde ciddi etkileri olduğu ortaya konmuştur. Molarite arttıkça her kür yöntemi için dayanım değerlerinin belirgin şekilde artmıştır.
- Özellikle 4M ile 6M arasında hem eğilme hem de basınç dayanımlarında sıçrama yaşanmış, bu da 6M değerinin düşük molarite sınıfı içerisinde düşük maliyet ve çevresel risklerle birlikte yüksek mekanik performans sağlayabilen bir eşik değer olabileceğini göstermiştir.
- Ancak 8M'de bazı kür tiplerinde (örn. 8M-A) dayanım değerlerinin 6M-E veya 6M-T kadar yüksek olmaması, yüksek molaritenin her koşulda en iyi sonucu garanti etmediğinin en büyük göstergesidir.
- Genel olarak bakıldığında, düşük molarite, elektriksel kürlenme ve %100 geri dönüştürülmüş agrega kullanımına ve agregaya bağlı yüzey özellikleri ve gözenekliliği gibi zayıflatıcı etkilerine rağmen birçok numunede kabul edilebilir dayanım seviyelerine ulaşılmıştır.

- Ayrıca bu çalışmada kullanılan bağlayıcı sistemi (%50 YFC + %50 Seramik Tozu) ve düşük molariteli çözeltilerle birlikte uygulanan alternatif kürleme teknikleri, geopolimer teknolojisinin daha ekonomik, çevre dostu ve uygulanabilir bir yapı malzemesi haline gelebileceğini destekler nitelikte bulunmuştur.
- Farklı lif türleri ve oranlarının geopolimer harçların mekanik açıdan özelliklerini önemli ölçüde etkilediği gözlemlenmiş; kürleme farklılıkları ile olan etkileşimleri ise performansı belirleyen temel unsurlardan biri olmuştur

Kaynakça

Alakara, E. H. (2022). Geri Dönüştürülmüş Asfalt Tozunun Alkali Aktifleştirilmiş Cüruf Harçları Üzerindeki Etkisi. Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi, 14(3), 362–368.

Aygün, B. F. (2023). Farklı Lifler İçeren Uçucu Kül-Cüruf Esaslı Geopolimer Kompozitlerde Farklı Kür Yönteminin Etkisiyle Mekanik Özelliklerin İncelenmesi. THBB Akademi.

Duxson, P., Fernández-Jiménez, A., Provis, J. L., Lukey, G. C., Palomo, A., & van Deventer, J. S. J. (2007). Geopolymer technology: the current state of the art. Journal of Materials Science, 42(9), 2917-2933.

García-Lodeiro, I., Palomo, A., Fernández-Jiménez, A., & Macphee, D. E. (2015). Compatibility studies between N-A-S-H and C-A-S-H gels: Study in the ternary diagram $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$. Cement and Concrete Research, 74, 9-17.

Gautam, L., Sheethal, K. T., & Puttiah, P. K. W. (2015). Development of High Strength Geopolymer Concrete using Low Molarity NaOH. International Journal of Engineering Research & Technology, 4(7).

Medina, C., Juan, A., & Sánchez de Rojas, M. I. (2015). Mechanical behaviour of recycled concrete with ceramic aggregates. Construction and Building Materials, 68, 68-76.

Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2014). Concrete: Microstructure, Properties, and Materials (4th ed.). McGraw-Hill Education.

Neville, A. M. (2012). Properties of Concrete (5th ed.). Pearson.

Pacheco-Torgal, F., Castro-Gomes, J., & Jalali, S. (2008). Alkali-activated binders: A review. *Construction and Building Materials*, 22(7), 1305-1314.

Scrivener, K., John, V. M., & Gartner, E. (2018). Eco-efficient cements: Potential, economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry. *Cement and Concrete Research*, 114, 2–26.

Torgal, F. P., & Jalali, S. (2011). Eco-efficient construction and building materials research. *Construction and Building Materials*, 25(12), 581-591.

Türker, P., Demir, İ., & Karakuzu, K. (2020). Seramik atıkları kullanılarak üretilen sürdürülebilir betonlar üzerine bir araştırma. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*.

Umer, M., Ahmad, J., Anis Khan, H., & Khushnood, R. A. (2025). Valorization of recycled steel wires from end-of-life tires as an alternative fiber reinforcement in geopolymer concrete to foster circularity: a review. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 29(4), 715-743.

Younis, K. H. (2022). Influence of sodium hydroxide (NaOH) molarity on fresh properties of self-compacting slag-based geopolymer concrete containing recycled aggregate. *Materials Today: Proceedings*, 56, 1733-1737.

Zhang, D., Wang, Y., Zhang, T., & Yang, Q. (2023). Engineering and microstructural properties of carbon-fiber-reinforced fly-ash-based geopolymer composites. *Journal of Building Engineering*, 79, 107883.

Zhang, P., Wang, J., Li, Q., Wan, J., & Ling, Y. (2021). Mechanical and fracture properties of steel fiber-reinforced geopolymer concrete. *Science and Engineering of Composite Materials*, 28(1), 299-313.

