

T.C.
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

LİF KATKILI ÇİMENTOSUZ YENİ NESİL GERİ DÖNÜŞÜM ESASLI YÜKSEK
PERFORMANSLI ALTYAPI BORU ÇALIŞMASININ MEKANİK
ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Baraa RIHAVI

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Müslüm Murat MARAŞ

TEMMUZ 2024

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

**LİF KATKILI ÇİMENTOSUZ YENİ NESİL GERİ DÖNÜŞÜM ESASLI
YÜKSEK PERFORMANSLI ALTYAPI BORU ÇALIŞMASININ MEKANİK
ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Baraa RIHAVI
(36213621001)**

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

**Tez Danışmanı: Doç. Dr. Müslüm Murat MARAŞ
Eş Danışman: Dr. Enes EKİNCİ**

TEMMUZ 2024

İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜ

**Lif katkılı Çimentosuz Yeni Nesil Geri Dönüşüm Esaslı Yüksek Performanslı Altyapı
Boru Çalışmasının Mekanik Özelliklerinin Araştırılması**

Tezi Hazırlayan: Baraa RIHAVI
Yüksek Lisans Tezi

TEŞEKKÜR VE ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasının her aşamasında yardım, öneri, bilgi, tecrübe ve desteklerini esirgemedi beni her konuda yönlendiren danışman hocam Sayın Doç. Dr. Müslüm Murat MARAŞ ve Sayın Dr. Öğr. Üyesi Enes EKİNCİ'ye,

Tez çalışması sürecinin deneysel aşamasında yanımda olan, etkili bir çalışma ortamı elde ettiğim İnş. Müh. Erkay KUTLUSOY'a,

Tezin uygulama aşamasında vermiş oldukları destekten dolayı, Malatya Büyükşehir Belediyesi ve MESTON fabrikasının müdür ve çalışanlarına,

Çalışmalarım ve tüm hayatım boyunca olduğu gibi bu çalışmalarım süresince benden her türlü desteklerini esirgemeyen aileme,

teşekkür ederim.

ONUR SÖZÜ

Yüksek lisans tezi olarak sunduğum “Lif katkılı Çimentosuz Yeni Nesil Geri Dönüşüm Esaslı Yüksek Performanslı Altyapı Boru Çalışmasının Mekanik Özelliklerinin Araştırılması” başlıklı bu çalışmanın bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yardıma başvurmaksızın tarafımdan yazıldığına ve yararlandığım bütün kaynakların hem metin içinde hem de kaynakçada yöntemine uygun biçimde gösterilenlerden oluştuğunu belirtir, bunu onurumla doğrularım.

Baraa RIHAVI



İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR VE ÖNSÖZ	i
ONUR SÖZÜ	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vi
TABLolar DİZİNİ.....	viii
SEMBOLLER VE KISALTMALAR	ix
ÖZET.....	x
ABSTRACT	xi
1.GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMALARI.....	5
2.1. Geopolimer	5
2.2. Alkali Aktivatörler.....	11
2.3. Çelik Lifler.....	13
2.4. Beton Boru.....	17
3. MATERYAL VE METOD	20
3.1. Materyal	20
3.1.1. Yüksek fırın curufu (YFC)	20
3.1.2. Silis dumanı (SD)	20
3.1.3. Alkali aktivatör	21
3.1.3.1. Sodyum hidroksit (NaOH) (SH).....	21
3.1.3.2. Sodyum silikat (Na ₂ SiO ₃) (SS)	21
3.1.4. Alkali aktivörlerin hazırlanması ve kullanımı	22
3.1.5. Çelik lif	22
3.1.6. Agregat.....	24
3.1.7. Lifsiz geopolimer beton üretimi	25
3.1.7.1 Karışım hazırlığı ve döküm süreci.....	25
3.1.7.2 Kalıplara yerleştirme.....	26
3.1.7.3 Kırılma süreci.....	26
3.1.8. Lifli geopolimer beton üretimi.....	28
3.1.8.1. Karışım hazırlığı ve döküm süreci.....	28
3.1.8.2. Beton kır süreci.....	29

3.1.8.3. Mekanik testler ve mikroyapısal analiz	29
3.1.9. Beton boru üretimi	30
3.1.9.1. Malzeme hazırlığı ve döküm süreci.....	30
3.1.9.2. Mekanik testler ve enerji verimliliği.....	30
3.1.9.3. Çevresel etkiler ve sürdürülebilirlik	31
3.2. Metot.....	35
3.2.1. Lifsiz geopolimer beton hazırlanışı	35
3.2.1.1. Alkali aktivatör hazırlanması.....	35
3.2.1.2. Karışımın hazırlanması.....	35
3.2.1.3. Kütleme işlemi.....	36
3.2.2. Lifsiz geopolimer beton numunelerinin basınç dayanım testi	36
3.2.2.1 Test cihazı ve yükleme sistemi	36
3.2.2. Lifli geopolimer beton hazırlanışı	38
3.2.2.1. Alkali aktivator hazırlanması.....	39
3.2.2.2. Karışım ve döküm.....	39
3.2.2.3. Kütleme işlemi.....	39
3.2.3. Lifli geopolimer beton numunelerinin eğilme dayanım testi.....	39
3.2.4. Lifli geopolimer beton numunelerinin basınç dayanım testi	41
3.2.4.1. Test Süreci	41
3.2.5. Beton boru basınç dayanım testi.....	42
3.2.5.1. Test cihazı ve kurulumu.....	42
3.2.5.2. Cihaz ve deney düzeni	42
3.2.5.3. Test Prosedürü:	43
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	46
4.1. Geopolimer beton optimizasyonu	46
4.2. Lifli Geopolimer beton optimizasyonu.....	51
4.2.1. Basınç dayanımı.....	51
4.2.2. Eğilme Dayanımı	56
4.2.3 Mikroyapı analizi.....	63
4.2.3.1 SEM analizlerinin bulguları.....	63
4.3. Geopolimer Betonlarda Durabilite	64
4.3.1. Basınç dayanım değişimi	64
4.3.2. Ağırlık Değişimi	66

4.4. Beton Boru Testleri.....	68
4.4.1. Yük- Deplasman	68
4.4.2. Geopolimer beton borularda hasar biçimleri	71
5. SONUÇLAR.....	74
6. KAYNAKLAR.....	76
ÖZGEÇMİŞ.....	81



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1 : Global change institute binası (URL 1)	1
Şekil 1.2 : Brisbane west wellcamp havalimanı (URL 2)	2
Şekil 1.3 : Çimeto üretiminden kaynaklanan CO ₂ salınımı (URL 3)	3
Şekil 2.1 : Termik santrallerden elde edilen uçucu kül (URL 4)	6
Şekil 2.2 : Kaolinit (URL 5)	6
Şekil 2.3 : Albit (URL 6)	6
Şekil 2.4 : Çelik lif (URL 7)	13
Şekil 2.5 : Çelik lif takviyeli beton (URL 8)	14
Şekil 2.6 : UHPC teknolojisi kullanılarak Fransa’da inşa edilen Millau Viyadüğü (URL 9)	15
Şekil 2.7 : Çelik lifin türleri (TS 10513, 1992)	17
Şekil 2.8 : Beton boru (URL 10)	18
Şekil 3.1: Bakır kaplı çelik Lif	23
Şekil 3.2 : Çalışmada kullanılan agregalar	25
Şekil 3.3 : Beton borunun kesiti	32
Şekil 3.4 : YFC, agrega ve çelik lif malzemelerinin karıştırılması	33
Şekil 3.5 : Beton boru üretim makinası	34
Şekil 3.6 : Üretim sornası beton borular	34
Şekil 3.7 : Basınç dayanımı test cihazı	37
Şekil 3.8: Lifli geopolimer beton numunelerine uygulanan üç noktalı eğilme dayanımı testi	40
Şekil 3.9 : Beton boruların mekanik özelliklerini incelenmek için kullanılan test cihazı	43
Şekil 3.10 : Beton borunun dayanımını belirleyen test sistemi	45
Şekil 4.1 : Üretilen geopolimer beton numunelerinin 7, 28 ve 56 günlük basınç dayanımları	48
Şekil 4.2 : Farklı NaOH konsantrasyonlarda ve farklı silis dumanı oranlarına göre 7, 28 ve 56 günlük basınç dayanımları	50
Şekil 4.3 : Laboratuvar ve su ortamlarında bekletilen çelik lifli geopolimer beton karışımlarının bekleme süreleri	54
Şekil 4.4 : Geopolimer betonun su (W) ve laboratuvar ortamında (L) 7, 28 ve 56 günlük basınç dayanımları	55

Şekil 4.5 : Çelik lifli geopolimer beton numunelerinin farklı lif oranları ve kürleme ortamlarında 7, 28 ve 56 günlük eğilme dayanımları.....	58
Şekil 4.6 : K1FW56G geopolimer numunesinin üç nokta eğilme dayanım testi.....	60
Şekil 4.7 : K2FW56G geopolimer numunesinin üç nokta eğilme dayanım testi.....	61
Şekil 4.8 : K3FW56G geopolimer numunesinin üç nokta eğilme dayanım testi.....	62
Şekil 4.9 : Çelik lif takviyeli geopolimer betonun SEM görüntüleri	64
Şekil 4.10 : Sülfat etkisi ile çelik lifli geopolimer betonun basınç dayanımı değişimi.....	66
Şekil 4.11 : Sülfat etkisi ile çelik lifli geopolimer betonun ağırlık değişimi.....	67
Şekil 4.12 : Beton boruların yük-deplasman eğrileri	70
Şekil 4.13 : Beton boruların kırılma sonrası hasar biçimi ve çatlak görünümü	73



TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 3.1 : Bağlayıcı maddelerin kimyasal bileşimi	20
Tablo 3.2 : Alkali aktivatörlerin kimyasal özellikleri	21
Tablo 3.3 : Çelik liflerin mekanik ve fiziksel özellikleri	23
Tablo 3.4 : 9 molar NaOH ile üretilen geopolimer betonun karışım oranları.....	27
Tablo 3.5 : 12 molar NaOH ile üretilen geopolimer betonun karışım oranları.....	27
Tablo 3.6 : 15 molar NaOH ile üretilen geopolimer betonun karışım oranları.....	28
Tablo 3.7 : Çelik lifli geopolimer beton karışımları	29
Tablo 3.8 : Üretilen beton borularının kod açılımları	31
Tablo 4.1 : Farklı NaOH konsantrasyonlarına bağlı basınç dayanımları	46
Tablo 4.2 : Çelik lifli geopolimer beton karışım kodları	53
Tablo 4.3 : Çelik lifli geopolimer betonun basınç dayanımları	54
Tablo 4.4 : Çelik lifli geopolimer betonun eğilme dayanımları.....	57
Tablo 4.5 : Sülfat ortamında bekletilen çelik lifli geopolimer betonunun basınç dayanımı ve ağırlık değişimi	65

SEMBOLLER VE KISALTMALAR

g	: Gram
L	: Laboratuvar ortamı
M	: Molar
Mpa	: Mega Paskal
N	: Newton
SD	: Silis Dumanı
SEM	: Tarama Elektron Mikroskobu
SH	: Sodyum Hidroksit
SS	: Sodyum Silikat
W	: Su ortamı
YFC	: Yüksek Fırın cürufu
mm	: Millimetre
9M-S0	: 9 molar konsantrasyona ve %0 oranında silis dumanına sahip karışım
9M-S4	: 9 molar konsantrasyona ve %4 oranında silis dumanına sahip karışım
9M-S8	: 9 molar konsantrasyona ve %8 oranında silis dumanına sahip karışım
9M-S12	: 9 molar konsantrasyona ve %12 oranında silis dumanına sahip karışım
12M-S0	: 12 molar konsantrasyona ve %0 oranında silis dumanına sahip karışım
12M-S4	: 12 molar konsantrasyona ve %4 oranında silis dumanına sahip karışım
12M-S8	: 12 molar konsantrasyona ve %8 oranında silis dumanına sahip karışım
12M-S12	: 12 molar konsantrasyona ve %12 oranında silis dumanına sahip karışım
15M-S0	: 15 molar konsantrasyona ve %0 oranında silis dumanına sahip karışım
15M-S4	: 15 molar konsantrasyona ve %4 oranında silis dumanına sahip karışım
15M-S8	: 15 molar konsantrasyona ve %8 oranında silis dumanına sahip karışım
15M-S12	: 15 molar konsantrasyona ve %12 oranında silis dumanına sahip karışım

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

LİF KATKILI ÇİMENTOSUZ YENİ NESİL GERİ DÖNÜŞÜM ESASLI YÜKSEK PERFORMANSLI ALTYAPIBORU ÇALIŞMASININ MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Baraa RIHAVI

İnönü Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

81+XI sayfa

2024

Danışman: Doç. Dr. Müslüm Murat MARAŞ

Yapılan çalışmada yeraltı su ve kanalizasyon şebekelerinde yaygın olarak kullanılan çimento esaslı beton borulara alternatif olarak geri dönüşüm esaslı yeni nesil yüksek dayanımlı çimentosuz geopolimer beton borular üretimi hedeflenmiştir. Bu çalışmada, farklı miktarlarda yüksek fırın cürufu (YFC) ve silis dumanı (SD) kullanılarak bağlayıcı malzemelerin karışımları oluşturulmuştur. Bağlayıcı malzemeler tepkime girebilmesi için aktivatör olarak sodyum hidroksit (NaOH) ve sodyum silikat (Na_2SiO_3) kullanılmıştır. Lif içermeyen bu geopolimer beton karışımları farklı molaritelerde (9M, 12M, 15M) hazırlanmış ve mekanik özelliklerine bakılarak optimum karışım belirlenmiştir. Tüm numunelerde %65 iri (4-8 mm) ve %35 (0-4 mm) ince agrega kullanılmıştır. Aktivatör miktarı kıvam ölçütlerine göre ayarlanmıştır. Üretilen numuneler laboratuvar ortamında 7, 28 ve 56 gün bekletildikten sonra mekanik özellikleri incelenerek optimum karışım 9M-S0 olarak belirlenmiştir. Tüm karışımlarda aktivatör sodyum hidroksit/sodyum silikat oranı sabit tutulmuştur. Optimum 9 molarlık 9M-S0 karışımı belirlendikten sonra çelik lif içeren karışımların (%0,5, %1 ve %1,5 ağırlıkça) mekanik özellikleri laboratuvar ve su ortamında incelenmiştir. Üretilen numuneler eğilme ve basınç dayanımına bakılarak optimum karışım belirlenmiştir. Geopolimer beton boruların altyapı projelerinde kullanılacağı göz önünde bulundurularak sürekli kimyasal ortama maruz kalacağından hazırlanan karışım numuneleri 6 haftalık sülfat ortamında bekletilmiş olup basınç dayanımı ile ağırlık değişimleri de incelenmiştir. Hazırlanan geopolimer beton karışımları ile Altyapı projelerinde kullanılmak üzere lifli ve liffsiz borular üretilmiştir. Üretilen borular kür amaçlı su verildikten sonra basınç dayanımı testleri yapılarak geleneksel çimento esaslı beton borularla karşılaştırıldığında üretilen çelik lifli geopolimer beton boruların daha iyi bir performans sergilediği tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Geopolimer, Altyapı boru, Su şebekeleri, kanalizasyon, Yüksek Performans, Geri Dönüşüm.

ABSTRACT

Master Thesis

INVESTIGATION OF MECHANICAL PROPERTIES OF CEMENTLESS NEW GENERATION RECYCLING BASED HIGH PERFORMANCE INFRASTRUCTURE PIPES

BARAA RIHAVI

Inonu University

Graduate School of Nature and Applied Sciences

Department of Civil Engineering

81+XI sayfa

2024

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Müslüm Murat MARAŞ

This study aims to produce new-generation high-strength cementless geopolymer concrete pipes as an alternative to cement-based concrete pipes commonly used in groundwater and sewage networks. Mixtures of binder materials were formed using different amounts of ground granulated blast furnace slag (GGBFS) and silica fume (SF). Sodium hydroxide (NaOH) and sodium silicate (Na_2SiO_3) were used as activators. These fiber-free geopolymer concrete mixtures were prepared at different molarities (9M, 12M, 15M), and the optimal mixture was determined based on their mechanical properties. All samples used %65 coarse aggregate (4-8 mm) and %35 fine aggregate (0-4 mm). The activator amount was adjusted according to consistency criteria. After storing the samples for 7, 28, and 56 days, their mechanical properties were examined, identifying 9M-S0 as the optimal mixture. The sodium hydroxide/sodium silicate ratio was kept constant. After determining the optimal 9M-S0 mixture, the mechanical properties of steel fiber-reinforced mixtures (%0.5, %1, and %1.5 by weight) were examined in laboratory and water environments. The optimal mixture was determined based on flexural and compressive strengths. Considering the continuous exposure to chemical environments in infrastructure projects, the prepared mixture samples were kept in a sulfate environment for 6 weeks, and their compressive strength and weight changes were examined. Fiber-reinforced and non-fiber-reinforced pipes were produced for infrastructure projects. Compressive strength tests showed that steel fiber-reinforced geopolymer concrete pipes exhibited better performance compared to traditional cement-based concrete pipes.

Keywords: Geopolymer, Infrastructure pipe, Water networks, sewage, High Performance, Recycling

1.GİRİŞ

Toplumların yaşam standartlarını ve yaşam kalitesini artırmak amacıyla, bireyler ve kurumlar sürekli olarak yeni ürünlerin geliştirilmesine yönelik çalışmalar yürütmektedirler. Bu çabalar genellikle toplumun temel ihtiyaçlarını karşılamayı ve yaşam kalitesini yükseltmeyi hedeflemektedir. Aynı zamanda, mevcut ürün ve hizmetler üzerinde yapılan iyileştirmeler ve yenilikler, ekonomik etkinliklerin ve sürdürülebilirliğin sağlanmasına katkıda bulunmaktadır.

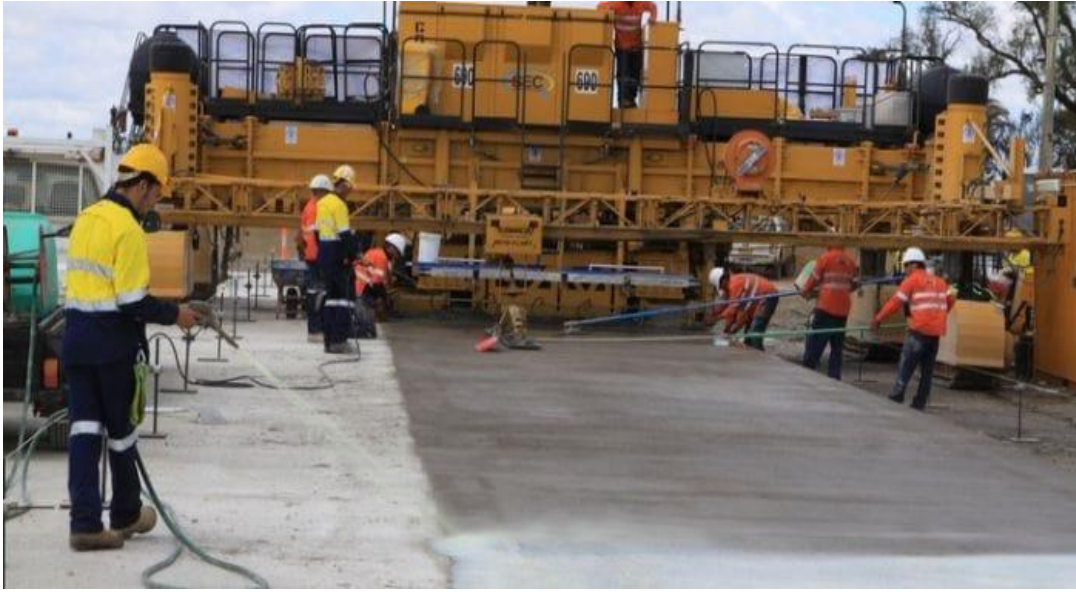
Bu bağlamda, içme suyu ve kanalizasyon şebekeleri, toplumun sağlık ve yaşam kalitesi için kritik öneme sahip temel altyapı unsurlarıdır. Bu şebekelerin etkin bir şekilde işletilmesi ve sürdürülmesi, su temini ve atık yönetimi gibi temel ihtiyaçların karşılanmasında hayati bir rol oynamaktadır. Dolayısıyla, bu altyapıların sürekli olarak geliştirilmesi ve modernize edilmesi, toplumun genel ihtiyaçlarına ve sürdürülebilir kalkınmasına önemli katkılar sağlamaktadır.