BÖLÜM 5

GÜÇLENDİRME MALZEMESİ OLARAK POLİÜRE: ÖZELLİKLERİ, AVANTAJLARI VE DİĞER SİSTEMLERLE KARŞILAŞTIRMASI

1. HARUN YÜKSEL GÜLYAPRAK¹

2. ALİ GÜRBÜZ²

Giriş

Yapıların dayanım ve dayanıklılık özelliklerini artırmak amacıyla çeşitli güçlendirme yöntemleri geliştirilmiştir. Son yıllarda, polimer esaslı malzemeler arasında yer alan poliüre, sahip olduğu hızlı kürlenme süresi, yüksek esneklik, kimyasal dayanıklılık ve su yalıtımı özellikleri sayesinde yapı sektöründe dikkat çeken bir kaplama malzemesi haline gelmiştir. Özellikle duvar, döşeme ve beton yüzeylerde uygulanabilen poliüre, taşıyıcı olmayan yapı elemanlarında yüzey bütünlüğünü koruyarak sınırlı da olsa mekanik katkı sağlar. Hafif, ekonomik ve hızlı uygulanabilir olması onu geleneksel güçlendirme yöntemlerine alternatif kılmaktadır. Bu çalışmada, poliürenin yapılarda güçlendirme amaçlı kullanım

¹ Öğr. Gör., Artvin Çoruh Üniversitesi, İnşaat Bölümü, Orcid: 0000-0002-2603-1679

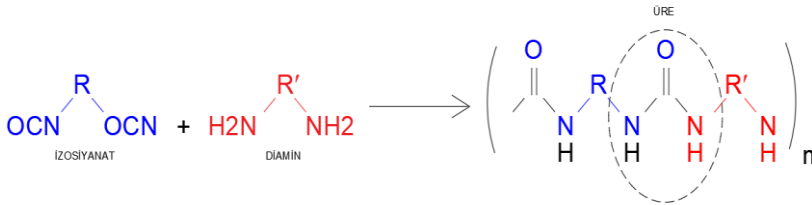
² Dr. Öğr. Üyesi, Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği, Orcid: 0000-0003-1123-9968

potansiyeli, mevcut literatür doğrultusunda teknik olarak diğer güçlendirme malzemeleri ile karşılaştırılarak ele alınacaktır.

Günümüzde mevcut yapı stokunun önemli bir bölümü, yürürlükteki yapı güvenliği standartlarını karşılamamakta; bu durum özellikle deprem riski taşıyan bölgelerde ciddi can ve mal kayıplarına yol açmaktadır. Bu nedenle, yapıların güçlendirilmesi hem mühendislik hem de ekonomik açıdan öncelikli bir konu haline gelmiştir. Geleneksel güçlendirme yöntemleri (betonarme mantolama, çelik karkas uygulamaları, lifli polimer sistemler gibi) genellikle yüksek maliyetli, iş gücü yoğun ve uygulama süresi uzun işlemler gerektirir. Bu bağlamda, daha hafif, hızlı ve ekonomik çözümlere duyulan ihtiyaç her geçen gün artmaktadır.

Poliüre, yapı sektöründe son yıllarda özellikle su yalıtımı ve kaplama amaçlı olarak kullanılan, iki bileşenli, hızlı kürlen bir polimer sistemidir. İzosiyanat ve amin reçinelerinin reaksiyonu ile oluşan bu malzeme, uygulandıktan sonra saniyeler içinde kürlenerek elastik ve dayanıklı bir tabaka oluşturur. Başta endüstriyel zemin kaplamaları, otoparklar, tüneller ve çatı sistemleri olmak üzere birçok alanda yaygın şekilde kullanılmaktadır. Ancak bu malzemenin yalnızca yüzey koruyucu değil, aynı zamanda yapı elemanlarının dayanım özelliklerine katkı sağlayan bir malzeme olarak değerlendirilebilme potansiyeli de dikkat çekmektedir.

Şekil 1 Poliürenin bağ yapısı



Kaynak: (Shojaei & ark., 2021: 32)

Poliüre malzemesinin yapısal alandaki kullanımına yönelik literatürde yer alan çalışmalar şunlardır:

Poliüre esaslı kaplamalar, son yıllarda yapı malzemelerinin patlama ve darbe etkilerine karşı dayanımını artırmak amacıyla yaygın olarak araştırılmaktadır. Düşük elastisite modülü ve yüksek uzama kapasitesi sayesinde poliüre, ani enerji etkilerine karşı etkili bir sönümleyici katman oluşturur. Bu özellik, poliüreyi darbe ve patlama yükleri altındaki yapı elemanlarının korunmasında tercih edilen bir malzeme hâline getirmiştir. (Yue & ark., 2025), poliüre kaplamanın betonun patlamaya karşı direncini artırabildiğini ve ikincil hasarların oluşmasını önleyebildiğini belirtmiştir. (Wu & ark., 2022: 46) ise, özellikle savunma yapıları, altyapı tesisleri ve yüksek riskli alanlardaki uygulamalarda poliürenin darbe ve patlama dayanımını artırmaya yönelik önemli avantajlar sunduğunu vurgulamıştır. Benzer şekilde (Zhang & ark., 2022: 14) de bu yönde dikkate değer bulgular elde etmiştir.

Poliüre kaplamalar; duvarcılık, metal, beton ve kompozit malzemeler dahil olmak üzere çok çeşitli yapısal elemanlarda kullanılabilen, düşük maliyetli, hafif, esnek ve aşınmaya dayanıklı bir malzeme olarak tanımlanmaktadır. (Mistry & ark., 2023: 32), poliüre kaplamaların inşaat sektöründeki uygulamalarda sağladığı avantajlara dikkat çekmiş, (Shojaei & ark., 2021: 32) ise poliürenin onarım, güçlendirme, sızdırmazlık ve yalıtım gibi çok çeşitli amaçlarla kullanılabileceğini ifade etmiştir.

Bununla birlikte, literatürde poliürenin doğrudan yapı elemanlarında güçlendirme amacıyla kullanılmasına ilişkin çalışmaların hâlâ sınırlı olduğu görülmektedir. Poliüre, çelik elemanlarla birlikte kullanıldığında da güçlendirme amacıyla olumlu sonuçlar verebilmektedir. (Lim & ark., 2025: 25), çekme dayanımı düşük olan poliürenin modifiye edilerek çelik takviyesiyle birlikte kullanıldığında, karbon fiber takviyesinden daha etkili sonuçlar verebileceğini ileri sürmüştür.

(Yu & ark., 2023: 292), poliüre ile kaplanan betonarme kirişlerin eğilme dayanımında artış sağladığını, ilk çatlak dayanımının yükseldiğini ve çatlak genişliklerinin azaldığını belirtmiştir. Bu kapsamda poliürenin, hem tek başına hem de fiber takviyeli malzemelerle birlikte kullanılabilirliği vurgulanmaktadır. (Greene & ark., 2013: 17), poliürenin kiriş numunelerin eğilme dayanımının önemli derecede arttırdığını ve poliürenin onarım ve güçlendirme çalışmalarında kullanılabilir bir malzeme olduğunu belirtmişlerdir.

Deprem etkisinde süneklik, yapı elemanlarının hasar almadan şekil değiştirebilme kapasitesi açısından oldukça önemli bir özelliktir. Yapı güvenliğini artırmak ve ani yüklemelere karşı dayanıklı sistemler oluşturmak için süneklik temel bir gereksinimdir. Poliüre, yüksek elastikiyeti, çatlak köprüleme kapasitesi ve enerji sönümleme özellikleri sayesinde bu ihtiyaca etkili şekilde cevap verebilmektedir. Yapı elemanlarına uygulandığında sünekliği artırarak, özellikle deprem gibi dinamik yükler altında performansın iyileşmesini sağlar (Parnianni & Je, 2015; Greene & ark., 2013; Szafran & Matusiak, 2020; Cuong & ark., 2023).

Yığma yapıların, özellikle depremler ve doğal afetler karşısında gösterdikleri zayıf davranış hem malzeme hem de sistem düzeyinde koruma gerekliliğini ortaya koymaktadır. Bu tür yapılar, genellikle düşük sünekliğe sahip olmaları, rijit davranış sergilemeleri ve bağlantı detaylarının yetersizliği nedeniyle yüksek risk taşımaktadır. Bu nedenle, yığma yapı elemanlarının korunması yalnızca yapının ömrünü uzatmakla kalmaz; aynı zamanda can güvenliği açısından da büyük önem taşır.

Poliüre kaplamalar, yığma duvarların dağılmasını ve parçalanmasını engelleyerek yapı bütünlüğünü korumaya yardımcı olur. Kaplama sayesinde çatlak oluşumu sınırlandırılır, mevcut çatlakların ilerlemesi yavaşlatılır ve genel rijitlik korunur. Ayrıca, poliüre uygulamaları duvarların yatay yükler altındaki kesme

dayanımını artırarak, yapının genel deprem performansına olumlu katkı sağlar (Öztürk & ark., 2025: 469). (Cuong & ark.,2023: 54) poliüre kaplamasının tuğla duvarların bükülme ve diyagonal bası dayanımını önemli ölçülerde iyileştirdiğini vurgulamışlardır. Poliürenin, tek tarafı ve çift tarafı poliüre ile kaplı duvar örneklerinin eğilme kapasitesini, kaplamasız duvar örneklerine göre sırasıyla %137, %204 oranında artırdığını belirtmişlerdir.

Poliüre kaplamalar yığma yapı elemanlarında basınç dayanımını da belirli ölçüde artırabilmektedir. Ancak bu artış genellikle eğilme ve kesme dayanımında gözlemlenen iyileşmelere kıyasla daha sınırlıdır. (Cuong ve ark., 2022: 348), yapılan deneysel çalışmaların uygulama detaylarına bağlı olarak basınç dayanımının farklı malzeme kombinasyonları ile artırılabileceğini göstermektedir.

Poliürenin sunduğu çeşitli yapısal avantajlar, onu yaygın olarak kullanılan diğer güçlendirme malzemeleriyle birlikte kullanıma uygun hâle getirmiştir. Günümüzde fiber takviyeli malzemeler, yapı elemanlarının güçlendirilmesinde sıklıkla tercih edilmekle birlikte, bu malzemelerin uygulama sürecinde ise güçlendirme malzemesi ile eleman arasında yetersiz aderanstan kaynaklı sıyrılma problemleri yaşanabilmektedir. Fiber malzemeler ile yapılan takviyelerde bu ara yüzeyleri oluşturan matris katmanının sergilediği performans uygulama kalitesi üzerinde etkindir. Bu bağlamda poliürenin matris malzemesi olarak kullanılmasıyla daha verimli sonuçlar elde edilebilmektedir. (Akın & ark., 2020: 28; Song & Eun, 2021: 7; Son & ark., 2021: 12) tarafından yapılan çalışmalar, poliürenin fiber takviyeli polimerlerle birlikte kullanılması durumunda sistemin mekanik performansında belirgin iyileşmeler sağlandığını ortaya koymuştur.