Geopolimer betonla yapılar inşa etme girişimlerinden biri olarak dünyanın ilk geopolimer betondan üretilmiş yapısı ise The University of Queensland's Global Change Institute (GCI) binasıdır. (Education Snapshots, 2024).



Şekil 1.1 : Global change institute binası (URL 1)

Son zamanlarda yapı sektöründe, geopolimer beton üzerinde yapılan araştırma ve uygulamalarda bir artış gözlemlenmektedir. Bu artışın, geopolimer betonun normal çimentolu betona kıyasla daha yüksek dayanım, dayanıklılık ve düşük maliyet gibi üstün özelliklerine dayandığı görülmektedir. Brisbane West Wellcamp Havalimanı, Avustralya'da gerçekleştirilen, dünyanın en geniş geopolimer beton projesidir. Toplamda 40.000 m³ geopolimer beton, uçak dönüş alanlarında, apronlarda ve taksi yollarında kullanılmıştır. (Geopolymer Institute, 2024).



Şekil 1.2 : Brisbane west wellcamp havalimanı (URL 2)

Günümüzde altyapı projelerinde kullanılan boru malzemelerinin üretiminde çevre dostu ve ekonomik açıdan sürdürülebilir alternatiflerin arayışı giderek artmaktadır. Bu bağlamda, çimento esaslı beton boruların yerini alabilecek çevre dostu ve maliyet etkin bir alternatif olarak geri dönüşüm esaslı yeni nesil yüksek dayanımlı çimentosuz geopolimer betonlar öne çıkacaktır. Bu tez çalışması, çimento esaslı betonların dezavantajlarını aşmak ve çevresel etkiyi azaltmak amacıyla geopolimer betonların potansiyelini ve boru üzerinde mekanik özelliklerini incelemektedir.

Geopolimer betonların çimento esaslı betonlara göre çevre dostu olmalarının en önemli nedenlerinden biri, düşük karbondioksit salınımı sağlamalarıdır. Çimento üretimi, önemli

miktarda karbondioksit emisyonuna neden olurken, geopolimerlerin üretimi sırasında düşük miktarda karbondioksit salınımı gerçekleşmektedir. Bu durum, çevresel sürdürülebilirlik açısından geopolimer betonların avantajını ortaya koymaktadır. Yapılan çalışmanın bulgularına göre, betonarme elemanların imalatında geleneksel betona alternatif olarak geopolimer betonun tercih edilmesinin CO₂ emisyonunu %40 - %58 aralığında azalttığı ortaya konmuştur. (Çakmak ve Uysal, 2021).

Ayrıca, geopolimer betonların üretiminde kullanılan hammaddeler genellikle endüstriyel atıklardan elde edilmektedir. Örneğin, yüksek fırın cürufu ve silis dumanı gibi atık maddelerin kullanımı, hem çevresel açıdan atık yönetimini iyileştirirken hem de malzeme maliyetlerini azaltmaktadır. Bu durum, geopolimer betonların ekonomik açıdan da çekici bir seçenek haline gelmesini sağlamaktadır. Çimento üretimi esnasından ciddi anlamda çevreye CO₂ salınımları gerçekleşmektedir. Yapılan bir araştırmaya göre, sera gazı emisyonlarının sektörel dağılımı incelendiğinde, yapı sektörünün toplam sera gazı emisyonlarının %8'ini oluşturduğu belirlenmiştir (Çakmak ve Uysal, 2021).



Şekil 1.3 : Çimento üretiminden kaynaklanan CO₂ salınımı (URL 3)

Bu tez çalışması, geopolimer betonların çevre dostu ve ekonomik avantajlarını değerlendirerek altyapı projelerinde kullanımlarının potansiyelini araştırmaktadır. Bu araştırma, sadece inşaat sektöründe çevre dostu ve sürdürülebilir malzemelerin kullanımını teşvik etmekle kalmayıp aynı zamanda maliyet etkin çözümler sunarak sektöre katkı sağlayacaktır.

Yaptığımız araştırmada, çeşitli oranlarda kullanılan malzemelerle geopolimer beton türleri geliştirildi. Bu beton türlerinde yüksek fırın cürufu (YFC) ve silis dumanı (SD) bağlayıcı malzemeler olarak kullanılmıştır. Farklı oranlarda kullanılan YFC ve SD, agregalarla reaksiyona girebilmeleri için çeşitli molaritelerde alkali çözelti ile karıştırılmıştır. Alkali çözelti olarak sodyum hidroksit (NaOH) ve sodyum silikat (Na_2SiO_3) oranı 1/1 olarak kullanılmıştır. Optimum karışım belirlendikten sonra, beton karışımlarının sünekliği ve dayanımı artırılmak amacıyla (%0,5, %1 ve %1,5) farklı miktarlarda çelik lif eklenmiş ve yeniden optimum karışımlar belirlenmiştir. Elde edilen karışımlarla hem lifli hem de lifsiz beton borular üretilmiş ve mekanik özellikleri incelenmiştir.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMALARI

2.1. Geopolimer

Geopolimer son yıllarda yapı malzemeleri endüstrisinde artan ilgi gören çevre dostu ve sürdürülebilir bir malzeme olarak dikkat çekmektedir. Bu bölümde, çeşitli araştırmacılar tarafından yapılan çalışmalar incelenmiş ve geopolimerlerin üretimi, özellikleri ve uygulama alanları hakkında bilgiler sunulmuştur.

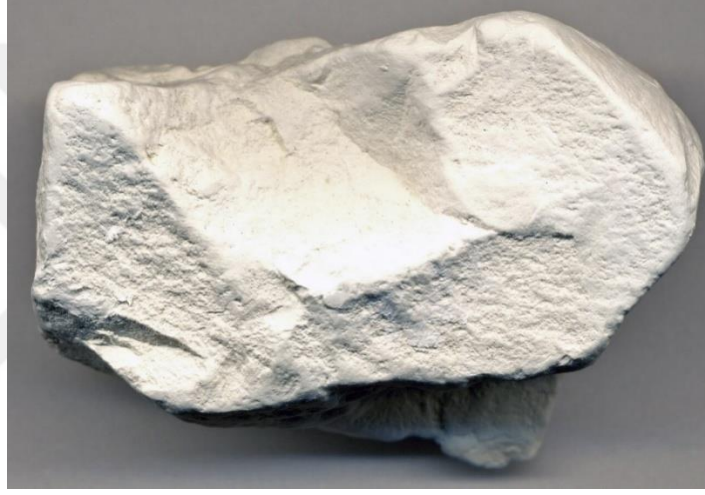
Xu ve Van Deventer (2002) yaptıkları araştırmada, uçucu kül, kaolinit ve albitin farklı kombinasyonlarını inceleyerek geopolimerizasyon potansiyelini değerlendirmişlerdir. Araştırma sonuçlarına göre, üç bileşenli sistem kullanıldığında geopolimerler en yüksek basınç dayanımına sahip olmuş ve hasar biçimleri en düşük seviyede gözlenmiştir. Bu başarılı mekanik davranışın temel sebepleri; uçucu kül ve albitin yüksek reaktivitesi, kaynak malzemeler ile jel fazı arasındaki etkileşim ve büyük reaksiyona girmemiş albit parçacıklarının güçlendirici etkisi olarak belirlenmiştir.

Ayrıca, kalsine edilmiş (ısıtılmış) malzemelerden (örneğin uçucu kül, cüruf ve metakaolinit) elde edilen geopolimerlerin basınç dayanımının daha yüksek olduğu ve erken zamanda daha dayanımlı oldukları gözlenmiştir. Kaolinit ve albitin başarılı bir şekilde geopolimerleştiği ve bu kombinasyonun iyi bir basınç dayanımı sağladığı da tespit edilmiştir. KOH çözeltisinin, uçucu kül, kaolinit ve albitin kombinasyonu ile yapılan geopolimerlerde basınç dayanımını artırdığı ve çatlama olasılığını azalttığı belirlenmiştir. Uçucu kül ve kaolinitten oluşan geopolimerlerin 40°C’de 7 gün boyunca, kaolinit ve albitten oluşan geopolimerlerin ise 45°C’de 28 gün boyunca sertleştiği tespit edilmiştir.

Sonuç olarak, uçucu kül, kaolinit ve albitin birlikte geopolimerleşmesi, bu minerallerin tek başlarına veya ikili kombinasyonlarına göre daha yüksek basınç dayanımı ve daha kısa reaksiyon süresi sağlamaktadır.



Şekil 2.1 : Termik santrallerden elde edilen uçucu kül (URL 4)



Şekil 2.2 : Kaolinit (URL 5)



Şekil 2.3 : Albit (URL 6)

Provis ve Van Deventer (2009) tarafından yapılan çalışmaya göre geopolimerler, alkali hidroksit veya alkali silikat aktivasyonu ile oluşturulan katı alüminosilikat malzemelerdir. Geopolimer, geleneksel Portland çimentosuna alternatif olarak, CO₂ emisyonlarını azaltma potansiyeline sahiptirler. Bu malzeme, mühendislik özellikleri olarak, kimyasal etkilere, yangına ve ısıya dayanıklı yapı malzemeleri üretildiği ve endüstriyel sektörde atıklarının kullanımı ve termal özellikler iyileştirilmesi amaçlandı. Gerçekleştirilen çalışmanın sonucunda geopolimerlerin çevre dostu ve sürdürülebilir yapı malzemeleri olarak potansiyel kullanımı vurgulamakta ve endüstriyel atıkların değerlendirilmesi açısından önemli bir adım oluşturduğu belirtilmiştir. Ayrıca, geopolimerlerin yangına dayanıklı özelliklere sahip olduğu ve bu özelliğin yapıların daha kararlı yapı hale getirilmesine katkı sağladığı da belirtilmektedir.

Temuujin ve diğ., (2009) tarafından çelik yüzeylere uygulanan metakaolin bazlı geopolimer kaplamaların yapışma özelliklerini araştıran bir çalışma gerçekleştirildi. Yapılan deneyler, bu kaplamaların yapışma yeteneğinin bileşime bağlı olduğunu gösterdi. Farklı Si:Al oranlarına sahip bileşimlerin priz sürecinden sonra farklı kristalleşme davranışları gözlemlendi. Si:Al oranı 2.5 olan bileşimlerin metal alt katmanlara yapışma kuvveti >3.5 MPa olarak belirlendi. Ancak, Si:Al oranı 1 ve 2 olan bileşimlerde, yapışma özelliği zayıf olarak tespit edildi. Ayrıca, Si:Al oranı 2.5 olan bileşimin termal genleşme ölçümlerinde beklenmedik genişleme gözlemlendi. Sonuç olarak metakaolin bazlı geopolimer kaplamaların çelik yüzeylere yapışma özelliklerinin bileşime bağlı olduğunu ve Si:Al oranının bu yapışma özelliklerini etkilediğini gösterdiği belirtilmiştir.

Van Chanh ve diğ., (2008) çalışması, geopolimer betonunun, geleneksel çimentolu betona kıyasla üstün özelliklere sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Araştırma sonuçlarına göre, geopolimer betonun basınç dayanımı, kürlenme sıcaklığının yükselmesiyle artış göstermektedir. Uzun süreli kürlenme sürelerinde (24 ila 72 saat), uçucu kül bazlı geopolimer betonunun basınç dayanımında artış olduğu görülmüş olup ancak 48 saat sonrasında bu artış miktarı sınırlıdır. Taze geopolimer betonun çökme değeri, karışıma eklenen fazla su miktarıyla artış göstermektedir. Isı işlemine maruz kalmış geopolimer betonun basınç dayanımı yaşa bağlı olarak değişmemektedir. Geopolimer beton, asit ve tuzlu

ortamlarda yüksek performans sergilediği görülmüştür. Bu bulgular geopolimer betonunun geleneksel portland çimentosuna göre önemli avantajlar sunduğunu göstermektedir.

Geopolimer uygulama potansiyelini ve özelliklerini araştıran diğer bir çalışmaya göre, geopolimerler, sentezlenme sürecinde üç aşamadan geçer: i) öncül maddenin çözünmesi, ii) başlangıç jelinin oluşumu ve iii) son olarak silikat ağ yapısının gelişimi. Bu malzemelerin farklı bileşimleri ve hazırlanma yöntemleri, geopolimerlerin mekanik özellikleri ve dayanıklılığı üzerinde belirleyici etkilere sahiptir. Geopolimerlerin hammaddeleri genellikle çeşitli kaynaklardan elde edilir ve bu süreçte sodyum hidroksit, sodyum silikat, sodyum karbonat gibi aktivatörler kullanılır. Geopolimerlerin hazırlanmasında çeşitli teknikler uygulanabilir ancak, en yaygın olanı katı malzemelerin sıvı içerisinde homojen bir şekilde karıştırılması gerektiği belirtilmiştir.

Gerçekleştirilen çalışmanın sonucunda, geopolimer bağlayıcılar, geleneksel çimento esaslı malzemelere kıyasla daha yüksek mukavemet ve daha iyi asit ve tuz direnci sunduğu, ancak farklı geopolimer türlerinin özelliklerinin kapsamlı bir şekilde karşılaştırılması zor olduğu için, geopolimerlerin çeşitli alanlarda geniş bir uygulama potansiyeline sahip olup gelecekte daha yaygın bir şekilde kullanılması için hammaddelerin dikkatlice kontrol edilmesi, aktivatörlerin etkin bir şekilde kullanılması ve standart test yöntemlerinin geliştirilmesi gerektiği ve bu gelişmeler küresel çevre ve ekonomiye önemli katkılar sağlayabildiği görülmüştür (Cong ve Cheng, 2021).

Yapılan başka bir çalışmada, ısıyla sertleşen uçucu kül bazlı geopolimer betonla ilgili bilgiler sunulurken, beton üretiminde geleneksel Portland çimentosu yerine ASTM Sınıfı F olarak bilinen düşük kalsiyumlu uçucu kül kullanıldığı belirtilmiştir. Mükemmel bir basınç dayanımına sahip olan bu geopolimer betonun yapısal uygulamalarda kullanılması ideal olduğu görülmüş olup, taze ve sertleşmiş betonun özelliklerini etkileyen ana faktörler tanımlandığı ve karışım oranlarının tasarımı için veriler sunulduğu açıklanmıştır. Sertleşmiş geopolimer betonun elastik özellikleri ve güçlendirilmiş geopolimer beton yapısal elemanlarının davranışı ve dayanıklılığı, geleneksel Portland çimentosu betonu ile benzer olduğu görülürken bu nedenle, mevcut standartlarda ve kodlarda bulunan tasarım koşulları, güçlendirilmiş düşük kalsiyumlu uçucu kül bazlı geopolimer betonların yapısal elemanlarını tasarlamak için kullanılabileceği vurgulanmıştır. Isı ile sertleştirilen bu geopolimer beton,

sülfat saldırısına karşı mükemmel dayanıklılık gösterdiği, asitlere karşı dirençli olduğu, sünek kırılmaya sahip olduğu ve sertleşme esnasında minimum büzülme gerçekleştiği görülmüştür (Rangan, 2008).

Geopolimer betonunu sülfürik asit etkisini inceleyen başka bir çalışmada, %100 uçucu küllü, %100 yüksek fırın cürufu, %50 uçucu kül ve %50 yüksek fırın cürufu betonların %5 sülfürik asit etkisi altındaki performansı incelenerek, normal Portland çimentolu (OPC) betonlarla karşılaştırılmıştır. Sülfürik asit ortamında yapılan mekanik ve dayanıklılık değerlendirmeleri neticesinde şu bulgular elde edilmiştir:

- 1- Görsel incelemelere göre, sülfürik asidin etkisiyle en fazla bozulma %100 uçucu küllü geopolimer betonlarda, en az bozulma ise, %50 uçucu kül ve %50 cürufu geopolimer betonlarda gözlenmiştir.
- 2- Ağırlık değişimi sonuçlarına göre, normal koşullarda bekletilen numuneler arasında en büyük ağırlık kaybı %100 uçucu küllü geopolimer betonlarda elde edilmiştir. Diğer geopolimer betonlarda ise, ağırlık değişimi oldukça sınırlı olup, hidratasyon reaksiyonlarının genellikle 28 gün içinde tamamlandığı da belirtilmiştir.
- 3- Sülfürik asit etkisinden kaynaklanan ağırlık değişimleri incelendiğinde, beton aşınmasından dolayı, en fazla ağırlık kaybı uçucu kül tabanlı geopolimer numunelerde meydana gelmiştir.
- 4- Basınç dayanım sonuçlarına göre, 90. gün laboratuvar ortamında en yüksek basınç dayanımı %100 yüksek fırın cürufu numunelerden elde edilmiştir. Sülfürik asit etkisi altında ise, %50 cüruf ve %50 uçucu kül tabanlı geopolimer betonlardan en yüksek dayanım elde edilmiştir.
- 5- Yarmada çekme dayanımı sonuçlarına göre, 90 günlük %50 cürufu ve %50 uçucu küllü geopolimer betonların çekme dayanım sonuçları 28 güne göre artış gösterdiği belirtilmiştir.
- 6- Sonuçlar, %50 cürufu ve %50 uçucu kül içeren geopolimer betonun, yüksek kimyasal etkilere karşı yüksek durabilite özelliği göstermiştir.
- 7- Uçucu kül tabanlı betonlarda minimum kullanılması gerektiği ve cürufu betonların zararlı kimyasal ortamların dışında kullanılmasının faydalı olduğu vurgulanmıştır (Bilenler Altundal, 2019).

Mermerdaş ve Ekmen'in (2018) yaptıkları araştırmada, yapı malzemelerinin geniş kullanım alanına sahip olmasına rağmen, bazı olumsuz etkileri olması nedeni ile beton üretiminde alternatif olarak kullanılabilecek geopolimer bağlayıcılı malzemeler hakkında yapılan çalışmaların popülerliği arttığı vurgulanmıştır. Yapılan araştırmada, rötre değerlerini etkileyen faktörleri incelemişlerdir. Sıvı/bağlayıcı oranı, sodyum konsantrasyonu, silikat modülü (Ms) ve camsuyu yüzdesi artışının rötreyi artırdığı; ancak kum/bağlayıcı oranı, buharlı/otoklav kür, rötre azaltıcı katkı, bağıl nem ve sıcaklık gibi parametrelerin rötreyi azalttığı tespit edilmiştir. Ayrıca, su/çimento oranı ve ortam sıcaklığı, özellikle nemin artmasıyla birlikte sünme deformasyonunu artırdığını belirtmişlerdir.

Geopolimer/alkalilerle aktive edilmiş yapı malzemelerinin şekil değiştirme özellikleri üzerine yapılan araştırmalar, farklı bulgular sunmuştur. Geopolimer malzemelerin şekil değiştirme oranlarının kısıtlı olduğu, ancak alkalilerle aktive edilmiş malzemelerin şekil değiştirme sabitliğinin sağlanamadığı gözlemlenmiştir. Rötre ve sünme değerlerini azaltmak amacıyla gerçekleştirilen çalışmalarda, bazı başarılar elde edildiği açıklanmıştır. Gelecekteki araştırmalar, geopolimer/alkalilerle aktive edilmiş yapı malzemelerinin üretim sürecinde şekil değiştirme sabitliğini artırmayı hedeflendiği söylenmiştir (Mermerdaş ve Ekmen, 2018).

Eryılmaz ve diğ., (2023) gerçekleştirdikleri çalışmanın sonuçlarına göre, geri dönüştürülmüş geopolimer agregaların su emme oranı doğal agregalara göre daha yüksek olup, maksimum tane boyutu küçüldükçe su emme oranının arttığı vurgulanmıştır. Ayrıca, tane yoğunluğu açısından geri dönüştürülmüş geopolimer agregaların doğal agregalara göre daha düşük olduğu da tespit edilmiştir. Araştırma, geri dönüştürülmüş geopolimer agregaların Los Angeles aşınma direnci testi sonucunda düşük olduğunu ortaya koymuş ve yüksek aşınma koşullarında kullanımlarının sınırlı olduğunu belirtmiştir. Bununla birlikte, alkali silika reaktivitesi bakımından bu agregaların standartlara uygun olduğu ve beton üretiminde kullanılabileceği tespit edilmiştir. pH değerlerinin yüksek alkali içeriğinden dolayı doğal agregalara göre daha yüksek olduğu gözlenmiştir. Literatürdeki bulgulara göre, geri dönüştürülmüş geopolimer agregaların çevresel etkilere karşı dayanıklı olduğu ancak durabilite deneylerinde daha fazla çalışmaların gerektiği belirtilmiştir.

2.2. Alkali Aktivatörler

Alkali aktivatörler, geopolimer ve alkali aktivasyonlu malzemelerin üretiminde kritik bir rol oynarlar. Bu maddeler, malzemenin polimerizasyon sürecini hızlandırarak silikat ve alüminat bileşenlerinin reaksiyon hızını artırır. Genellikle, sodyum veya potasyum hidroksit gibi alkali hidroksitler ve sodyum veya potasyum silikatlar gibi alkali silikatlar kullanılarak hazırlanırlar. Alkali aktivatörler, geopolimerizasyon reaksiyonunu başlatma ve hızlandırma konusunda kritik bir rol oynarlar. Ayrıca, malzemenin mekanik özellikleri, kimyasal dayanıklılığı ve diğer performans özellikleri üzerinde etkilidirler.

Bakharev (2006), tarafından yapılan araştırmada, sodyum içeren aktivatörlerle hazırlanan geopolimer malzemelerin termal stabilitesinin zayıf olduğu belirtilmiştir. 800 °C'de hızlı bir dayanım kaybı meydana geldiği görülmüştür. Bununla birlikte, potasyum silikat kullanılan malzemelerin daha iyi bir termal stabiliteye sahip olduğu da gözlemlenmiştir. Malzemeler genellikle 1200 °C'ye kadar amorf yapılarını korurken, pişirme sonrası daha iyi mekanik özellikler geliştirdiği görülmüştür. Ancak, malzemelerin büzülme ve basınç dayanımındaki değişiklikler nedeniyle refrakter yalıtım uygulamaları için uygun olmadığı belirlenmiştir.

Sedira ve Castro-Gomes'in (2020) yaptıkları araştırmanın sonuçlarına göre, çeşitli alkali aktivatör çözeltilerinin basınç dayanımı ve mikro yapısı üzerinde belirgin etkileri bulunduğu ortaya konulmuştur. Sodyum hidroksit ve sodyum silikat içeren çözünmüş atık cam tozu kombinasyonunun en yüksek dayanımı sağladığı gözlemlenmiştir. Aktivatörün türü, konsantrasyonu ve katı/sıvı oranlarının basınç dayanımını önemli ölçüde etkilediğini belirlenmiştir. Farklı aktivatörlerin basınç dayanımı üzerindeki maliyet etkisi de analiz edilmiştir. Sonuç olarak, bu hibrit alkin bağlayıcının optimize edilmiş üretim koşullarında, endüstriyel uygulamalarda potansiyel olarak yararlı olabileceğini vurgulanmıştır.

Mermerdaş ve Ekmen (2018) tarafından yapılan araştırmada, alkali aktivatörü kullanarak hazırlanan geopolimer yapı malzemelerin zamana bağlı deformasyon davranışı incelenmiş olup araştırmacılar, geopolimerlerin büzülme ve sünme gibi deformasyon türlerini ve bu deformasyonları etkileyen parametreleri değerlendirmişlerdir. Geopolimerler, betonlara kıyasla daha düşük büzülme ve sünme gösterdiğinden, geopolimerlerin uzun vadeli dayanıklılık ve stabilite özelliğini artırdığı belirlenmiştir. Sıvı/bağlayıcı oranı, sodyum

konsantrasyonu, silikat modülü ve camsuyu yüzdesi arttıkça büzülme arttığı ve kum/bağlayıcı oranı, buhar kürlenme, rötre azaltıcı katkı, bağıl nem ve sıcaklık arttıkça büzülmenin azaldığı görülmüştür. Su/bağlayıcı oranı, ortam sıcaklığı ve nemi arttıkça sünme davranışının da arttığı belirtilmiştir. Beton basınç dayanımına oranının 0,4'ten az olması durumunda sünme gerilmeyle orantılı olduğu vurgulanmıştır.

Maslovara ve arkadaşları (2013) yılında gerçekleştirdikleri araştırmada alkali su elektrolizinde yeni bir Ni-Co-Mo bazlı iyonik aktivatörün kullanımının, standart 6 M KOH ile karşılaştırıldığında enerji tüketiminde %17'lik bir azalmaya yol açtığı belirlenmiştir. Ayrıca aktivatörün, SEM morfolojisi ile ispatlandığı şekilde katot üzerindeki aktif yüzey alanını artırdığı açıklanmıştır. UV/VIS spektroskopisi ise işlem sırasında elektrolit bileşimindeki değişiklikleri gösterdiği vurgulanmıştır. Bu bulgular, yeni iyonik aktivatörün alkali su elektroliz süreçlerinde enerji tüketimini azaltma ve elektrokimyasal performansı iyileştirme potansiyeline sahip olduğu görülmüştür.

Ye ve Radlińska'nın (2016) yaptıkları araştırmada farklı aktivatörlerin, alkalik aktivasyon sürecinde cüruf ile düşük kalsiyumlu uçucu kül arasındaki etkileşimi nasıl etkilediğini incelemiştir. Ayrıca, aktivatörlerin oluşan amorf jel ve kristalin fazlar üzerinde etkisi olduğu gözlenmiştir. Bununla birlikte, mikro yapıdaki heterojenik yapısında da aktivatörler tarafından etkilendiği belirlenmiştir. Farklı aktivatörlerin kullanımıyla elde edilen mikro yapılar arasında belirgin farklılıklar bulunduğu gözlemlenmemiştir. Ayrıca, kristalin fazların bileşimi üzerinde de aktivatörlerin belirleyici bir rol oynadığı açıklanmıştır. Sonuç olarak araştırma, aktivatörlerin seçimi ve kullanımının, alkali aktivasyon sürecinde oluşan yapısal özellikler üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu vurgulanmıştır.

Provis'in 2018 yılında yaptığı araştırmada, alkali aktivasyonlu bağlayıcıların geleceğin küresel inşaat malzemeleri endüstrisinde kritik bir rol oynayabileceğini ortaya koymuştur. Yerel kaynaklardan elde edilen malzemelerin ve dikkatle hazırlanan karışım tasarımlarının kullanılmasıyla, bu bağlayıcıların maliyet ve çevre dostu bir alternatif olduğu belirlenmiştir. Ayrıca bu malzemelerin sürdürülebilir inşaat uygulamalarının önemli bir parçası olabileceği gözlenmiştir. Araştırma sonuçlarına göre, alkali aktivasyonlu bağlayıcılar, uygun maliyetli olması ile birlikte çevresel etkileri en aza indirme potansiyeline sahiptir. Bu çalışma

gelecekte inşaat sektöründe bu tür malzemelerin daha yaygın kullanılması gerektiğini vurgulamıştır.

2.3. Çelik Lifler

Bilindiği üzere gerek çimentolu gerek geopolimer betonun basınç dayanımı doğal taşlar kadar yüksektir. Beton basınç gerilmeleri kolay bir şekilde karşılayabilmektedir. Fakat betonun çekme dayanımı oldukça düşüktür. Küçük yükler altında çatlak oluşumuna sebebiyet vermesinden dolayı betonun dayanımı ve dayanıklılığı azalmasına neden olmaktadır. Betonun bu gibi zayıf özelliklerini iyileştirilmesi için betona çelik lifler gibi çeşitli malzemeler katılır. Betona katılan çelik lifin elastisite modülünün değeri yüksek olması nedeni ile süneklik düzeyi yüksek bir beton üretilebilir.



Şekil 2.4 : Çelik lif (URL 7)

Kozak'ın (2013) yaptığı çalışmada beton içerisinde çelik liflerin kullanımı, lifin geometrisi ve beton matrisi ile olan etkileşime bağlı olarak değişebildiği belirtilmiştir. Bu sebeple,

çeşitli geometrik formdaki çelik liflerin üretimi ve kullanımı yaygın olduğu açıklanmıştır. Betonun liflerle güçlendirilmesi, çekme dayanımındaki zayıf özelliklerin iyileştirilmesine yardımcı olabildiği vurgulanmıştır. Betonun çekme dayanımının düşük olması, statik çekme gerilmelerinden kaçınılmasına neden olurken, dinamik yükleme durumlarında çekme gerilmeleri kaçınılmaz hale geldiği de görülmüştür. Çekme gerilmeleri çatlak oluşumunu artırmış ve çatlak boyutunu artırabildiğinden bu durumu önlemek için betonun liflerle güçlendirilmesi etkili bir yöntem olduğu gözlenmiştir. Çelik liflerin betonda kullanılmasının altı başlıca faydası bulunduğu belirtilmiştir. Bu faydalar arasında yüksek taşıma kapasitesine sahip sünek beton, düzgün beton yüzeyi, etkili çatlak kontrolü, dayanıklılık, donatı işçiliğinde azalma ve betonun sünek davranışı yer aldığı ortaya konulmuştur. Deprem bölgelerinde çelik lifli betonun kullanılması, yüksek kırılma enerjisi özelliğinden faydalanmak amacıyla teşvik edilmesi gerektiği açıklanmıştır. Çelik lifli betonlar, çeşitli yapı tiplerinde ve endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanıldığı vurgulanmıştır.



Şekil 2.5 : Çelik lif takviyeli beton (URL 8)

Naaman'ın (2003) yaptığı araştırmanın neticesinde şu sonuçlara varılmıştır: Çelik lifler, beton ve çimento kompozitlerinde yaygın olarak kullanılan önemli bir malzemedir. Bu malzemenin kullanımıyla ilgili yapılan çalışmalar, çelik liflerin boyutları, şekilleri ve mekanik özelliklerinin yanı sıra çeşitli matrislerle uyumluluğunu da içermektedir. Örneğin, çimento kompozitlerinde kullanılmak üzere geliştirilen Torex çelik elyaflar, piyasadaki diğer çelik elyaflara göre üstün performans (2-3 kat) sağlayarak yapısal ve bağımsız uygulamalarda kullanımlarını geliştirmektedir.

Su ve ekibi (2016) yılında yaptıkları araştırmanın neticesinde şu sonuçlara varmıştır: Çelik liflerin ultra yüksek performanslı beton (UHPC) matrislerine eklenmesi, dayanıklılığını ve darbe direncini önemli ölçüde artırabilir. Betonun çeşitli uygulamalarında kullanıldığında yapısal sağlamlığını güçlendirdiği ve uzun dönemdeki performansını iyileştirdiği belirtilmiştir. Özellikle yüksek mukavemet gerektiren yapısal uygulamalarda, çelik liflerin UHPC matrislerine entegre edilmesi, malzemenin farklı zorluklara dayanma kabiliyetini artırabilir. Bu da yapıların dayanıklılığını güçlendirerek, uzun süreli ve güvenli bir yapı oluşturabilir.



Şekil 2.6 : UHPC teknolojisi kullanılarak Fransa’da inşa edilen Millau Viyadüğü (URL 9)

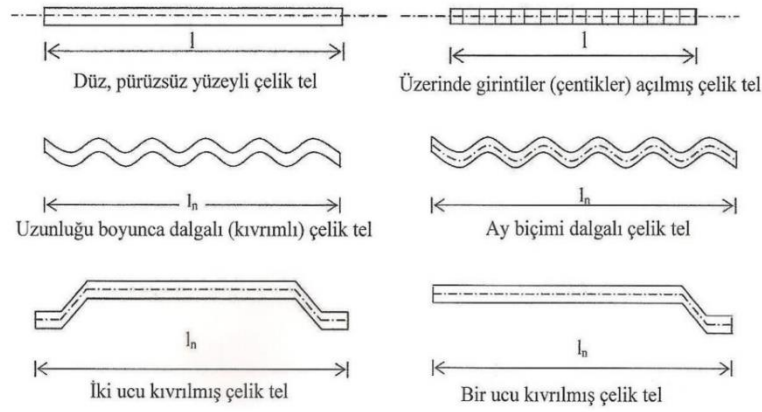
Serin ve ark. 2012 yılında gerçekleştirdikleri çalışmada trafik etkilerine maruz kalan üstyapı yüzey tabakasında çelik liflerin ilavesi gerilmeleri azaltma potansiyelini araştırmaktadır. Araştırma kapsamında, çeşitli numuneler üretilmiş ve bu numuneler Marshall Stabilitate Testi ile test edilmiştir. Ayrıca kullanılacak agrega numunesi için optimum bitüm içeriği değeri belirlenmiştir. %5,5 optimum bitüm içeriği için çeşitli lif oranları (%0, %0,25, %0,50, %0,75, %1,0, %1,5, %2,0, %2,5) serisi üzerinde yapılan testlerle desteklenmiştir. En yüksek stabilite değerini veren lif oranı %0,75 olarak tespit edilmiştir. Çelik lif ilavesinin esnek kaplamalarda stabiliteyi artırdığı ve trafik etkilerine maruz kalan yollarda kullanılabileceği sonucuna varılmıştır. Asfalt betonu karışımlarında çelik liflerin optimal oranının %0,75 olduğunu ve bu durumun bağlayıcı tabakasında olumlu bir stabilite etkisi sağladığını göstermektedir. Çelik lif ilavesinin trafik etkilerine maruz kalan esnek kaplamalarda

stabiliteyi artırdığı bulunmuştur. Çalışma çelik liflerin esnek kaplamalarda kullanılmasının yapısal dayanıklılığı ve uzun vadeli performansı artırabileceğini bulmuştur.

Sorellive diğ., (2006) yaptıkları araştırmanın neticesinde, çelik lif takviyeli beton (SFRC) plakaların taşıma kapasitesinin ve sünekliğinin önemli ölçüde arttığını belirlemişlerdir. Ayrıca, farklı lif geometrileri ve hacim oranları ile yapılan testlerin SFRC plakaların doğrusal olmayan davranışlarını doğru bir şekilde modellediği gözlenmiştir. Çelik liflerin plakaların taşıma kapasitesini artırdığı görülmüştür. Sünekliğin arttığı da belirlenmiştir. Yapısal performansın lif geometrisine bağlı olduğu açıklanmıştır. Doğrusal olmayan davranışların modelleme başarısı vurgulanmıştır. Bu sonuçlara dayanarak, çelik liflerin eklenmesi SFRC plakaların performansını iyileştirdiği sonucuna varılmıştır.

Bitencourt ve diğ., (2019) tarafından yapılan araştırmanın sonuçlarına göre, çelik lif takviyeli betonun davranışını simüle etmek için yeni bir dijital model geliştirilmiş ve bu model, beton, lifler ve lif-matris arayüzü olmak üzere üç fazlı bir kompozit olarak düzenlenmiştir. Model, SFRC'nin karmaşık doğrusal olmayan davranışını başarılı bir şekilde simüle etmektedir. Araştırma, çelik liflerin SFRC'nin mekanik özelliklerini artırdığını ve bu yeni dijital modelin, malzeme mühendislerinin beton plakaların tasarımını daha doğru bir şekilde yapmalarına olanak tanıdığını göstermektedir.

Tadepalli ve diğ., (2013) tarafından yapılan çalışmada, 150 mm x 150 mm x 500 mm boyutlarındaki kiriş numunelerinde, donatı olarak iki farklı tip kancalı lifler ve bir tip bükümlü çelik lif kullanılmıştır. Çelik liflerin boyutu, şekli ve miktarının betonun mekanik özellikleri üzerindeki etkisini araştırmak amacıyla çeşitli deneyler gerçekleştirilmiştir. Araştırma kapsamında, betonun basınç dayanımı, ilk çatlak eğilme dayanımı, nihai eğilme dayanımı, elastisite modülü ve eğilme tokluğu gibi mekanik özellikleri incelenmiştir. Beton karışımlarının basınç dayanımları, ASTM C39 standartlarına göre yapılan silindir testleriyle belirlenmiştir. Yapılan deneysel çalışmaların sonuçlarına göre, çelik liflerin betona eklenmesinin basınç dayanımını ve elastisite modülünü hafifçe artırabildiği ancak eğilme dayanımını, eğilme tokluğunu ve sünekliği önemli ölçüde artırdığı görülmüştür.



Şekil 2.7 : Çelik lifin türleri (TS 10513, 1992)

Yang ve arkadaşları'nın 2021 yılında gerçekleştirdikleri araştırmada ultra yüksek performanslı lif takviyeli betonun (UHPRC) basınç dayanımı ve elastisite modülü, yapısal tasarımda büyük önem taşıdığı belirtmişlerdir. Çelik liflerin UHPRC üzerindeki etkileri, farklı lif hacim oranları ve en-boy oranlarına sahip 36 numune üzerinde incelenmiştir. Sonuçlar, lif miktarı arttıkça basınç dayanımı ve elastisite modülünün de arttığını, ancak bu artışın lif oranı %2'yi aştığında yavaşladığını göstermiştir. Çelik lifler, çatlak oluşumunu ve yayılmasını engelleyerek betonun dayanımını artırırken, taze betonun akışkanlığını azalttığı görülmüştür. X-ışını CT taramaları, artan lif oranının betonun gözenekliliğini ve gözenek boyutlarını artırdığını vurgulanmıştır. Basınç dayanımı ve elastisite modülü için tahmin formülleri geliştirilmiş ve literatürdeki verilerle doğrulandığı açıklanmıştır.