Normal bileşimi ile kullanılabilir olmasına rağmen, bazı çalışmalarda poliüre kaplamaların kimyasal bileşimi değiştirilerek performansları artırılmıştır. Özellikleri iyileştirilmiş bu modifiye

poliüre türlerinin, yapı elemanlarının mekanik dayanım özelliklerine önemli katkılar sunduğu görülmektedir. (Lee & Kim, 2024: 17) tarafından yapılan bir çalışmada, kimyasal olarak sertleştirilmiş poliüre kaplamasının yığma yapı elemanları üzerindeki etkileri incelenmiştir. Araştırma sonucunda, modifiye poliüre uygulamasının yük taşıma kapasitesini ve süneklik değerlerini iki katına kadar artırdığı; ayrıca çatlak yayılımını önemli ölçüde sınırladığı ortaya konmuştur.

Genel olarak, poliüre kaplamaların süneklik, enerji sönümleme, basınç, eğilme ve kayma gibi temel yapısal parametreler üzerinde olumlu etkiler sağladığı söylenebilir. Hızlı kürlenme, yüksek aderans, çatlak köprüleme kapasitesi, çevresel etkilere karşı dayanım ve spreyci yöntemiyle kolay uygulanabilirlik gibi avantajları, poliüreği güçlendirme amacıyla kullanılabilecek yenilikçi bir malzeme hâline getirmektedir. Özellikle yığma duvarlar gibi zayıf veya taşıyıcı olmayan yapı elemanlarında, yüzeyde sağladığı bütünlük, çatlak kontrolü ve kısmi dayanım artışı sayesinde, mevcut mimariye zarar vermeden müdahale imkânı sunan etkili bir çözüm olarak öne çıkmaktadır.

Bununla birlikte, poliürenin yapı güçlendirme uygulamalarındaki kullanımı henüz sınırlı kalmıştır ve taşıyıcı sistemler üzerindeki uzun dönemli etkileri yeterince araştırılmamıştır. Bu nedenle, poliürenin yapı mühendisliği bağlamında sistematik olarak incelenmesi, benzer malzemelerle karşılaştırmalı değerlendirmelerin yapılması ve uygulamaya dönük verilerin artırılması hem bilimsel hem de uygulamalı açıdan önem arz etmektedir. Bu kitap bölümünde de poliürenin yapı elemanlarında güçlendirme amacıyla kullanımına yönelik teknik, uygulamalı ve literatür temelli bir çerçeve sunularak, gelecekteki araştırmalar için yol gösterici önerilerde bulunulacaktır.

Poliüre, izosiyanat ve amin reçinelerinin yüksek basınç altında özel bir spreyci sistemle karıştırılmasıyla oluşan, iki bileşenli

bir reaktif polimer sistemidir. Bu bileşenler püskürtüldükten sonra birkaç saniye içinde kürlenerek elastik, dayanıklı ve sürekli bir yüzey kaplaması meydana getirir. Poliürenin en belirgin özelliklerinden biri hızlı kürlenme süresidir; çoğu poliüre sistemi ortam sıcaklığına bağlı olarak yaklaşık 5–10 saniyede jel hale gelir ve dakikalar içinde tam kürünü tamamlayarak servis koşullarına hazır hale gelir.

Poliürenin fiziksel ve mekanik özellikleri kullanılan bileşenlerin türüne, oranına ve uygulama koşullarına bağlı olarak değişmekle birlikte, genel olarak yüksek elastisiteye, iyi aderansa ve kimyasal dayanıklılığa sahiptir. Poliüre kaplamalar, kopma uzaması bakımından %200 ila %500 arasında değişen değerler sunabilir. Bu da malzemenin çatlak köprüleme ve dinamik yükler karşısında bütünlüğünü koruma kabiliyetini artırır. Çekme dayanımı ise genellikle 10–25 MPa arasında olup, bazı formülasyonlarda daha da yüksek değerlere ulaşılabilir.

Poliüre, kimyasal dayanımı sayesinde agresif çevre koşullarına karşı direnç gösterir. Asitler, bazlar, tuz çözeltileri ve yakıtlar gibi çeşitli kimyasallara karşı dayanıklılığı, özellikle endüstriyel yapılarda veya altyapı projelerinde tercih edilmesini sağlar. Su geçirimsizliği ise poliürenin en belirgin avantajlarından biridir; bu nedenle hem yapı güçlendirme hem de su yalıtımı amacıyla eş zamanlı kullanımı mümkündür. UV dayanımı açısından ise saf poliürelerin zayıf olduğu, bu nedenle UV stabilizatörlü sistemlerin veya hibrit formülasyonların tercih edilmesi gerektiği unutulmamalıdır.

Yapılarda güçlendirme açısından değerlendirildiğinde, poliürenin yük taşıma kapasitesini doğrudan artırmaktan ziyade yüzey bütünlüğünü sağlama, çatlak oluşumunu geciktirme, darbe ve sismik enerjiyi sönümleme gibi dolaylı mekanizmalarla katkı sağladığı görülür. Bu özellikler özellikle yığma duvarlar gibi rijit ve kırılğan yapı elemanlarında oldukça önemlidir. Uygulama sonrası

oluşan esnek zar, duvarın davranışını daha sünek hale getirerek ani kırılmaları önleyebilir.

Termal özellikler açısından poliüre, yaklaşık -40°C ile $+120^{\circ}\text{C}$ arasındaki sıcaklıklarda yapısal bütünlüğünü koruyabilir. Bu geniş çalışma aralığı, onu farklı iklim koşullarına sahip bölgelerde uygulanabilir kılar. Ayrıca ısı iletim katsayısının düşük olması, yapıya ek bir yalıtım katkısı sunabilir. Yangın dayanımı bakımından ise çoğu standart poliüre sistemi alev yayılımına karşı sınırlı direnç gösterir; bu nedenle güçlendirme amaçlı kullanılacak sistemlerin yangın geciktirici katkılarla formüle edilmesi önerilir. Tablo 1 de poliüreye ait bazı fiziksel ve kimyasal özellikler verilmiştir.

Tablo 1 Poliürenin fiziksel ve kimyasal özellikleri

Özellik	Değer
Uzama (%)	20-800
Kopma Mukavemeti (MPa)	21
Çekme Mukavemeti (MPa)	31
Sertlik (Shore A) 1	92-95
Katılma Sıcaklığı	$<0^{\circ}\text{C}$
Tutuşma Sıcaklığı	$<250^{\circ}\text{C}$
Yoğunluk	$1,02 \text{ g/cm}^3$ (20°C)

Kaynak: (Yıldırım, 2019:33)

Poliürenin Yapı Güçlendirme Malzemeleriyle Karşılaştırmalı Analizi

Yapıların onarım ve güçlendirilmesinde kullanılan malzeme seçiminde, mekanik dayanım, uygulama kolaylığı, maliyet, çevresel etki ve servis ömrü gibi birçok kriter göz önünde bulundurulmaktadır. Poliüre, geleneksel malzemelere kıyasla bazı yönlerden üstünlük sağlarken, bazı yönlerden sınırlı kalmaktadır. Aşağıda farklı güçlendirme sistemleri ile teknik ve uygulama bazlı karşılaştırmalar yer almaktadır.

- Mekanik Özellikler Açısından Karşılaştırma

Poliüre, özellikle esneklik (kopma uzaması) ve çatlak köprüleme kabiliyeti açısından oldukça avantajlıdır. Ancak çekme dayanımı ve elastisite modülü bakımından karbon fiber takviyeli polimer (CFRP), cam fiber takviyeli polimer (GFRP) ve çelik sistemlere göre daha düşüktür. Bu nedenle poliüre, taşıyıcı sistemlerde yapısal dayanım artırımı amacıyla tek başına kullanımı sınırlıdır; ancak rijitliği düşük olan yığma duvar gibi elemanlarda davranış iyileştirmesi sağlar.

Tablo 2 Yaygın güçlendirme malzemelerinin ve poliürenin mekanik özellikleri

Malzeme	Çekme Dayanımı (MPa)	Kopma Uzaması (%)	Elastisite Modülü (GPa)	Yorum
Poliüre	10-25	200-500	0,01-0,2	Yüksek esneklik, düşük taşıma kapasitesi
CFRP	800-3000	1,0-2,0	100-600	Yüksek dayanım, kırılğan davranış
GFRP	400-1200	2,5-3,5	40-80	Orta düzey dayanım
Çelik Plaka	250-600	20-30	200	Sünek, ağır ve işçilik
Epoksi	20-70	1-10	1-4	Sert, kırılğan, aderansı yüksek

Kaynak: (Hammad & ark., 2024: 17)

Poliüre malzemeler, karbon fiber takviyeli polimer (CFRP), cam fiber takviyeli polimer (GFRP) ve çelik gibi yüksek mukavemetli malzemelerle kıyaslandığında daha düşük mekanik dayanım özelliklerine sahiptir. Bununla birlikte, maliyet etkinliği, uygulanabilirliği ve yapı elemanlarına getirdiği dayanım artışının sınırlı kalması nedeniyle yapısal güçlendirme uygulamalarında rasyonel bir tercih olarak değerlendirilebilir. Özellikle, mevcut yapı veya yapı elemanına sınırlı düzeyde iyileştirme gerektiren durumlarda avantaj sağlayabilmektedir.

- Uygulama Kolaylığı ve Hızı

Poliüre uygulamaları sprey yöntemiyle, kalıpsız ve hızlı bir biçimde gerçekleştirilebilir. Kurlenme süresinin çok kısa olması (saniyeler içinde jelleşme) özellikle büyük yüzeylerin kaplanmasında büyük zaman avantajı sağlar. Bu yönüyle CFRP veya çelik plaka uygulamalarına kıyasla daha az işçilik ve duraksama gerektirir.