2.4. Beton Boru

Beton borular, su ve atık suyun güvenli bir şekilde iletilmesi için kullanılan sağlam ve uzun ömürlü yapı elemanlarıdır. İnşaat sektöründe yaygın olarak tercih edilen beton borular, çeşitli çap ve uzunluklarda üretilebilir ve farklı zemin koşullarına uyum sağlayabilir.

Beton boruların kullanım alanları:

- **Kanalizasyon ve atık su iletimi:** Atık su ve yağmur suyunun toplanması ve taşınması için kullanılır.
- **Su dağıtımı:** İçme suyun taşınması ve dağıtılması için kullanılır.
- **İnfrastrüktür projeleri:** Yolların altına döşenerek yağmur suyu tahliye sistemleri için kullanılır.
- **Tarım sulama sistemleri:** Sulama kanalları ve su depolama sistemlerinde kullanılır.

Beton borular, maliyet etkinliği, dayanıklılığı ve çeşitli uygulama alanları nedeniyle inşaat sektöründe önemli bir tercih haline gelmiştir.



Şekil 2.8 : Beton boru (URL 10)

Fisher ve diğ., (2001) tarafından yapılan araştırmanın neticesinde şu bulgular elde edilmiştir. Selüloz lif takviyeli beton (FRC) ve çelik takviyeli beton (SRC) boruların kanalizasyon ortamlarında uzun vadeli dayanıklılığı değerlendirilmiştir. Yapılan testler, her iki malzemeden üretilen boru örneklerinin kanalizasyon ortamında mukavemet özelliklerinin hafifçe etkilendiğini, ancak malzemenin yüzey özelliklerinde önemli değişiklikler olduğunu göstermektedir. Araştırma, FRC boruların kanalizasyon sistemlerindeki performansını, uzun zaman boyunca kanıtlanmış SRC boruların performansı ile karşılaştırmıştır. Sülfürik asit

retimi biyolojik süreçler sonucunda boru arızalarının ana nedenlerinden biri olarak belirlenmiştir. Ayrıca, FRC borularda selüloz liflerinin biyolojik bozunma riskinin göz ardı edilmemesi gerektiği gözlemlenmiştir. Sonuç olarak, FRC boruların dayanıklılık özellikleri ve performansı, SRC borulara göre daha az tercih edilebilir bulunmuştur. Kanalizasyon sistemlerinde SRC boruların genellikle daha iyi performans gösterdiği ve daha dayanıklı olduğu düşünülmektedir.

Zhang ve diğ., (2020) yaptıkları araştırmanın neticesinde, beton borular, in'deki drenaj sistemlerinde yaygın olarak kullanıldığı ne srlmştir. Fakat uzun süreli bakımsızlık sonucu çatlaklar gibi sorunlar ortaya çıkar ve boruların mekanik özelliklerini olumsuz etkilediği belirtilmiştir. Yapılan alışma, çeşitli çatlakların beton boruların taşıma kapasitesine etkisi ve Beton boruların dış yük altında davranışı, elastik, elastik-plastik ve plastik-failure aşamalarında incelenmiştir. Çatlakların uzunluğu ve derinliği, borunun taşıma kapasitesini belirgin şekilde azalttığı açıklanmıştır. Ayrıca, çatlakların konumu da taşıma kapasitesini etkilediği grlmştir. Çatlaklar borunun ta veya tersi noktasında konumlanırsa, yay hattındaki konumlarına göre taşıma kapasitesini önemli ölçüde etkilediği ortaya konulmuştur.

3. MATERYAL VE METOD

3.1. Materyal

3.1.1. Yüksek fırın cürufu (YFC)

Gerçekleştirdiğimiz çalışmamızda bağlayıcı madde olarak yüksek fırın cürufu kullanılmıştır. YFC, demir üretimi sırasında yüksek fırında meydana gelen ve cam benzeri bir yapıya sahip olan bir yan üründür. Temel bileşenleri arasında silika (SiO_2), alümina (Al_2O_3), kalsiyum oksit (CaO) ve magnezyum oksit (MgO) bulunmaktadır. Bu bileşenler geopolimerizasyon reaksiyonları için gerekli olan silika ve alüminayı sağlamaktadır. Kullanılan YFC, öncelikle kurutulmuş, ardından ince öğütülerek reaktivitesi artırılmıştır.

Bu çalışmada kullanılan yüksek fırın cürufu, Karçimsa Fabrikası'ndan temin edilmiş olup, öğütme işlemine tabi tutulmuştur. Öğütme sonrası spesifik yüzeyi $3996 \text{ cm}^2/\text{g}$ olarak belirlenmiş ve özgül ağırlık değeri ise $2,86 \text{ g/cm}^3$ 'tür.

3.1.2. Silis dumanı (SD)

Silis dumanı, metal silisyum ve ferro silisyum alaşımlarının üretimi sırasında oluşan, yüksek oranda amorf silika (SiO_2) içeren çok ince bir tozdur. Silis dumanı, yüksek spesifik yüzey alanı ve reaktif silika içeriği sayesinde geopolimerizasyon reaksiyonlarını hızlandırmakta ve betona ilave mukavemet kazandırmaktadır. Çalışmamızda kullanılan silis dumanı, endüstriyel bir firmadan temin edilerek doğrudan karışıma eklenmiştir.

Tablo 3.1 : Bağlayıcı maddelerin kimyasal bileşimi

Bileşenler (%)	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	Na_2O
Yüksek Fırın Cürufu sl	32.5	9.94	1.25	32.5	9.31	0.31	0.82
Silis Dumanı	94.9	1.2	0.9	0.9	1.5	0.3	0.3

3.1.3. Alkali aktivatör

Geopolimer betonun üretiminde kullanılan alkali aktivatörler, bağlayıcı maddelerin kimyasal olarak aktive edilmesi ve polikondensasyon reaksiyonlarının başlaması için gereklidir. Bu çalışmada, sodyum hidroksit (NaOH) ve sodyum silikat (Na_2SiO_3) alkali aktivatörler olarak seçilmiştir.

3.1.3.1. Sodyum hidroksit (NaOH) (SH)

Sodyum hidroksit, geopolimerizasyon sürecinde önemli bir rol oynar. Yüksek pH seviyesine sahip olan NaOH, bağlayıcı maddelerde bulunan alümina ve silika bileşenlerini çözerek aktif hale getirir. Bu çalışmada kullanılan NaOH çözeltisi, belirli bir konsantrasyonda hazırlanmıştır. NaOH çözeltisinin molaritesi genellikle 8M ile 15M arasında değişmektedir ve bu çalışma için 9M, 12M ve 15M NaOH çözeltisi tercih edilmiştir.

3.1.3.2. Sodyum silikat (Na_2SiO_3) (SS)

Sodyum silikat, geopolimerizasyon sürecinde polikondensasyon reaksiyonlarını teşvik eden bir diğer önemli alkali aktivatördür. Na_2SiO_3 çözeltisi, çözünmüş silika ve sodyum iyonları içerir ve bu iyonlar geopolimer matrisi oluşturmak için gerekli olan kimyasal bağların oluşumunu sağlar. Bu çalışmada kullanılan sodyum silikat çözeltisinin kimyasal bileşimi, $\%\text{SiO}_2$ ve $\%\text{Na}_2\text{O}$ oranları açısından belirlenmiştir. Na_2SiO_3 çözeltisi, NaOH çözeltisi ile (SS/SH=1/1) oranında karıştırılarak geopolimer beton karışımına eklenmiştir.

Kimyasalların özellikleri Tablo 3.2'de gösterilmiştir.

Tablo 3.2 : Alkali aktivatörlerin kimyasal özellikleri

	Molekül formülü (g/mol)	Molekül ağırlığı (g/cm ³)	Bağıl yoğunluk	Renk	pH Değeri
Sodyum Hidroksit	NaOH	40.00	2.13	Beyaz	13-14
Sodyum Silikat	Na_2SiO_3	122.0	-	Renksiz	11-12.5

3.1.4. Alkali aktivörlerin hazırlanması ve kullanımı

Geopolimer betonların üretimi, çevresel sürdürülebilirlik ve yüksek performans sağlama potansiyelleri nedeniyle günümüz inşaat malzemesi araştırmalarında önemli bir yer tutmaktadır. Çalışmamızda geopolimer betonun temel bileşenlerinden biri olan alkali aktivatörlerin hazırlanması için, 9M, 12M ve 15M konsantrasyonlarında sodyum hidroksit (NaOH) çözeltileri kullanılmıştır. Her bir molarite düzeyindeki NaOH çözeltisi, önceden belirlenen miktarlarda su ile karıştırılarak hazırlanmıştır.

Aktivatör çözeltisinin ikinci ana bileşeni olarak, her bir NaOH çözeltisine ağırlıkça çözeltinin ağırlığı kadar sodyum silikat (Na_2SiO_3) eklenmiştir. Bu iki bileşenin karışımı, dikkatli bir şekilde homojen hale getirilene kadar karıştırılmıştır. Sodyum silikat, NaOH ile birleştiğinde, alüminosilikat kaynakları ile reaksiyona girerek geopolimer matrisin oluşumunu tetikler. Bu karışım geopolimer betonun yapısal bütünlüğünü ve çevresel direncini artırmada kritik rol oynar.

Hazırlanan bu alkali aktivatör çözeltileri, çeşitli testler ve deneylerle doğrulanmıştır. Bu çözeltiler kullanılarak üretilen geopolimer beton karışımları, farklı molarite seviyelerinin betonun mekanik ve fiziksel özellikleri üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla kullanılmıştır. Bu sayede, çeşitli yapısal ihtiyaçlara uygun, optimizasyonu yapılmış geopolimer beton karışımlarının geliştirilmesi hedeflenmiştir.

3.1.5. Çelik lif

Bu çalışmada, geopolimer betonun mekanik özelliklerini iyileştirmek amacıyla çelik lifler kullanılmıştır. Lifler, Türkiye'nin İzmit ilçesinde bulunan Bekaert Çelik Kord Fabrikası'ndan temin edilmiştir. Kullanılan çelik lifler, 6 mm uzunluğa, 40 narinlik değerine ve 16 mikrometre (μm) çapa sahiptir. Bu liflerin üzerinde bulunan bakır kaplama, malzemenin korozyon direncini artırarak çevresel etkilere karşı koruma sağlamaktadır.

Liflerin yüksek çekme mukavemeti, betonun yapısal bütünlüğünü ve dayanıklılığını artırır. Bu özellikler liflerin beton içindeki dağılımını ve etkileşimini optimize eder, böylece yapısal yükler altında betonun performansını maksimuma getirmeye yardımcı olur. Liflerin görsel ve teknik

detayları Şekil 3.3’de gösterilmiştir. Bu görseller, liflerin boyutları ve yapısal özelliklerini daha iyi anlamak için önemlidir.

Tablo 3.3 : Çelik liflerin mekanik ve fiziksel özellikleri

Uzunluğu	Çapı	Yoğunluğu	Çekme Dayanımı	Young Modülü	Uzama miktarı
(mm)	(μm)	(gr/cm^3)	(MPa)	(GPa)	(%)
6.00	16	7.20	3000	198	25

Kısacası, bu çelik lifler, betonarme yapıların daha uzun ömürlü ve daha dayanıklı olmasını sağlamakta büyük rol oynamaktadır. Liflerin katkısıyla, beton daha yüksek mekanik dayanım ve mükemmel korozyon direnci özellikleri kazanmaktadır.



Şekil 3.1: Bakır kaplı çelik lif

3.1.6. Agregalar

Geopolimer betonlar normal betonlara benzer şekilde, hacminin büyük bir kısmını (%70-80) agregalarla oluşturur. Bu çalışmada kullanılan agregalar, Türk Standartlarına (TS 802, 2009) uygun olarak seçilmiştir. Bu standart, agregaların ideal tane dağılımını belirleyerek, beton karışımlarının optimum performansını garanti altına almayı amaçlar. Çalışmamızda, agregaların tane boyutu, kullanım kolaylığı ve betonun mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini dikkate alarak özenle ayarlanmıştır.

Karışımlarda kullanılan maksimum agrega tane çapı 8 mm olarak belirlenmiştir. Agregaların boyutlandırılması, 0-4 mm ve 4-8 mm çaplı elekler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu süreçte, iki farklı tane sınıfı elde edilmiştir. Şekil 3.2’de gösterildiği gibi 0-4 mm tane boyutlarına sahip agregalar ince agrega, 4-8 mm tane boyutlarına sahip olanlar ise iri agrega olarak sınıflandırılmıştır. İnce agregalar, betonun daha homojen ve işlenebilir bir yapı kazanmasını sağlarken, iri agregalar betonun yapısal direncini arttırmaktadır.

Agrega seçimi ve boyutlandırması, geopolimer betonların sürdürülebilirliği, dayanıklılığı ve çevresel etkilere direnci gibi kritik özellikler üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Bu çalışmada kullanılan metodoloji, beton karışımlarının istenilen mekanik özelliklere ulaşmasını sağlamakla kalmayıp, aynı zamanda çevresel açıdan da avantajlar sunmaktadır. Agregaların bu şekilde sınıflandırılması, betonun yük taşıma kapasitesini ve çatlak direncini optimize ederken aynı zamanda karışımın işlenmesini kolaylaştırmaktadır.

Agregaların doğru seçimi ve uygun boyutlandırılması, yüksek performanslı ve uzun ömürlü beton yapılar elde etmek için kritik öneme sahiptir.



a) 0-4mm elekten geçen agrega

b) 4-8mm elekten geçen agrega

Şekil 3.2 : Çalışmada kullanılan agregalar

3.1.7. Lifsiz geopolimer beton üretimi

Bu çalışmada, geleneksel yapı malzemelerine alternatif olarak sürdürülebilir ve çevre dostu çözümler arayışı içinde, farklı molar oranlarda geopolimer beton örnekleri geliştirilmiştir. Geopolimer betonun ana bileşenleri arasında, reaktif alkali çözeltiler olarak sodyum hidroksit (NaOH) ve sodyum silikat (Na_2SiO_3), ayrıca endüstriyel atık ürünler olan silis dumanı ve yüksek fırın cürufu yer almaktadır. Bu malzemelerin kombinasyonu, betonun yapısal özelliklerini geliştirirken aynı zamanda çevresel etkileri azaltmayı hedeflemektedir.

3.1.7.1 Karışım hazırlığı ve döküm süreci

Optimal karışım oranlarını belirlemek amacıyla, ilk olarak lifsiz beton karışımları dökülmüş ve bu örnekler arasından en yüksek dayanıma sahip olan seçilmiştir. Karışım,

9M, 12M ve 15M molar oranlarında hazırlanan NaOH çözeltileri ile aynı oranda Na_2SiO_3 eklenerek zenginleştirilmiştir. Alkali aktivatörlerin bu eşit oranı, yani belirlenen molaritede hazırlanan NaOH çözeltisinin ağırlığı kadar sodyum silikat eklenmiş olup böylece silis dumanı ve yüksek fırın cürufu ile birleştirilerek homojen bir karışım elde edilmiştir. Bu süreç, malzemelerin tam ve etkili bir şekilde tepkimeye girmesini sağlamış, böylece geopolimerleşme reaksiyonunun başarısını artırmıştır.

3.1.7.2 Kalıplara yerleştirme

Homojen karışım, vibrasyon uygulaması ile hava kabarcıklarının giderilmesi ve yüzey düzgünlüğünün artırılması amacıyla önceden yağlanmış 50x50x50 mm boyutlarındaki çelik kalıplara dökülmüştür. Vibrasyon işlemi, betonun daha kompakt bir yapıya sahip olmasını ve kalıptan kolayca ayrılmasını sağlar. Ayrıca, bu işlem sırasında betonun mikro yapısında oluşabilecek herhangi bir boşluk veya çatlak minimizasyonuna katkıda bulunur.

3.1.7.3 Kürleme süreci

Örnekler, kalıptan çıkarıldıktan sonra kontrol edilen laboratuvar ortamında 7, 28 ve 56 gün sürelerle kürleme sürecine tabi tutulmuştur. Bu süre zarfında, betonun kürleme süreci ve çevresel koşullara karşı dayanıklılığı gibi önemli parametreler gözlemlenmiştir. Kürleme süreci, betonun son mukavemet değerleri ve dayanıklılığı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir ve bu süreçte yapılan gözlemler, malzemenin performans değerlendirilmesi için kritik önem taşır. Aşağıdaki tablolarda (Tablo 3.4, 3.5 ve 3.6) lifsiz geopolimer betonun karışım oranları gösterilmiştir.

Tablo 3.4 : 9 molar NaOH ile üretilen geopolimer betonun karışım oranları

Karışım Kodu	YFC (g)	SD (g)	İnce Agrega (g)	İri Agrega (g)	Aktivatör (SS/SH=1)	Aktivatör / Bağlayıcı
9M-S0	540	0	657	354	1	0,42
9M-S4	518	22 (%4)	581	313	1	0,51
9M-S8	497	43 (%8)	626	337	1	0,45
9M-S12	475	65 (%12)	534	288	1	0,56
9 Molar (Sodyum Silikat / Sodyum Hidroksit = 1) Tüm numunelerde %65 iri agrega % 35 ince agrega kullanılmıştır						

Tablo 3.5 : 12 molar NaOH ile üretilen geopolimer betonun karışım oranları

Karışım Kodu	YFC (g)	SD (g)	İnce Agrega (g)	İri Agrega (g)	Aktivatör (SS/SH=1)	Aktivatör / Bağlayıcı
12M-S0	540	0	624	336	1	0,46
12M-S4	518	22 (%4)	541	291	1	0,56
12M-S8	497	43 (%8)	546	294	1	0,55
12M-S12	475	65 (%12)	527	284	1	0,57
12 Molar (Sodyum Silikat / Sodyum Hidroksit = 1) Tüm numunelerde %65 iri agrega % 35 ince agrega kullanılmıştır						

Tablo 3.6 : 15 molar NaOH ile üretilen geopolimer betonun karışım oranları

Karışım Kodu	YFC (g)	SD (g)	İnce Agregat (g)	İri Agregat (g)	Aktivatör (SS/SH=1)	Aktivatör / Bağlayıcı
15M-S0	540	0	521	281	1	0,59
15M-S4	518	22 (%4)	598	322	1	0,49
15M-S8	497	43 (%8)	618	333	1	0,46
15M-S12	475	65 (%12)	614	331	1	0,46
15 Molar (Sodyum Silikat / Sodyum Hidroksit = 1)						
Tüm numunelerde %65 iri agregat % 35 ince agregat kullanılmıştır						

3.1.8. Lifli geopolimer beton üretimi

Araştırmamız, alternatif yapı malzemeleri geliştirilerek, farklı oranlarda çelik lif içeren geopolimer beton karışımları üzerine yoğunlaşmaktadır. İlk olarak, en yüksek dayanıma sahip lifsiz beton karışımı optimum karışım olarak seçilmiştir. Bu karışıma, betonun sünekliğini ve dayanıklılığını artırmak için %0.5, %1 ve %1.5 oranlarında çelik lifler eklenmiştir. Ayrıca, çelik lifli betonun işlenebilirliğini artırmak amacıyla özel bir akışkanlaştırıcı da karışıma dahil edilmiştir. Bu akışkanlaştırıcı, betonun karışım sırasında daha homojen olmasını sağlayarak, döküm ve yerleştirme işlemlerini kolaylaştırmaktadır.