Tablo 3 Yaygın güçlendirme malzemelerinin ve poliürenin uygulama kolaylıkları bakımından karşılaştırması

Malzeme	Uygulama Süresi	Ekipman Gereksinimi	Yüzey Hazırlığı	Yorum
Poliüre	Dakikalar	Sprey Cihazı	Yüksek	Hızlı
CFRP	Saatler	Manuel uygulama	Orta-Yüksek	Dikkat gerekir
Çelik Plaka	Günler	Montaj araçları	Yüksek	Ağır işçilik
Epoksi	Saatler	Rulo	Orta	

Kaynak: (Hammad & ark., 2024: 17)

- Maliyet ve Ekonomiklik

Maliyet analizi yalnızca malzeme bedelini değil, aynı zamanda işçilik, uygulama süresi, ekipman maliyeti ve bakım gereksinimlerini de kapsamalıdır. Poliüre, ilk yatırım maliyeti açısından orta seviyede yer alır; fakat hızlı uygulama ve bakım ihtiyacının düşüklüğü onu uzun vadede ekonomik kılabilir.

Tablo 4 Yaygın güçlendirme malzemelerinin ve poliürenin ekonomiklik bakımından karşılaştırması

Malzeme	Malzeme Maliyeti	İşçilik Maliyeti	Toplam Ekonomiklik
Poliüre	Orta	Düşük	Yüksek
CFRP	Yüksek	Orta	Orta-Yüksek
Çelik Plaka	Düşük	Yüksek	Düşük (yoğun işçilik)
Epoksi	Düşük	Düşük	Orta

Kaynak: (Raza & ark., 2019: 11)

- Dayanıklılık ve Servis Ömrü

Poliüre, kimyasal ve suya karşı oldukça dayanıklıdır. Ancak UV ışınlarına maruz kalan uygulamalarda yüzeyde renk solması veya tabaka bütünlüğü kayıpları görülebilir. Bu durum uygun üst kaplamalarla giderilebilir. CFRP ve çelik sistemler ise uygun kaplamalarla korunduğunda çok uzun ömürlüdür.

Poliüre Uygulamasının Avantajları ve Sınırlılıkları

Poliüre esaslı kaplamalar, özellikle son yıllarda yapı sektöründe hem koruma hem de dayanım artırıcı uygulamalar açısından dikkat çekici bir malzeme haline gelmiştir. Yapılarda güçlendirme amacıyla kullanıldığında bazı önemli avantajlar sunarken, bazı sınırlayıcı yönleri de dikkate alınmalıdır. Aşağıda poliürenin yapı uygulamalarındaki avantajlı yönleri ile sınırlılıkları karşılaştırmalı analizler de dikkate alınarak çok yönlü bir bakış açısıyla sıralanmıştır:

- Avantajları

1. Hızlı Kırılma Süresi: Poliüre, uygulama sonrası saniyeler içinde jelleşip dakikalar içinde mekanik mukavemet kazanır. Bu özellik, uygulama süresini ciddi şekilde kısaltır.

2. Yüksek Elastikiyet ve Çatlak Köprüleme Yeteneği: Kopma uzamasının %500'e kadar çıkabilmesi, çatlak oluşumunu engelleme ve enerji sönümleme açısından büyük avantaj sağlar.
3. Mükemmel Yüzeye Yapışma: Uygun yüzey hazırlığı ile beton, tuğla, taş ve metal gibi farklı yüzeylere yüksek aderans sağlar.
4. Su Yalıtımı Özelliği: Tamamen geçirimsiz yapısı sayesinde güçlendirme ile birlikte su yalıtımı işlevi de sağlar. Bu özellik özellikle temeller, bodrum katlar ve dış cephelerde önemlidir.
5. Kimyasal Direnç: Asit, baz, tuz ve birçok çözücüye karşı yüksek dayanım gösterdiğinden endüstriyel yapılarda da rahatlıkla kullanılabilir.
6. Kalınlık Kontrolü ve Derzsiz Uygulama: Sprey formda uygulanması sayesinde homojen ve ek yersiz yüzeyler elde edilir. Bu hem görsel hem de performans açısından önemli bir avantajdır.
7. Düşük Ağırlık: Poliüre kaplamalar çok hafif olup, uygulandığı yapı elemanına ek statik yük getirmez.
8. Uyarlanabilirlik: Farklı formülasyonlar ile yangın geciktirici, antibakteriyel, UV dayanımlı versiyonları üretilebilmektedir.
9. Karmaşık Geometrilere Etkinlik: Sprey yöntemiyle karmaşık şekillere sahip yapı elemanları (kavisli yüzeyler, bağlantı noktaları) kolayca kaplanabilir.

- Sınırlılıkları

1. Mekanik Dayanımın Sınırlılığı: Poliürenin çekme ve basınç dayanımları CFRP veya çelik gibi klasik güçlendirme elemanlarına kıyasla düşüktür.

2. Dayanımının Zayıflığı: UV ışınlarına maruz kalan alanlarda zamanla renk solması, tebeşirlenme ve yüzey bozulmaları görülebilir. Bu nedenle dış mekân uygulamalarında üst koruyucu katman gerekebilir.

3. Uygulama Ekipmanı Gereksinimi: Poliüre uygulamaları yüksek basınç ve sıcaklıkla çalışan özel spreyci cihazları gerektirir. Bu sistemler pahalı ve uzmanlık gerektiricidir.