3.1.8.1. Karışım hazırlığı ve döküm süreci

Çelik kalıplar, beton karışımlarının kolayca çıkarılabilmesi için önceden yağlanmıştır. Karışımlar, kalıplara döküldükten sonra vibrasyon işlemi uygulanarak sıkıştırılmıştır. Bu işlem, betonun homojenliğini artırır ve hava boşluklarını azaltır, böylece yapısal bütünlüğü güçlendirir. Akışkanlaştırıcı ilavesi, karışımın daha düzgün yerleşmesini sağlar ve vibrasyon işlemi sırasında betonun mükemmel düzeyde sıkışmasına yardımcı olur. Çelik kalıplara dökülen geopolimer beton, mala yardımıyla düzeltilerek yüzey kalitesi artırılmıştır

3.1.8.2. Beton kür süreci

Döküm sonrası beton örnekleri 24 saat kalıplarda bekletilmiş ve sonrasında hem su hem de laboratuvar ortamında olmak üzere iki farklı kürleme yöntemleriyle kür edilmiştir. Bu süreç, betonun çeşitli çevresel koşullara uyum sağlama kapasitesini ve dayanıklılığını kapsamlı bir şekilde analiz etmek açısından kritik öneme sahiptir. Akışkanlaştırıcının eklenmesi, betonun işlenebilirliğini artırarak kürleme sürecinde daha homojen bir dağılım ve sertleşme sağlar.

3.1.8.3. Mekanik testler ve mikroyapısal analiz

Beton karışımlarının mekanik özellikleri, ASTM C39 ve ASTM C78/C78M standartlarına uygun olarak yapılan çekme ve basınç testleri ile değerlendirilmiştir. Akışkanlaştırıcı kullanımı, betonun işlenebilirliğini artırarak homojen bir karışım elde edilmesini sağlamıştır. SEM analizleri, çelik liflerin beton matrisi içindeki dağılımını ve yapısal bağlantılarını gözlemlemek için İnönü Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Araştırma Merkezi'nde gerçekleştirilmiştir. Bu süreçler, çelik liflerin eklenmesi ve akışkanlaştırıcı kullanımının betonun çatlak direnci ve çekme dayanıklılığı üzerindeki etkilerini belirlemekte önemli rol oynamıştır. Çelik lifli geopolimer betonun karışım oranları Tablo 3.7'de gösterilmiştir.

Tablo 3.7 : Çelik lifli geopolimer beton karışımları

Karışım Kodu	YFC (g)	Çelik Lif (%)	İnce Agregası (g)	İri Agregası (g)	Akışkanlaştırıcı (%2) (g)	Çözelti (SS/SH=1) (g)	Aktivatör / Bağlayıcı
K1F	2215	%0,5	2397	1291	44	1	0,48
K2F	2215	%1	2405	1295	44	1	0,47
K3F	2215	%1,5	2277	1226	44	1	0,50
Tüm numunelerde %65 iri agregası % 35 ince agregası kullanılmıştır 9 Molar (Sodyum Silikat / Sodyum Hidroksit = 1)							

3.1.9. Beton boru üretimi

Çalışmamızda, çelik lifli beton karışım numunelerinin basınç ve eğilme dayanımları incelendikten sonra optimum karışım belirlenmiştir. Bu optimum karışım, demir fabrikalarından elde edilen yüksek fırın cürufu (YFC) kullanılarak çimento kullanılmadan daha çevreci ve maliyet açısından uygun yapı elemanları üretim aşamasına geçilmiştir. Su basıncı ve ağır yüklerin bulunduğu bölgeler için üretilen bu yüksek dayanımlı malzemelerin kullanımı büyük önem taşımaktadır.

3.1.9.1. Malzeme hazırlığı ve döküm süreci

Beton boru üretimi için gerekli olan yüksek fırın cürufu (YFC), sodyum hidroksit (NaOH), sodyum silikat (Na_2SiO_3), akışkanlaştırıcı, iri ve ince agrega gibi malzemeler büyük döküm işlemleri için önceden hazırlanmıştır. Malzemelerin karıştırılması ve homojen hale gelmesi için şekil 3.4'te gösterilen makine kullanılmıştır. Küçük ölçekli dökümlerden elde edilen veriler altyapı projelerine yönelik olarak en uygun geopolimer beton boru üretimini belirlemek için kullanılmıştır. Bu verilere dayanarak üç adet geopolimer beton boru ve standart beton parametrelerine sahip beton borular üretilmiştir. Üretilen boruların kesit ve boyutları Şekil 3.3'te verilmiştir.

3.1.9.2. Mekanik testler ve enerji verimliliği

Üretilen beton borular, basınç testlerinde mekanik davranışlarının karşılaştırılması için kontrol amaçlı normal beton borular ile birlikte test edilmiştir. Geleneksel çimentolu beton boru üretiminde, yüksek erken dayanım (35-40 MPa) elde etmek amacıyla uygulanan buhar kürü, yüksek enerji tüketimine neden olmaktadır. Yapılan çalışmalar sonucunda, buhar kürüne gerek duymayan ve dolayısıyla daha az enerji tüketen yüksek dayanımlı çimentosuz beton boru elemanları başarıyla üretilmiştir. Şekil 3.5'te beton boru üretim makinesi gösterilmiştir

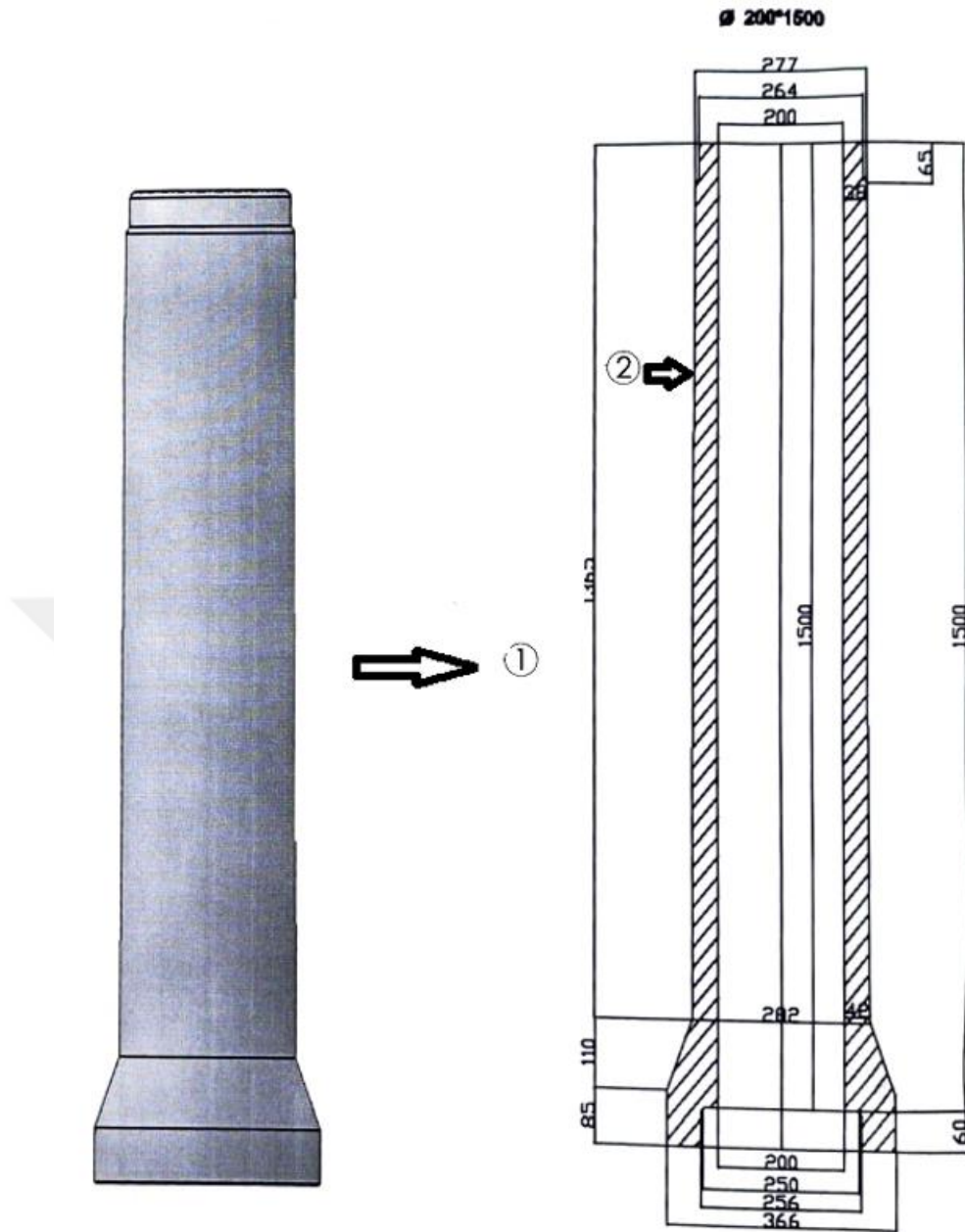
3.1.9.3. Çevresel etkiler ve sürdürülebilirlik

Yüksek fırın cürufu kullanımı, çimento ihtiyacını ortadan kaldırarak çevresel etkileri azaltmaktadır. Bu durum, karbon salımı ve enerji kullanımını önemli ölçüde düşürmektedir. Ayrıca, bu yeni üretim yöntemi, yapı malzemeleri sektöründe sürdürülebilirlik ve çevre dostu uygulamaların geliştirilmesine olanak sağlamaktadır. Şekil 3.6’da üretim sonrası beton borular gösterilmiştir.

Üretilen hem çimentolu beton boruların hem de geopolimer beton boruların isimlendirilmesi Tablo 3.8’de ayrıntılı olarak verilmektedir.

Tablo 3.8 : Üretilen beton borularının kod açılımları

C1: Contalı Beton Boru 1
C2: Contalı Beton Boru 2
CS1: Contasız Beton Boru 1
CS2: Contasız Beton Boru 2
G1: Geopolimer Beton Boru 1
GS1: Lifli Geopolimer Beton Boru 1



Şekil 3.3 : Beton borunun kesiti



Şekil 3.4 : YFC, agrega ve çelik lif malzemelerinin karıştırılması



Şekil 3.5 : Beton boru üretim makinası



Şekil 3.6 : Üretim sornası beton borular

3.2. Metot

3.2.1. Lifsiz geopolimer beton hazırlanışı

Bu çalışmada lifsiz geopolimer betonun hazırlanmasında bağlayıcı madde olarak silis dumanı ve yüksek fırın cürufu kullanılmıştır. Bağlayıcı malzeme oranı toplam karışımın %25'ini oluşturmuştur. Dört farklı malzeme oranına sahip karışımlar hazırlanmıştır. Bu karışımlarda silis dumanı, bağlayıcı malzemenin %0, %4, %8 ve %12'si oranlarında ikame edilmiştir.

Tüm karışımlarda sabit olarak %65 iri (4-8 mm) ve %35 ince dere agregası (0-4 mm) kullanılmıştır. Agregaların toplam miktarı, bağlayıcı malzemenin yaklaşık 1,8 katı olacak şekilde belirlenmiştir.

3.2.1.1. Alkali aktivatör hazırlanması

Geopolimer betonun aktivatörleri olarak sodyum hidroksit (NaOH) ve sodyum silikat çözeltileri kullanılmıştır. Beton geopolimerin güçlendirilmesi için, sodyum hidroksit (NaOH) çözeltisinin ağırlıkça 1 katı kadar sodyum silikat (Na_2SiO_3) eklenmiştir. Deneylerde 9M, 12M ve 15M konsantrasyonlarında sodyum hidroksit çözeltileri kullanılmıştır. Örneğin, 9M sodyum hidroksit çözeltisi hazırlamak için, 1 litre suya 360 gram NaOH eklenmiş ve iyice karıştırılmıştır. Daha sonra, bu çözelti ağırlığının 1 katı kadar sodyum silikat (Na_2SiO_3) eklenmiştir. Bu karışım iyice karıştırılarak homojen bir çözeltinin elde edilmesi sağlanmıştır.

3.2.1.2. Karışımın hazırlanması

Hazırlanan alkali aktivatör çözeltileri, karışım içerisine kıvam sağlanana kadar eklenmiş ve karışım 5 dakika boyunca karıştırılmıştır. Bu sürenin sonunda elde edilen homojen geopolimer beton, 50x50x50 mm boyutlarında çelik küp kalıplara dökülmüştür. Her bir karışımdan 6 adet numune çıkarılmıştır. Çelik kalıplara dökülen beton, vibrasyon işlemi uygulanarak düzgün bir şekilde yerleştirilmiş ve hava kabarcıklarının çıkması sağlanmıştır.

3.2.1.3. Kürleme işlemi

Kalıplara dökülen geopolimer beton numuneleri, belirli testler ve analizler için kürlenmeye bırakılmıştır. Kürleme işlemi, betonun dayanım kazanması ve kimyasal reaksiyonların tamamlanması için kritik bir aşamadır. Numuneler, oda sıcaklığında 24 saat bekletildikten sonra kalıplardan çıkarılmış ve kürleme işlemi için uygun koşullarda saklanmıştır. Kürleme süresi boyunca numuneler, belirli sıcaklık ve nem koşullarında muhafaza edilmiştir. Kürleme işlemi laboratuvar ortamında gerçekleştirilmiş olup 7, 28 ve 56 gün süreyle yapılmıştır. Bu s reler sonunda numuneler, mekanik dayanım testler için hazırlanmıştır.

3.2.2. Lifsiz geopolimer beton numunelerinin basınç dayanım testi

Basınç dayanım testi, geopolimer beton numunelerinin mekanik dayanım özelliklerini değerlendirmek için temel bir yöntemdir. Bu test betonun ne kadar yük taşıyabileceğini ve yapısal performansını ölçmek amacıyla yapılır. Çalışmamızda, üretilen numunelerin dayanımını belirlemek için belirli yaş aralıklarında bu test uygulanmıştır.

Numuneler, laboratuvar ortamında belirli kürleme koşullarına tabi tutulmuştur. Kürleme süresi boyunca numuneler, uygun sıcaklık ve nem koşullarında muhafaza edilmiştir.

3.2.2.1 Test cihazı ve yükleme sistemi

Basınç dayanımı testleri, İnönü Üniversitesi İnşaat Mühendisliği laboratuvarında bulunan basınç test cihazında gerçekleştirilmiştir. Testler, TS EN 12390-3 standartlarına uygun olarak yapılmıştır. Yükleme hızı, standartlara uygun olarak 2400 N/s olarak belirlenmiştir.

Kürleme süresi tamamlanmış olan geopolimer beton numuneleri, test öncesinde yüzeylerinin temiz ve kuru olduğundan emin olunarak hazırlanmıştır.

Her bir beton numunesi, basınç cihazının plakaları arasına dikkatlice yerleştirilmiştir. Numuneler, cihazın yükleme bölgesinin ortasına gelecek şekilde yerleştirilmiştir. Bu yükün eşit ve doğru bir şekilde uygulanmasını sağlar.

Test cihazı çalıştırılarak numunelere yavaş ve sürekli bir şekilde yük uygulanmıştır. Yük, numunenin kırılma noktasına ulaşana kadar artırılmıştır. Kırılma anında cihaz tarafından ölçülen maksimum kuvvet değeri kaydedilmiştir. Şekil 3.7’de basınç dayanım test cihazı gösterilmiştir.



Şekil 3.7 : Basınç dayanımı test cihazı

Kırılma anında elde edilen maksimum kuvvet değeri, numunenin yüzey alanına bölünerek basınç dayanımı MPa cinsinden hesaplanmıştır. Bu hesaplama şu formül kullanılarak yapılmıştır:

$$\text{Basınç Dayanımı (MPa)} = \frac{\text{Maksimum Kuvvet (N)}}{\text{Numune Yüzey Alanı (mm}^2\text{)}}$$

Numunelere uygulanan basınç dayanımı testleri, 7, 28 ve 56 günlük yaş aralıklarında gerçekleştirilmiştir. Her yaş aralığı için iki numune üzerinde test uygulanmış ve elde edilen sonuçların ortalaması alınmıştır. Bu sayede her yaş grubunun dayanım özellikleri karşılaştırılmış ve analiz edilmiştir.

7, 28 ve 56 günlük test sonuçları, geopolimer betonun zamanla nasıl güçlendiğini ve dayanım kazandığını göstermiştir. Elde edilen veriler, silis dumanı ve yüksek fırın cürufu oranlarının betonun basınç dayanımı üzerindeki etkilerini ortaya koymuştur.

3.2.2. Lifli geopolimer beton hazırlanışı

Bu çalışmada, lifli geopolimer beton numuneleri çelik lifler ve katkı maddesi eklenerek hazırlanmıştır. Yüksek fırın cürufu ve silis dumanı bağlayıcı malzemeler olarak kullanılmıştır. Betonun işlenebilirliğini artırmak için, bağlayıcı miktarının %2'si kadar akışkanlaştırıcı eklenmiştir. Üretilcek Geopolimer beton karışımına %0,5, %1 ve %1,5 oranlarında çelik lifler eklenmiştir. Karışımı homojen hale getirmek için, belirli oranlarda hazırlanan malzemeler önce çelik liflerle karıştırılmış, ardından aktivatör eklenerek malzemeler yeniden karıştırılmıştır. Tüm karışımlarda sabit olarak %65 iri (4-8 mm) ve %35 ince dere agregası (0-4 mm) kullanılmıştır.

3.2.2.1. Alkali aktivator hazırlanması

Önceki dökümlerde optimum olan 9M çözelti karışım bulunduğu için, bu çalışmada sadece 9M sodyum hidroksit çözeltisi kullanılmıştır. Hazırlanan 9M sodyum hidroksit çözeltisine, ağırlıkça 1 katı kadar sodyum silikat eklenmiş ve homojen bir çözelti elde edilmiştir.

3.2.2.2. Karışım ve döküm

Hazırlanan lifli geopolimer beton karışımı çelik kalıplara dökülmüştür. Kalıplara döküm sırasında vibrasyon işlemi uygulanarak betonun homojen ve düzgün bir şekilde yerleşmesi sağlanmıştır.

3.2.2.3. Kürleme işlemi

Dökülen numuneler, hem laboratuvar hem su ortamında kürleme koşullarına tabi tutulmuştur. Kürleme süresi boyunca numuneler, uygun sıcaklık ve nem koşullarında muhafaza edilmiştir. Kürleme işlemi 7, 28 ve 56 gün olarak gerçekleştirilmiştir.

3.2.3. Lifli geopolimer beton numunelerinin eğilme dayanım testi

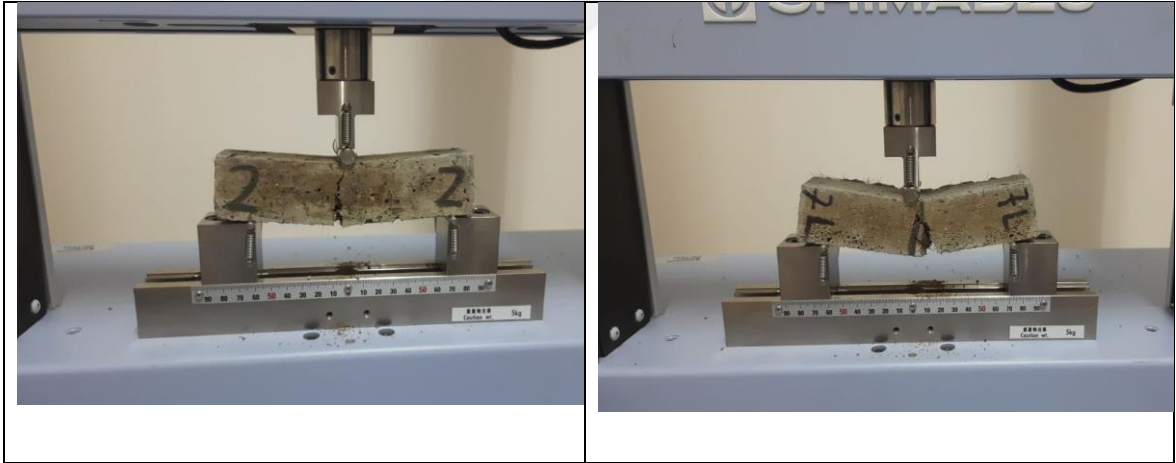
Üretilen lifli geopolimer beton numunelerinin eğilme dayanımı, ASTM C78/C78M standartlarına uygun olarak Universal Testing Systems kullanılarak ölçülmüştür. Testlerde, numunelerin eğilme yükü altındaki davranışları ve nihai yük kapasiteleri incelenmiştir. Şekil 3.8’de gösterildiği gibi lifli geopolimer beton numunelerine uygulanan üç noktalı eğilme dayanımı testi gerçekleştirilmiştir.

Eğilme dayanım testleri için hazırlanan numuneler, belirli standartlara uygun olarak hazırlanmıştır. Testler, 100 kN kapasiteli Shimadzu Universal Testing System kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yükleme hızı, 0.5 mm/dak olarak ayarlanmıştır.

Kür işlemi için, numuneler laboratuvar ortamında ve su ortamında bekletilmiştir. Her iki ortamda kürlenmiş numunelerin eğilme dayanımları ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Bu süreç, betonun farklı kürlenme koşulları altında nasıl performans gösterdiğini anlamak için önemlidir.

Test sürecinde her bir numune üç noktalı eğilme testi düzenine yerleştirilmiştir. Numuneler, destek noktaları arasına yerleştirilerek yük uygulanmış ve maksimum yük kapasitesi ile birlikte deplasman değerleri ölçülmüştür. Eğilme dayanımı, elde edilen maksimum kuvvet değeri ve numune boyutlarına göre direkt eğilme cihazı tarafından hesaplanmıştır.

Yapılan testler sayesinde, farklı lif oranlarına sahip ve farklı kürlenme koşullarında bekletilen geopolimer beton numunelerinin eğilme dayanımı değerlendirilmiş ve betonun esneklik özellikleri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, lifli geopolimer betonun yapısal uygulamalardaki performansını ve dayanıklılığını belirlemek için kullanılmıştır.



Şekil 3.8: Lifli geopolimer beton numunelerine uygulanan üç noktalı eğilme dayanımı testi

3.2.4. Lifli geopolimer beton numunelerinin basınç dayanım testi

Üretilen lifli geopolimer beton numunelerinin basınç dayanımı testi de yapılmıştır. Basınç dayanımı testlerinde, önce eğilme dayanım testi yapılan ve bu test sonucunda ikiye ayrılan ve hem su ortamında hem de laboratuvar ortamında kürlenmiş numuneler kullanılmıştır.

Basınç dayanım testi, İnönü Üniversitesi İnşaat Mühendisliği laboratuvarında bulunan basınç test cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Testler, TS EN 12390-3 standartlarına uygun olarak yapılmıştır. Yükleme hızı, 2400 N/s olarak belirlenmiştir.

3.2.4.1. Test Süreci

- Eğilme dayanım testi sonucu ikiye ayrılan lifli beton numuneleri, basınç dayanımı testine tabi tutulmuştur.
- Her bir numune, hem üstte hem de altta iki çelik plaka arasına yerleştirilmiştir. Ardından, bu şekilde hazırlanan numuneler dikkatlice basınç test cihazının plakaları arasına yerleştirilmiştir.
- Numuneler, cihazın yükleme bölgesinin ortasına gelecek şekilde konumlandırılmıştır.
- Cihaz çalıştırılarak numunelere yavaş ve sürekli bir şekilde yük uygulanmış, kırılma anında cihaz tarafından ölçülen maksimum kuvvet değeri kaydedilmiştir.
- Kırılma anında elde edilen maksimum kuvvet değeri, numunenin yüzey alanına bölünerek basınç dayanımı MPa cinsinden hesaplanmıştır.

Bu testler sonucunda, farklı kürlenme koşullarında (su ve laboratuvar ortamında) bekletilen lifli geopolimer beton numunelerinin basınç dayanımları değerlendirilmiştir. Elde edilen veriler, lifli geopolimer betonun basınç dayanımı özelliklerini ve yapısal performansını belirlemek için kullanılmıştır.

3.2.5. Beton boru basınç dayanım testi

Bu çalışmada, hem geleneksel çimentolu beton hem de geopolimer beton boruların basınç dayanımı test edilmiştir. Testler, Malatya Büyükşehir Belediyesine bağlı MESTON Fabrikasında üretilen boru örnekleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

3.2.5.1. Test cihazı ve kurulumu

Beton boru basınç dayanım testi, 60 ton kapasiteli bir çerçeve sistemi kullanılarak yapılmıştır. Bu sistem, kapalı döngü yükleme yapabilme özelliğine sahip olup, yük veya deplasman kontrolü ile çalışabilmektedir. Sistem, UTEST tarafından kurulmuştur. Testler, İnönü Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Mekaniği Laboratuvarı'ndaki yükleme çerçevesinde gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.9'da beton boruların mekanik özelliklerini incelenmek için kullanılan test cihazı gösterilmiştir.

3.2.5.2. Cihaz ve deney düzeni

- Beton boru test makineleri, bir çerçeve ve hidrolik güç ünitesinden oluşmaktadır. Çerçeveler, yüksek eksenel ve yanal rijitliğe sahip iki kolonlu yapılar olup, hassas bir şekilde hizalanmıştır.
- Deneyler, deplasman kontrollü yükleme yöntemi ile 0.1 mm/s hızında gerçekleştirilmiştir.
- Boru test makinesi çerçeveleri, çelik bir plaka ile beton zemine sabitlenmiştir. Çerçeveyi beton zemine sabitlemek için gerekli malzemeler sağlanmıştır.
- V-şekilli alt taşıyıcılar, çerçeveleri desteklemek için kullanılmıştır.
- Dikdörtgen üst taşıyıcı, aktüatörden çıkarılabilir ve alt yatak 150° açıya sahip V şeklindedir.



Şekil 3.9 : Beton boruların mekanik özelliklerini incelenmek için kullanılan test cihazı

3.2.5.3. Test Prosedürü:

- Hazırlanan beton boru numuneleri, yükleme çerçevesine yerleştirilmeden önce, borunun uzunlamasına ve boruya uyum sağlayacak şekilde hem borunun üstüne hem de altına gelecek iki tahta plaka konulmuştur.
- Numuneler, yükleme çerçevesine dikkatlice yerleştirilmiştir. Bu konumlandırma, yükleme sırasında dengeli bir basınç dağılımı sağlamak için önemlidir.
- Yükleme çerçevesi, iki kolonlu rijit bir yapı olduğundan, numunelere uygulanan yükün eksenel ve yanal doğrultularda doğru bir şekilde iletilmesi sağlanmıştır.
- Test sırasında, numunelere yavaş ve sürekli bir şekilde yük uygulanmış, yükleme hızı 0.1 mm/s olarak ayarlanmıştır.
- Yükleme işlemi sırasında, numunelerin deformasyonları ve maksimum basınç dayanımları kaydedilmiştir.

Bu testler sonucunda, hem geleneksel çimentolu beton hem de geopolimer beton boruların basınç dayanımları belirlenmiş ve performansları karşılaştırılmıştır. Elde edilen veriler, beton boruların yapısal uygulamalardaki dayanıklılığını ve uygunluğunu değerlendirmek için kullanılmıştır. Şekil 3.10'da beton borunun dayanımını belirleyen test sistemi gösterilmiştir.



a) Yükleme sistemi altında test edilen beton boruların yandan görünümü



b) Beton borunun yükleme sistemi altındaki yakın plan görüntüsü



c) Beton boruların dayanım testi düzeneği

Şekil 3.10 : Beton borunun dayanımını belirleyen test sistemi

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Geopolimer beton optimizasyonu

Bu bölümde, üretilen geopolimer beton numunelerinin sonuçları göz önünde bulundurularak optimizasyon işlemleri incelenmiştir. Çalışma kapsamında üç farklı molaritede (9M, 12M ve 15M) sodyum hidroksit çözeltileri hazırlanmıştır. Hazırlanan çözeltilere, ağırlıkları kadar sodyum silikat eklenmiş olup, sodyum hidroksit/sodyum silikat oranı 1 olacak şekilde ayarlanmıştır. Optimum sonuçları elde etmek amacıyla karışımlara %0, %4, %8 ve %12 oranında silis dumanı eklenmiştir.

50x50x50 mm boyutlarındaki ve laboratuvar ortamında kürlenmiş geopolimer beton numunelerinin 7, 28 ve 56 günlük basınç dayanımı değerlerine bakılmıştır. Sonuçlar, 7, 28 ve 56 günlük kürlenme sürelerinde en yüksek basınç dayanımının %0 silis dumanı ve 9M olan 9M-S0 karışımı ile elde edildiğini göstermektedir. Bu nedenle, optimum karışım 9M çözeltisi ve %0 silis dumanı içeren 9M-S0 karışımı olarak belirlenmiştir. Tablo 4.1’de farklı NaOH konsantrasyonlarına bağlı basınç dayanımları ayrıntılı bir şekilde gösterilmiştir.

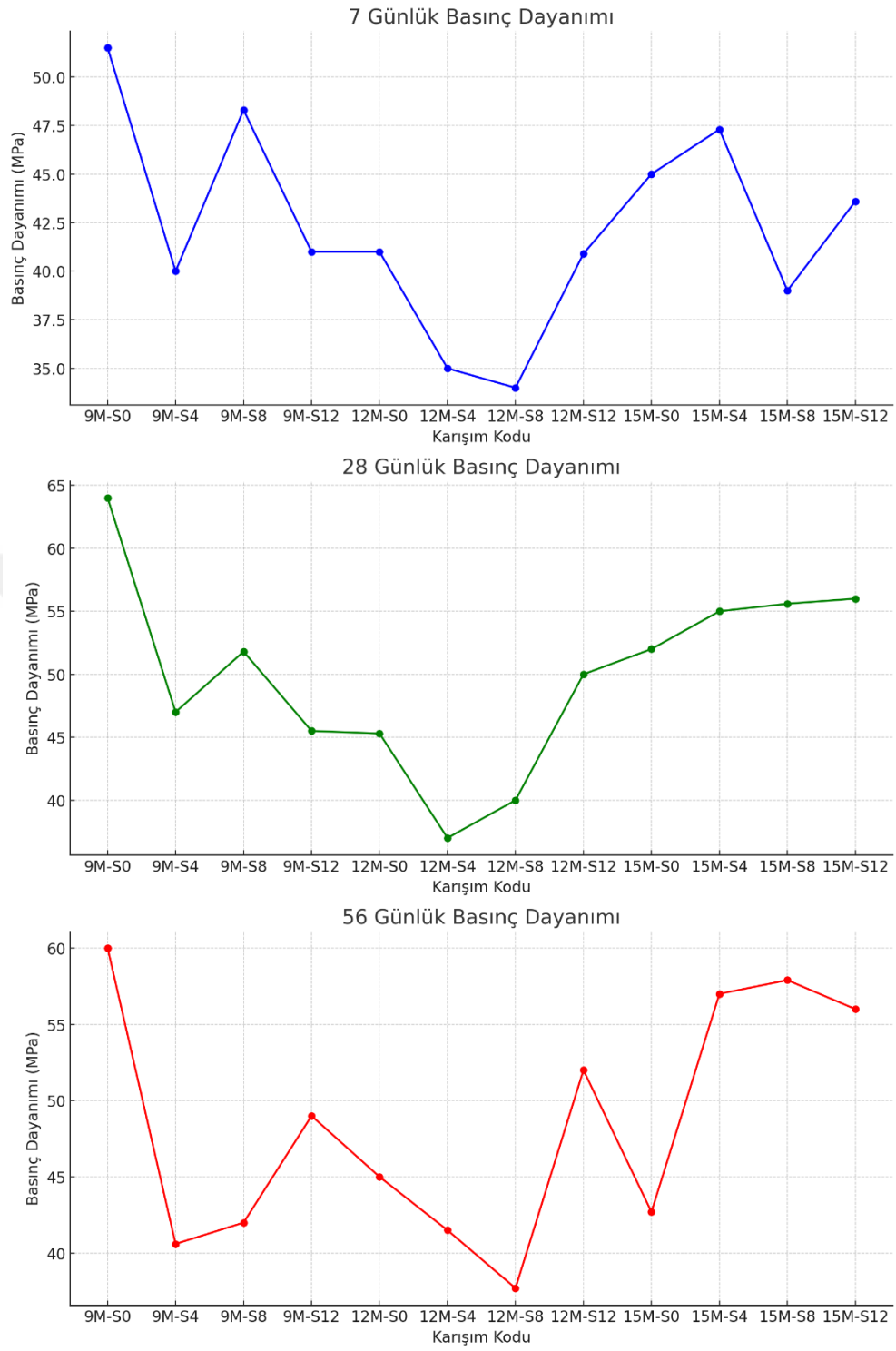
Tablo 4.1 : Farklı NaOH konsantrasyonlarına bağlı basınç dayanımları

Karışım Kodu	Molarite	Silis Dumanı	7 Günlük Basınç Dayanımı (MPa)	28 Günlük Basınç Dayanımı (MPa)	56 Günlük Basınç Dayanımı (MPa)
9M-S0	9	0%	51.5	64	60
9M-S4	9	4%	40	47	40.6
9M-S8	9	8%	48.3	51.8	42
9M-S12	9	12%	41	45.5	49
12M-S0	12	0%	41	45.3	45
12M-S4	12	4%	35	37	41.5
12M-S8	12	8%	34	40	37.7
12M-S12	12	12%	40.9	50	52
15M-S0	15	0%	45	52	42.7
15M-S4	15	4%	47.3	55	57
15M-S8	15	8%	39	55.6	57.9
15M-S12	15	12%	43.6	56	56.3

Sonuçlara göre, NaOH konsantrasyonu açısından 9M ve 15M karışımlar en iyi dayanımları göstermiştir. Optimum dayanım, 9M ve 15M molaritelerinin düşük silis dumanı oranlarıyla (özellikle %0 ve %8) elde edilmiştir. NaOH molaritesinin 14M'ye kadar arttığı durumda mühendislik dayanımlarında bir optimum nokta elde edilmiş, ancak daha yüksek molarite değerlerinde dayanımın azaldığı belirtilmiştir (Verma & Dev, 2020).

Genel olarak, sonuçlar incelendiğinde üretilen geopolimer beton numunelerinin zamanla basınç dayanımının arttığı gözlemlenmiştir. Yapılan çalışmada, sodyum hidroksit ve sodyum silikat çözeltileri kullanılarak üretilen geopolimer betonların dayanımları zamanla arttığı görülmüştür (Gunasekara ve diğ., 2016).

Şekil 4.1'de üretilen geopolimer beton numunelerinin 7, 28 ve 56 günlük basınç dayanımları grafikler halinde gösterilmiştir.



Şekil 4.1 : Üretilen geopolimer beton numunelerinin 7, 28 ve 56 günlük basınç dayanımları

Molarite ve silis dumanı oranının etkisi:

9M Konsantrasyonu: Silis dumanı oranı %0 olduğunda, 7 günlük dayanım en yüksek seviyededir (51.5 MPa), 28 ve 56 günlük dayanımlar sırasıyla 64 ve 60 MPa'dır. Silis dumanı %4 ve %8 oranlarında dayanımlar düşmekte, %12 oranında ise 7 günlük dayanım bir miktar artsa da genel olarak düşüş gözlemlenmektedir.

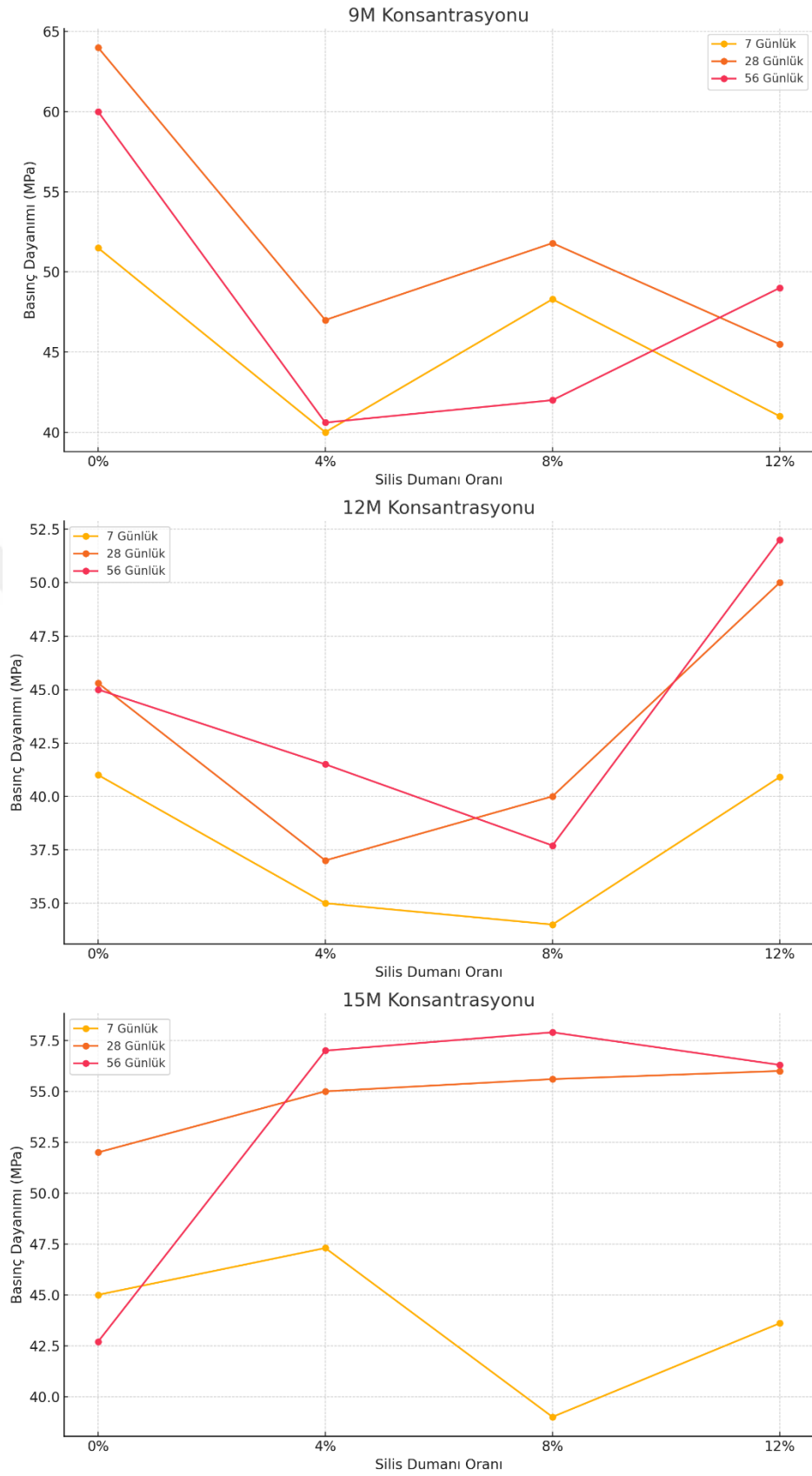
12M Konsantrasyonu: Silis dumanı %0 oranında iken, 7 günlük dayanım 41 MPa, 28 günlük dayanım 45.3 MPa ve 56 günlük dayanım 45 MPa'dır. Silis dumanı %4 ve %8 oranlarında dayanımlar düşmekte, %12 oranında ise 28 ve 56 günlük dayanımlarda artış görülmektedir.