4. Yüzey Hazırlığına Hassasiyet: Yüzey hazırlığı yetersiz yapılırsa aderans problemleri görülebilir. Nemli ya da kirli yüzeyler uygulama kalitesini ciddi şekilde düşürür.

5. Maliyet: Poliüre malzemeleri ve uygulama ekipmanları, geleneksel kaplamalara göre daha maliyetlidir. Ancak hızlı uygulama ve düşük işçilik ihtiyacı bu maliyeti dengeleyebilir.

6. Yangın Dayanımı: Standart poliüre sistemleri yanıcı olabilir. Yangın dayanımı istenen uygulamalarda özel katkılarla formülasyonu geliştirilmelidir.

7. Kalınlık Kontrolü Kullanıcıya Bağılıdır: Sprey uygulamalarda uygulayıcı operatörün deneyimi sonucu etkiler. Yetersiz kalınlık veya homojenlik bazı bölgelerde performans kaybına neden olabilir.

Sonuç

Bu çalışmada, poliüre esaslı kaplamaların yapı elemanlarının güçlendirilmesindeki potansiyeli çok yönlü olarak ele alınmıştır. Elde edilen bulgular ve karşılaştırmalı analizler doğrultusunda aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

Poliüre, yüksek elastikiyet, çatlak köprüleme ve su yalıtımı gibi özel fiziksel ve kimyasal özellikleri sayesinde, taşıyıcı olmayan yapı elemanlarının dayanımını artırmak ve servis ömrünü uzatmak amacıyla etkili bir kaplama malzemesi olarak kullanılabilir.

Uygulama sürecinin hızlı, derzsiz ve yüzey şekline uyarlanabilir olması; özellikle acil müdahale gerektiren güçlendirme projelerinde ve geniş yüzeyli uygulamalarda poliüreyi avantajlı kılmaktadır.

Mekanik dayanım açısından CFRP, GFRP veya çelik gibi klasik güçlendirme sistemlerine göre daha düşük değerlere sahip olması, poliürenin taşıyıcı sistem elemanlarında tek başına kullanılmasını sınırlandırmaktadır.

Poliüre kaplamaların yüzey aderansının yüksek olması, yığma duvarlar gibi yüzey kontrollü güçlendirme yapılacak sistemlerde başarılı sonuçlar elde edilmesini mümkün kılmaktadır.

Dış ortam koşullarına maruz kalan uygulamalarda UV ışınlarına karşı hassasiyet, poliüre sistemlerinin uzun süreli performansını etkileyebilmektedir. Bu nedenle UV dayanımı artırılmış versiyonların kullanılması ya da koruyucu üst kaplamalarla desteklenmesi gerekmektedir.

Poliürenin tüm mekanik özellikleri diğer geleneksel güçlendirme malzemelerine kıyasla üstün değildir. Ancak belirli uygulama alanlarında, özellikle ani yüklemeler veya çatlak kontrolü gibi kritik durumlarda, önemli dayanım artışları sağlayabildiği görülmektedir. Poliürenin hızlı uygulanabilmesi ve kısa sürede priz

alması, onu işçiliği uzun süren geleneksel güçlendirme yöntemlerine karşı güçlü bir alternatif hâline getirmektedir. Bu özellikleri sayesinde poliüre, hem yapısal performansı artırma hem de uygulama süresini kısaltma açısından avantaj sağlamaktadır. Aşırı dayanım artışının gerekmeyeceği, ancak belirli düzeyde iyileştirmenin yeterli olacağı uygulamalarda, poliürenin sunduğu dayanım düzeyi çoğu zaman yeterli olabilir. Bu tür bölgelerin doğru şekilde tespit edilmesi durumunda, poliüre ile hem yapısal yeterlilik sağlanacak hem de ekonomik bir çözüm elde edilecektir.

Poliüre, klasik güçlendirme sistemlerine göre mekanik açıdan zayıf olsa da uygulama hızı, yüzey uyumluluğu, su yalıtımı, çatlak köprüleme ve düşük işçilik maliyeti gibi özellikleriyle özgün bir çözüm sunar. Yüksek dayanım gerektiren taşıyıcı sistemlerde tek başına yeterli olmamakla birlikte, özellikle yığma duvarlar gibi düşük dayanımlı ve rijit elemanlarda davranış modifikasyonu sağlayabilir. Ayrıca mevcut güçlendirme sistemleriyle hibrit şekilde kullanılarak kompozit çözümler üretilebilir.

Öneriler

Poliüre sistemlerinin, özellikle yığma duvarlar, kagir yapılar ve tarihi yapıların restorasyon projelerinde, yapısal davranışa zarar vermeyecek esnek bir çözüm olarak değerlendirilmesi önerilmektedir.

Geleneksel güçlendirme sistemleriyle hibrit kullanımlar (örneğin: CFRP + poliüre) geliştirilerek hem dayanım artırımı hem de koruyucu kaplama işlevi bir arada sağlanabilir.

Poliüre kaplamaların kesme dayanımı ve aderans özellikleri ile ilgili deneysel çalışmaların artırılması, bu malzemenin daha geniş bir kullanım aralığına ulaşmasını sağlayacaktır.