15M Konsantrasyonu: Silis dumanı %0 oranında iken, 7 günlük dayanım 45 MPa, 28 günlük dayanım 52 MPa ve 56 günlük dayanım 42.7 MPa'dır. Silis dumanı %4 ve %8 oranlarında dayanımlar artmakta, %12 oranında ise tüm dayanımlar yüksek seviyelerde kalmaktadır.

Genel Eğilimler:

9M konsantrasyonu için en yüksek dayanım %0 silis dumanında gözlemlenmekte, artan silis dumanı oranı ile genel olarak dayanımlar düşmektedir. 12M konsantrasyonu için %12 silis dumanı oranında dayanımda genel bir artış görülmekte, diğer oranlarda dayanımlar düşük kalmaktadır. 15M konsantrasyonu için %4, %8 ve %12 silis dumanı oranlarında dayanımlar yüksek seviyelerde seyretmektedir.

Şekil 4.2'de Farklı NaOH konsantrasyonlarda ve farklı silis dumanı oranlarına göre 7, 28 ve 56 günlük basınç dayanımları grafikler halinde gösterilmiştir



Şekil 4.2 : Farklı NaOH konsantrasyonlarda ve farklı silis dumanı oranlarına göre 7, 28 ve 56 günlük basınç dayanımları

4.2. Lifli Geopolimer beton optimizasyonu

4.2.1. Basınç dayanımı

Lifli geopolimer betonların basınç dayanımı, yapısal uygulamalar için kritik bir parametre olduğu göz önünde bulundurup farklı çelik lif oranları ve NaOH molaritesi ile hazırlanan karışımların basınç dayanımı test edilmiştir.

Numuneler, su ortamında ve laboratuvar ortamında 7, 28 ve 56 günlük periyotlarda test edilmiştir. NaOH molaritesi 9 M sabit olarak SS/SH oranında kullanılmış ve çelik lif oranları %0.5, %1, ve %1.5 olarak belirlenmiştir. Şekil 4.3'te laboratuvar ve su ortamlarında bekletilen çelik lifli geopolimer beton karışımlarının bekleme süreleri açıklayıcı grafik halinde verilmiştir.

Su ortamında bekletilen numuneler, eğilme ve basınç dayanımına bakılmadan önce 24 saat bekletilmiştir. Tablo 4.3'te Çelik lifli geopolimer betonun basınç dayanımları verilmiştir.

- **7 Günlük Basınç Dayanımı**

7 günlük test sonuçlarına göre, çelik lif oranının artışıyla basınç dayanımı değerlerinde bir artış gözlemlenmiştir. K1F karışımında su ortamında 87.6 MPa, laboratuvar ortamında ise 50.2 MPa değerleri elde edilmiştir. K2F karışımı su ortamında 95.6 MPa, laboratuvar ortamında 56.9 MPa değerleri göstermiştir. En yüksek dayanım, K3F karışımında su ortamında 100.4 MPa, laboratuvar ortamında ise 59.5 MPa olarak ölçülmüştür. Yapılan çalışmalarda, çelik liflerin mikro çatlakları engelleyerek dayanımı artırdığı gözlenmiştir (Afroughsabet ve diğ., 2016).

- **28 Günlük Basınç Dayanımı**

28 günlük testlerde, en yüksek basınç dayanımı değerleri K3F karışımında gözlemlenmiştir. Su ortamında 124 MPa, laboratuvar ortamında ise 71.1 MPa basınç dayanımı elde edilmiştir. K1F karışımında su ortamında 102.2 MPa, laboratuvar ortamında 52 MPa; K2F karışımında ise su ortamında 107.5 MPa, laboratuvar ortamında 58.8 MPa dayanım değerleri elde

edilmiştir. Benzer şekilde, diğer araştırmalarda da yüksek çelik lif oranlarının basınç dayanımını artırdığı belirlenmiştir. (Wu ve diğ., 2016)

- **56 Günlük Basınç Dayanımı**

56 günlük testlerde, çelik lif oranının artışıyla birlikte su ortamında ve laboratuvar ortamında basınç dayanımı değerlerinde belirgin bir artış gözlemlenmiştir. K3F karışımı su ortamında 120 MPa, laboratuvar ortamında 56.7 MPa basınç dayanımı sergilemiştir. K1F karışımında su ortamında 100 MPa, laboratuvar ortamında 42.2 MPa; K2F karışımında ise su ortamında 123 MPa, laboratuvar ortamında 50.4 MPa dayanım değerleri elde edilmiştir. En yüksek basınç dayanımı, su ortamında K2F karışımında 123 MPa olarak kaydedilmiştir.

Çelik lif oranının artışı, basınç dayanımında belirgin bir artışa neden olmuştur. Bu durum, çelik liflerin beton içerisindeki mikro çatlakları engelleyerek dayanımı artırmasından kaynaklanmaktadır. (Afroughsabet ve diğ., 2016). Su ortamında test edilen numuneler, laboratuvar ortamına göre daha yüksek basınç dayanımı sergilemiştir. Bu da suyun beton hidrasyonunu teşvik etmesinden kaynaklanabilir. Su ortamında bekletilen çelik lifli numunelerin basınç dayanımının yüksek elde edilmiştir.

NaOH molaritesinin 9 M oranında optimum olduğu ve bu koşullar altında maksimum basınç dayanımının elde edildiği gözlemlenmiştir. Ancak, aşırı yüksek alkali değerlerinin geopolimerizasyon reaksiyonunu engelleyerek malzemenin dayanımını düşürdüğü görülmüştür. Şekil 4.4'te geopolimer betonun su (W) ve laboratuvar ortamında (L) 7, 28 ve 56 günlük basınç dayanımları grafikler halinde verilmiştir.

Yapılan araştırmada, aşırı yüksek alkali seviyelerinin geopolimerizasyon reaksiyonunu engelleyebileceği ve bu durumun malzemenin dayanımını azaltabileceği belirtilmektedir. Bu nedenle, çalışmada optimum alkali içeriğinin bulunması gerektiği vurgulanmaktadır; çünkü fazla miktarda alkali, geopolimerin yapısal bütünlüğünü olumsuz etkileyebilir (Asif ve diğ., 2014).

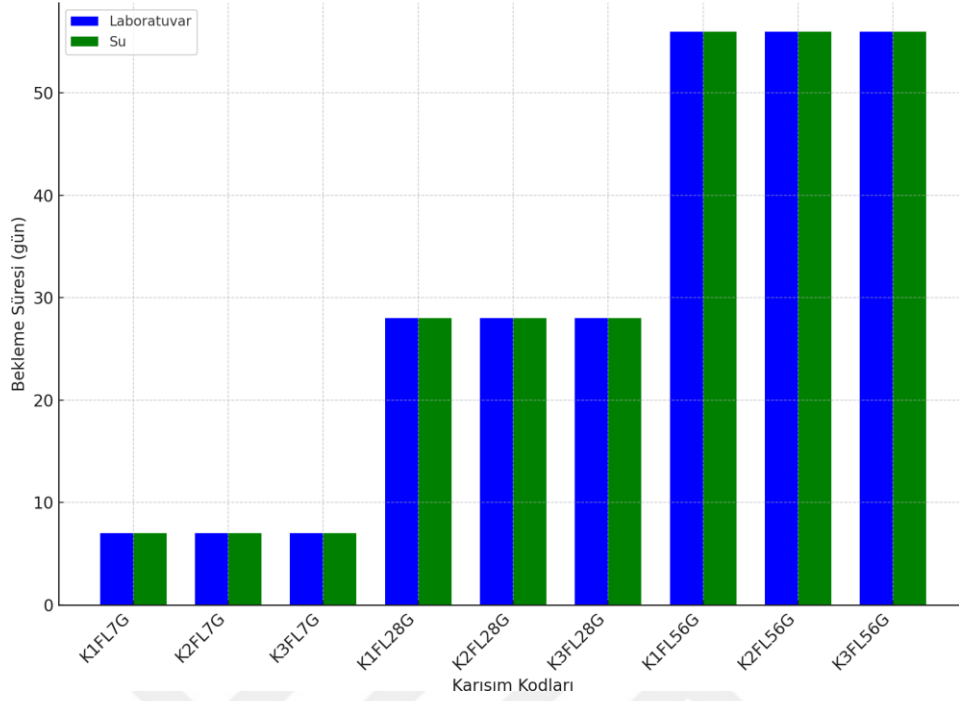
Bu çalışma, lifli geopolimer betonların basınç dayanımını optimize etmek için önemli veriler sunmakta ve yapısal uygulamalar için potansiyel faydalarını göstermektedir. Çelik lif

oranlarının ve NaOH molaritesinin doğru seçimi ile geopolimer betonların dayanımının artırılacağı görülmüştür.

Tablo 4.2’de çelik lifli geopolimer beton karışım kodları ayrıntılı bir şekilde verilmiştir.

Tablo 4.2 : Çelik lifli geopolimer beton karışım kodları

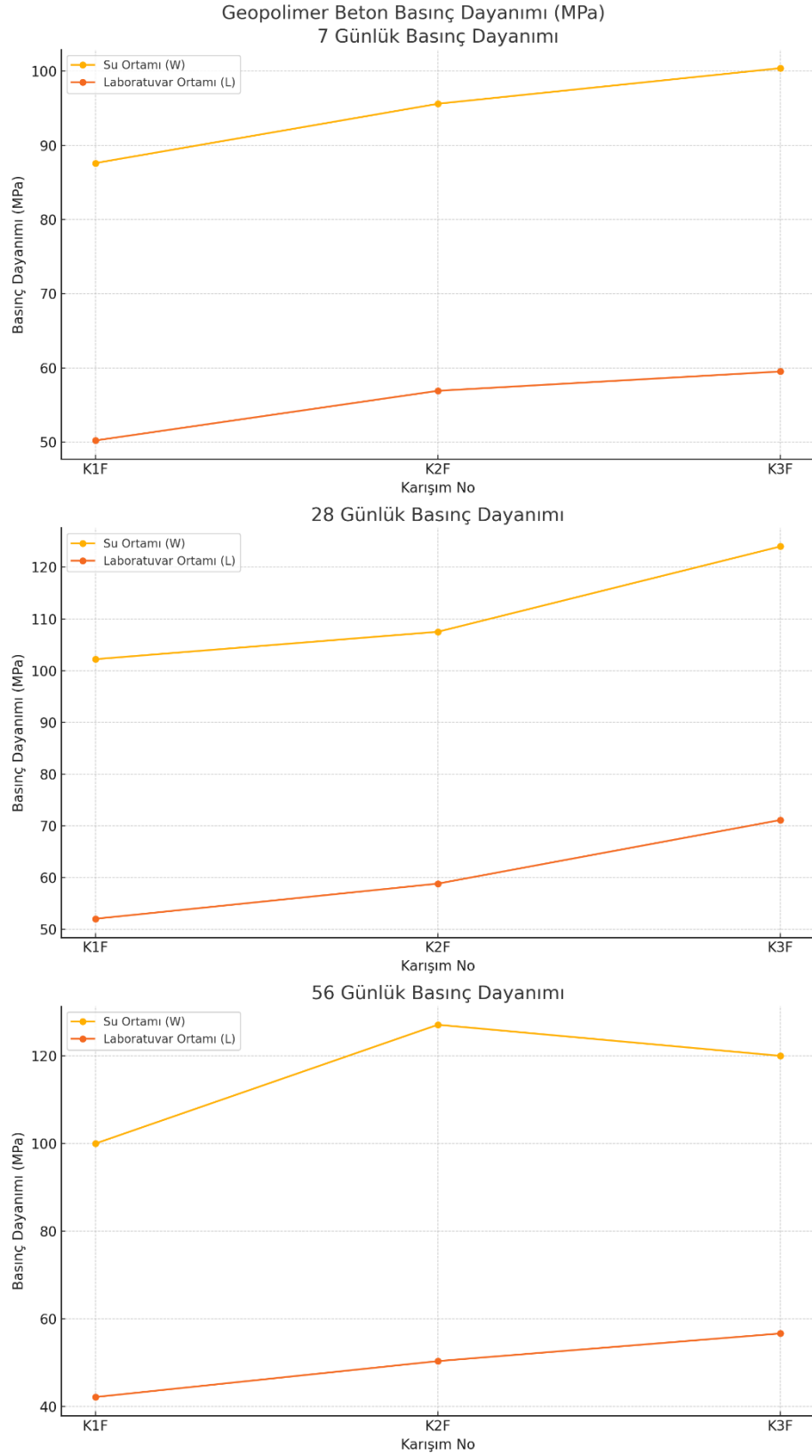
K1FL7G=Laboratuvar oratamında 7 gün olarak bekletilen 1 numaralı karışım	K1FW7G= Su oratamında 7 gün olarak bekletilen 1 numaralı karışım
K2FL7G= Laboratuvar oratamında 7 gün olarak bekletilen 2 numaralı karışım	K2FW7G=Su oratamında 7 gün olarak bekletilen 2 numaralı karışım
K3FL7G= Laboratuvar oratamında 7 gün olarak bekletilen 3 numaralı karışım	K3FW7G= Su oratamında 7 gün olarak bekletilen 3 numaralı karışım
K1FL28G= Laboratuvar oratamında 28 gün olarak bekletilen 1 numaralı karışım	K1FW28G= Su oratamında 28 gün olarak bekletilen 1 numaralı karışım
K2FL28G= Laboratuvar oratamında 28 gün olarak bekletilen 2 numaralı karışım	K2FW28G= Su oratamında 28 gün olarak bekletilen 2 numaralı karışım
K3FL28G= Laboratuvar oratamında 28 gün olarak bekletilen 3 numaralı karışım	K3FW28G= Su oratamında 28 gün olarak bekletilen 3 numaralı karışım
K1FL56G= Laboratuvar oratamında 56 gün olarak bekletilen 1 numaralı karışım	K1FW56G= Su oratamında 56 gün olarak bekletilen 1 numaralı karışım
K2FL56G= Laboratuvar oratamında 56 gün olarak bekletilen 2 numaralı karışım	K2FW56G= Su oratamında 56 gün olarak bekletilen 2 numaralı karışım
K3FL56G= Laboratuvar oratamında 56 gün olarak bekletilen 3 numaralı karışım	K3FW56G= Su oratamında 56 gün olarak bekletilen 3 numaralı karışım
K1F : Çelik lifli geopolimer betonun 1 numaralı karışımı	
K2F : Çelik lifli geopolimer betonun 2 numaralı karışımı	
K3F : Çelik lifli geopolimer betonun 3 numaralı karışımı	



Şekil 4.3 : Laboratuvar ve su ortamlarında bekletilen çelik lifli geopolimer beton karışımlarının bekleme süreleri

Tablo 4.3 : Çelik lifli geopolimer betonun basınç dayanımları

Karışım No	NaOH Molaritesi	Çelik Lif	7 Günlük Basınç Dayanımı (MPa)		28 Günlük Basınç Dayanımı (MPa)		56 Günlük Basınç Dayanımı (MPa)	
			Su Ortamı (W)	Laboratuvar Ortamı (L)	Su Ortamı (W)	Laboratuvar Ortamı (L)	Su Ortamı (W)	Laboratuvar Ortamı (L)
K1F	9	0.5%	87.6	50.2	102.2	52	100	42.2
K2F	9	1%	95.6	56.9	107.5	58.8	123	50.4
K3F	9	1.5%	100.4	59.5	124	71.1	120	56.7



Şekil 4.4 : Geopolimer betonun su (W) ve laboratuvar ortamında (L) 7, 28 ve 56 günlük basınç dayanımları

4.2.2. Eğilme Dayanımı

Çelik lifli geopolimer beton numunelerinin, su ve laboratuvar ortamlarında kürlenerek farklı lif oranlarında (%0.5, %1, %1.5) üç nokta eğilme testi ile eğilme dayanımları test edilmiştir. Çelik lifli geopolimer beton numuneleri, 7 gün gibi erken bir sürede yüksek dayanım kazanarak dikkat çekmiştir. Yapılan testler sonucunda, bu beton numunelerinin yüksek eğilme dayanımı göstermesinin yanı sıra sünek bir davranış sergilediği tespit edilmiştir.

Çelik liflerle güçlendirilmiş geopolimer betonların yapısal davranışları, yük ve orta açıklık yer değiştirmelerini içeren üç nokta eğilme yükleme sistemi altında incelenmiştir. Testlerden elde edilen eğri, çelik liflerle güçlendirilmiş geopolimer betonun maksimum yüke ulaştığını ve çatlama sonrası sünek bir davranış sergilediğini göstermektedir. Numunelerde, ilk çatlak oluşumu maksimum yüke ulaşmadan önce gözlemlenmiştir.

Aşağıdaki tablodaki veriler çelik lifli geopolimer beton numunelerinin farklı kürlenme koşulları altında çeşitli yaşlarda (7, 28, 56 günlük) eğilme dayanımlarını göstermektedir. Çeşitli lif oranlarına (0.5%, 1%, 1.5%) sahip üç karışımın (K1F, K2F, K3F) performansı verilmiştir.

Su ortamında kürlen numunelerin eğilme dayanımları, laboratuvar ortamında kürlenene göre daha yüksek olduğu görülmüştür. Lif oranı arttıkça, her iki ortamda da dayanım artışı gözlemlenmiştir.

28 günlük dayanımlarda da su ortamında kürlen numunelerin daha yüksek dayanım gösterdiği gözlemlenmektedir. K2F numunesi, bu yaşta en yüksek eğilme dayanımına sahiptir.

56 günlük dayanımlarda, su ortamında kürlen numunelerde çok daha belirgin bir dayanım artışı görülmektedir. Özellikle K3F numunesi, 13.88 MPa ile en yüksek değeri göstermektedir. Laboratuvar ortamında kürlen numuneler daha düşük dayanım sergilemektedir. Tablo 4.4'te çelik lifli geopolimer betonun eğilme dayanımları ayrıntılı bir şekilde verilmiştir.