Uygulama kalitesinin artırılması için eğitimli personel kullanımı ve doğru ekipman seçimi şarttır. Bu bağlamda yerel

yönetmeliklerde poliüre uygulamalarıyla ilgili teknik şartnamelerin oluşturulması faydalı olacaktır.

Poliüre kaplamaların yangın, çevresel etki, yaşlanma ve uzun süreli yükleme altındaki davranışları üzerine yapılacak uzun vadeli saha gözlemleri ve araştırmalar, bu malzemenin standartlara girmesine katkı sağlayacaktır.

Türkiye gibi deprem riski yüksek ülkelerde, poliüre ile yapılacak hafif ve hızlı güçlendirme uygulamaları, yapı stokunun iyileştirilmesine katkı sunabilir. Ancak bu uygulamalar bilimsel temele dayanmalı ve yerel deprem yönetmeliklerine uygun olarak yürütülmelidir.

Kaynakça

- Akın, E., tunaboyu, o., & avşar, Ö. (2020). Axial behavior of FRP confined low-strength concrete with polyurea. *Structures*(28), s. 1774-1784.
- Courtney E. Greene and John J. Myers, F. (2013). Flexural and Shear Behavior of Reinforced Concrete Members Strengthened with a Discrete Fiber-Reinforced Polyurea System. *Journal Of Composites For construction*(17), s. 108-116.
- Kim, T.-H. L.-H. (2024). Strengthening Effect Evaluation of Developed Stiff-Type Polyurea Sprayed on Masonry Beam Surface Under Static Loading in Experimental and Numerical Tests. *Materials*(17), s. 5243.
- Lim, K.-M., Kyung, K.-S., Park, J.-E., & Choi, C.-H. (2025). Effect of Reinforcement on RC Column Using Polyurea and Honeycomb. *International Journal of Steel Structures*(25), s. 571-580.
- Mistry1, M., Prajapati, V., & Dholakiya, B. Z. (2023). Redefining Construction: An In-Depth Review of Sustainable. *Journal of Polymers and the Environment*(32), s. 3448-3489.
- MuhammadHammad, AlirezaBahrami, Khokhar, S. A., & RaoArsalanKhushnood. (2024). AState-of-the-Art Review on Structural Strengthening Techniques with FRPs: Effectiveness, Shortcomings, and Future Research Directions. *Materials*(17), s. 1408.
- Nguyen Huu Cuonga, J. S.-V. (2022). Compressive and shear behavior of brick masonry assemblages strengthened with polyurea coating. *Construction and Building Materials*(348), s. 128534.

- Nguyen Huu Cuonga, N.-V. L. (2023). Experimental and DEM numerical analyses of the flexural and diagonal. *Structures*(54), s. 1578-1592.
- Öztürk, Ş., Aydın, F., & Arslan, . (2025). Investigation of the effects of polyurea application on shear behavior in. *Construction and Building Materials*(469), s. 140467.
- Parniania, S., & Toutanji, H. (2015). Monotonic and fatigue performance of RC beams strengthened with a polyurea coating system. *Construction and Building Materials*(101), s. 22-29.
- Raza, S., Khan, M. K., Menegon, S. J., Tsang, H.-H., & Wilson, a. J. (2019). Strengthening and Repair of Reinforced Concrete Columns by Jacketing: State-of-the-Art Review. *Sustainability*(11), s. 3208.
- Shojaei, B., Najafi, M., Yazdanbakhsh, A., Abtahi, M., & Zhang, C. (2021). A review on the applications of polyurea in the construction. *Polymers for Advanced Technologies*, s. 2797-2812.
- Son, S.-H., An, J.-H., Song, J.-H., & Hong, Y.-S. (2021). In-Plane Strengthening of Unreinforced Masonry Walls by. *Civil Engineering Journal*(7), s. 12.
- Song, J.-H., & Eun, H.-C. (2021). Improvement of Flexural and Shear Strength of RC Beam Reinforced by Glass Fiber-Reinforced Polyurea (GFRPU). *Civil Engineering Journal*(7), s. 3.
- Szafran, J., & Matusiak, A. (2020). Crushing strength of concrete rings with a polyurea reinforce system. *Tunnelling and Underground Space Technology*(101), s. 103407.

- wu, j., liu, Z., yu, j., & xu, s. (2022). Experimental and numerical investigation of normal reinforced concrete panel strengthened with polyurea under near-field explosion. *Journal of Building Engineering*(46), s. 103763.
- Yıldırım, M. (2019). Poliüre Kaplı Metal Levhaların Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi Ve Zırh Malzemesi Olarak Kullanımının Değerlendirilmesi. İstanbul: Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Yu, P., Silva, P., & Nanni, A. (2023). Flexural strengthening of RC beams using GFRP grid bonded with sprayed polyurea. *Engineering Structures*(292), s. 116516.
- Zhang, R., WeiboHuang, Lyu, P., Yan, S., & Ju, X. W. (2022). Polyurea for Blast and Impact Protection: A Review. *Polymers*(14), s. 2670.
- Zhengyuan Yue, Y. C. (2025). Dynamic Response and Bearing Capacity of Polyurea-Strengthened Concrete Arches Under Blast Load. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*.

İNŞAAT MALZEMELERİ VE SÜRDÜRÜLEBİLİR YAPILAR