Tablo 4.4 : Çelik lifli geopolimer betonun eğilme dayanımları

Karışım No	NaOH Molaritesi	Çelik Lif	7 Günlük Eğilme Dayanımı (MPa)		28 Günlük Eğilme Dayanımı (MPa)		56 Günlük Eğilme Dayanımı (MPa)	
			Su Ortamı (W)	Laboratuvar Ortamı (L)	Su Ortamı (W)	Laboratuvar Ortamı (L)	Su Ortamı (W)	Laboratuvar Ortamı (L)
K1F	9	0.5%	5.52	3.61	5.56	3	7.62	3
K2F	9	1%	6.69	5.46	8.97	5.48	9.69	4.3
K3F	9	1.5%	7.57	5.83	7.94	4.67	13.88	4.92

Genel Değerlendirmeler:

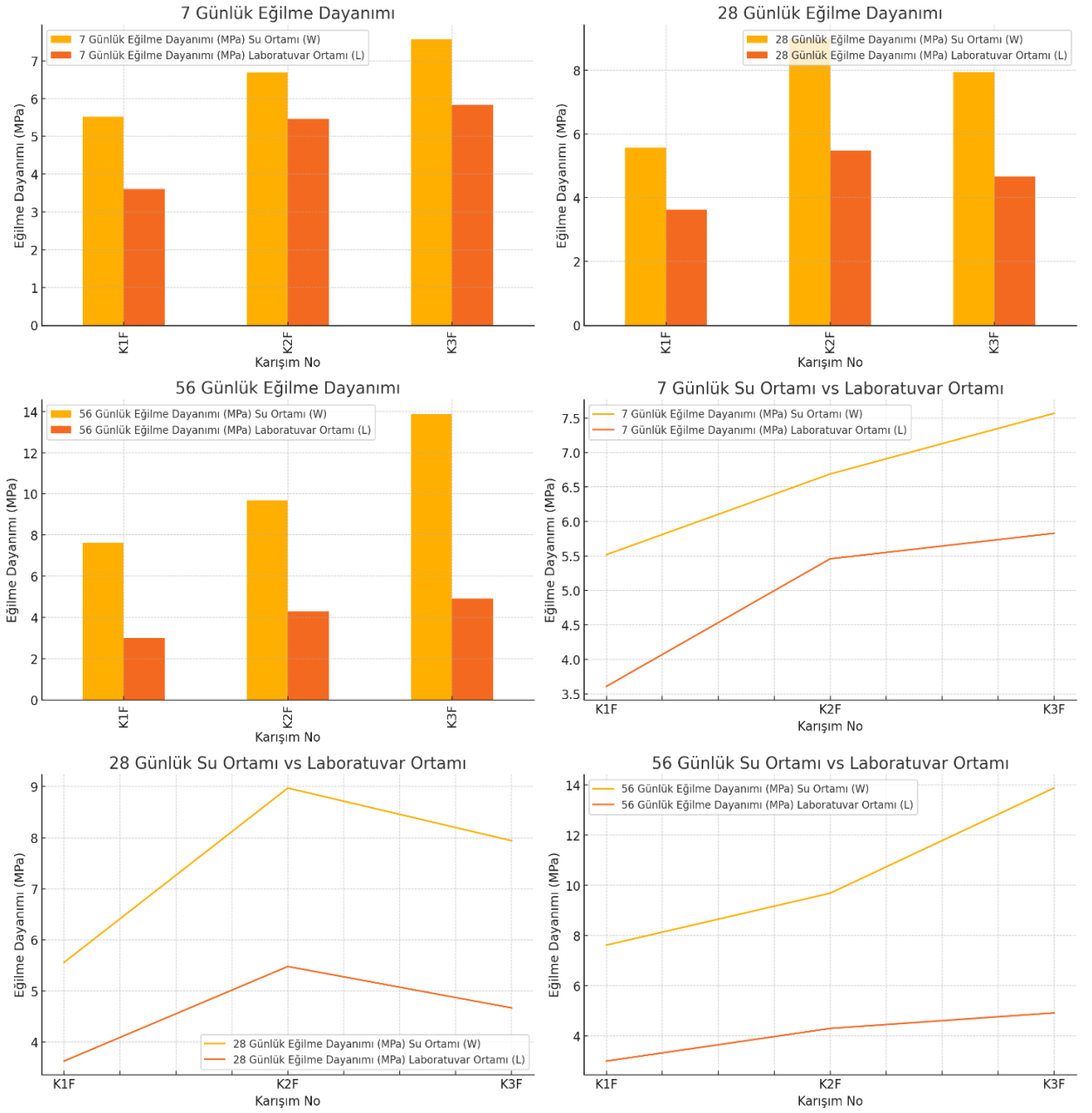
1. Lif oranı artışının etkisi: Lif oranı arttıkça tüm yaşlarda ve kürlenme ortamlarında eğilme dayanımı artmaktadır. Bu, çelik liflerin betonun mekanik dayanımına olan olumlu etkisini göstermektedir.

2. Kürlenme ortamının etkisi: Su ortamında kürlenlen numuneler, laboratuvar ortamında kürlenlenlere göre daha yüksek dayanım göstermektedir. Bu, su ortamının betondaki hidratasyon sürecini daha iyi desteklediğini göstermektedir.

3. Yaşın etkisi: Beton numunelerinin yaşlandıkça (7 günden 56 güne) dayanımlarının arttığı gözlemlenmektedir. En belirgin artış, su ortamında kürlenlen numunelerde görülmektedir.

4. Sünek davranış: Sağlanan ek bilgilerden hareketle, çelik lifli geopolimer beton numunelerinin çatlama sonrası sünek davranış sergilediği ve yük taşıma kapasitesinin devam ettiği anlaşılmaktadır. Bu da betonun uygulamada daha güvenli ve dayanıklı olmasını sağlamaktadır.

Şekil 4.5'te çelik lifli geopolimer beton numunelerinin farklı lif oranları ve kürlenme ortamlarında 7, 28 ve 56 günlük eğilme dayanımları grafikler halinde verilmiştir.



Şekil 4.5 : Çelik lifli geopolimer beton numunelerinin farklı lif oranları ve kürleme ortamlarında 7, 28 ve 56 günlük eğilme dayanımları

- **7 Günlük eğilme dayanımı:** Lif oranı arttıkça, su ortamında kürlenen numunelerin dayanımı önemli ölçüde artarken, laboratuvar ortamında kürlenen numunelerde de artış gözlenmektedir ancak su ortamındaki kadar belirgin değildir.

- **28 Günlük eğilme dayanımı:** Su ortamında kürlen numuneler yine daha yüksek dayanım sergilemekte, özellikle K2F numunesi bu yaşta en yüksek değere ulaşmaktadır. Laboratuvar ortamında kürlen numunelerde ise dayanım artışı daha sınırlı kalmaktadır.
- **56 Günlük eğilme dayanımı:** En belirgin artış bu yaşta görülmektedir. K3F numunesi, su ortamında kürlendiğinde en yüksek dayanımı göstermektedir. Laboratuvar ortamında kürlen numunelerde de artış gözlemlense de, su ortamındaki kadar yüksek değildir.
- **7 Günlük ve 28 günlük su ortamı vs laboratuvar ortamı:** Su ortamının laboratuvar ortamına göre daha yüksek dayanım sağladığı net bir şekilde gözlemlenmektedir.
- **56 Günlük su ortamı vs laboratuvar ortamı:** Bu yaşta da su ortamının belirgin üstünlüğü devam etmektedir ve özellikle K3F numunesi en yüksek değeri göstermektedir.

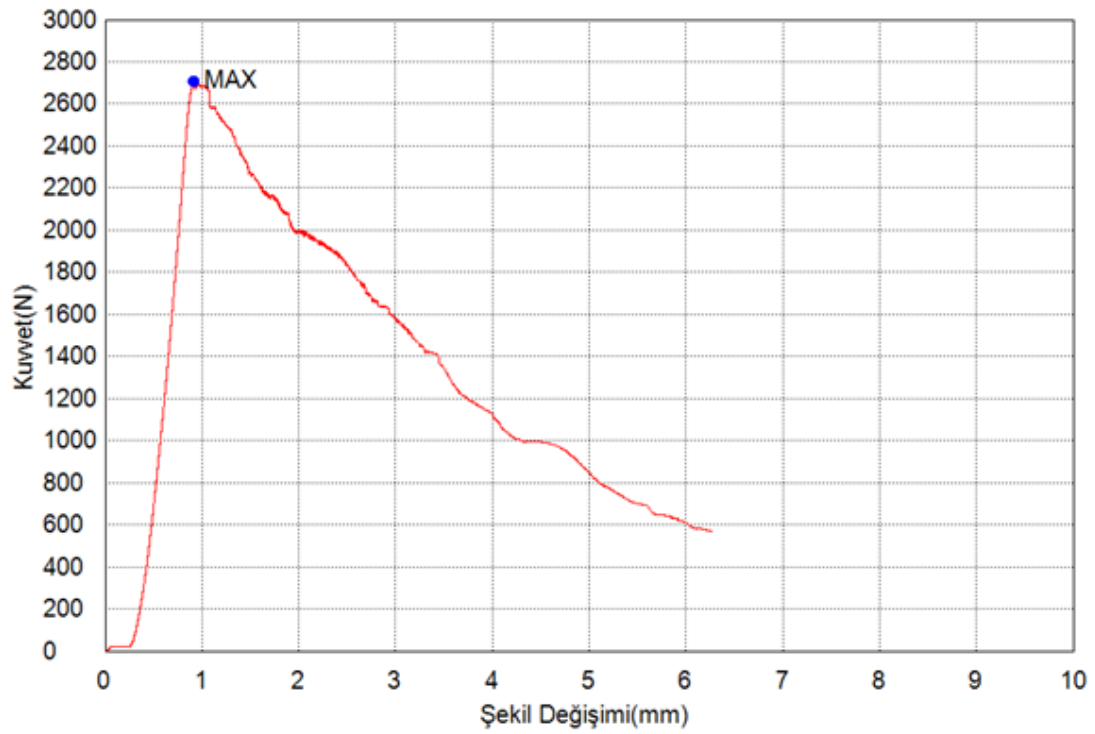
Çelik lifli geopolimer betonlar, özellikle su ortamında kürlendiğinde, erken yaşta yüksek dayanım kazanmakta ve lif oranının artışıyla birlikte eğilme dayanımında belirgin artışlar göstermektedir. Bu tür betonların inşaat sektöründe kullanım potansiyeli yüksek olup, sünek davranışları sayesinde uzun vadede dayanıklılık sağlamaktadır.

Şekil 4.6’de K1FW56G, Şekil 4.7’de K2FW56G ve Şekil 7.8’de K3FW56G geopolimer numunelerinin üç nokta eğilme dayanım testi grafikleri gösterilmiştir.

Anahtar Kelime		Ürün Adı	
Test Dosyası Adı	K1FW56G	Metot Dosya Adı	taha.xmas
Rapor Tarihi	11.01.2023	Test Tarihi	10.12.2022
Test Modu	Tek	Test Tipi	3 Nokta Eğme
Hız	0,5mm/min	Şekil	Plaka
Grup Sayısı:	1	Alt Grup Sayısı:	1

İsim	Max_Kuvvet	Max_Gerilme	Max_Uzama	Kopma_Kuvvet
Parametreler	Tüm Alan Hesaplaması	Tüm Alan Hesaplaması	Tüm Alan Hesaplaması	Hassasiyet: 10
Birim	N	N/mm2	mm	N
1_1	2708,42	7,61743	0,92000	.-

İsim	Kopma_Gerilme	Kopma_Uzama	Kopma_Yüzde Uzama
Parametreler	Hassasiyet: 10	Hassasiyet: 10	Hassasiyet: 10
Birim	N/mm2	mm	%
1_1	.-	.-	.-

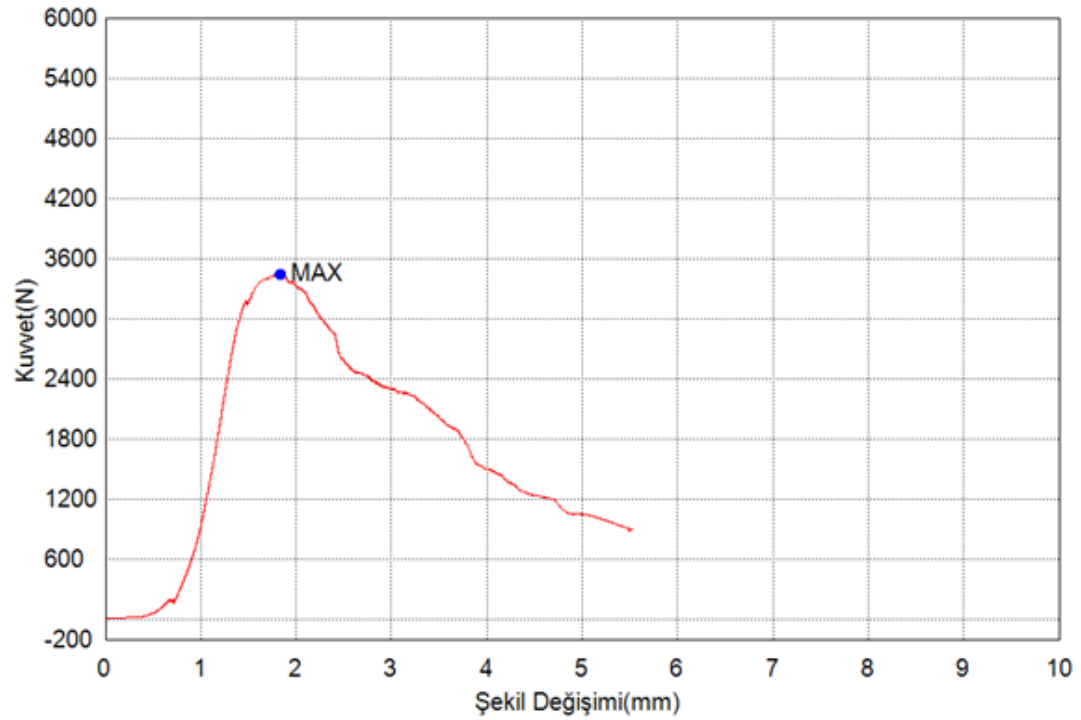


Şekil 4.6 : K1FW56G geoplimer numunesinin üç nokta eğilme dayanım testi

Anahtar Kelime		Ürün Adı	
Test Dosyası Adı	K2FW56G	Metot Dosya Adı	taha.xmas
Rapor Tarihi	11.01.2023	Test Tarihi	10.12.2022
Test Modu	Tek	Test Tipi	3 Nokta Eğme
Hız	0,5mm/min	Şekil	Plaka
Grup Sayısı:	1	Alt Grup Sayısı:	1

İsim	Max_Kuvvet	Max_Gerilme	Max_Uzama	Kopma_Kuvvet
Parametreler	Tüm Alan Hesaplaması	Tüm Alan Hesaplaması	Tüm Alan Hesaplaması	Hassasiyet: 10
Birim	N	N/mm2	mm	N
1_1	3445,27	9,68982	1,83917	-.-

İsim	Kopma_Gerilme	Kopma_Uzama	Kopma_Yüzde Uzama
Parametreler	Hassasiyet: 10	Hassasiyet: 10	Hassasiyet: 10
Birim	N/mm2	mm	%
1_1	-.-	-.-	-.-

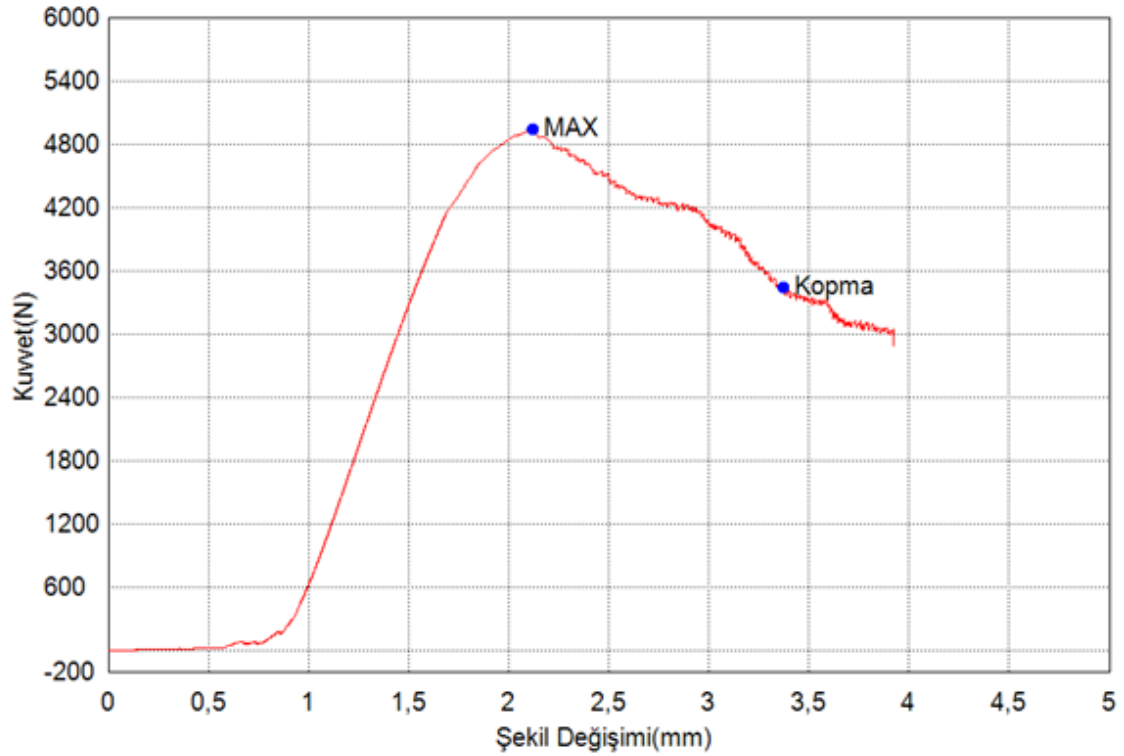


Şekil 4.7 : K2FW56G geoplimer numunesinin üç nokta eğilme dayanım testi

Anahtar Kelime		Ürün Adı	
Test Dosyası Adı	.K3FW56G	Metot Dosya Adı	taha.xmas
Rapor Tarihi	11.01.2023	Test Tarihi	10.12.2022
Test Modu	Tek	Test Tipi	3 Nokta Eğme
Hız	0,5mm/min	Şekil	Plaka
Grup Sayısı:	1	Alt Grup Sayısı:	1

İsim	Max_Kuvvet	Max_Gerilme	Max_Uzama	Kopma_Kuvvet
Parametreler	Tüm Alan Hesaplaması	Tüm Alan Hesaplaması	Tüm Alan Hesaplaması	Hassasiyet: 10
Birim	N	N/mm2	mm	N
1 _ 1	4936,17	13,8830	2,12077	3435,63

İsim	Kopma_Gerilme	Kopma_Uzama	Kopma_Yüzde Uzama
Parametreler	Hassasiyet: 10	Hassasiyet: 10	Hassasiyet: 10
Birim	N/mm2	mm	%
1 _ 1	9,66270	3,37527	5,62544



Şekil 4.8 : K3FW56G geoplimer numunesinin üç nokta eğilme dayanım testi

4.2.3 Mikroyapı analizi

Tarama Elektron Mikroskobu (SEM) analizi yardımıyla farklı oranlarda çelik lifler eklenerek üretilen geopolimer betonların mikroyapıları üzerindeki etkileri belirlenmiştir. Bu farklı alkali aktivatörlerin geopolimer betonların mikroyapıları üzerindeki etkisi, şekillerle desteklenerek detaylandırılmıştır.

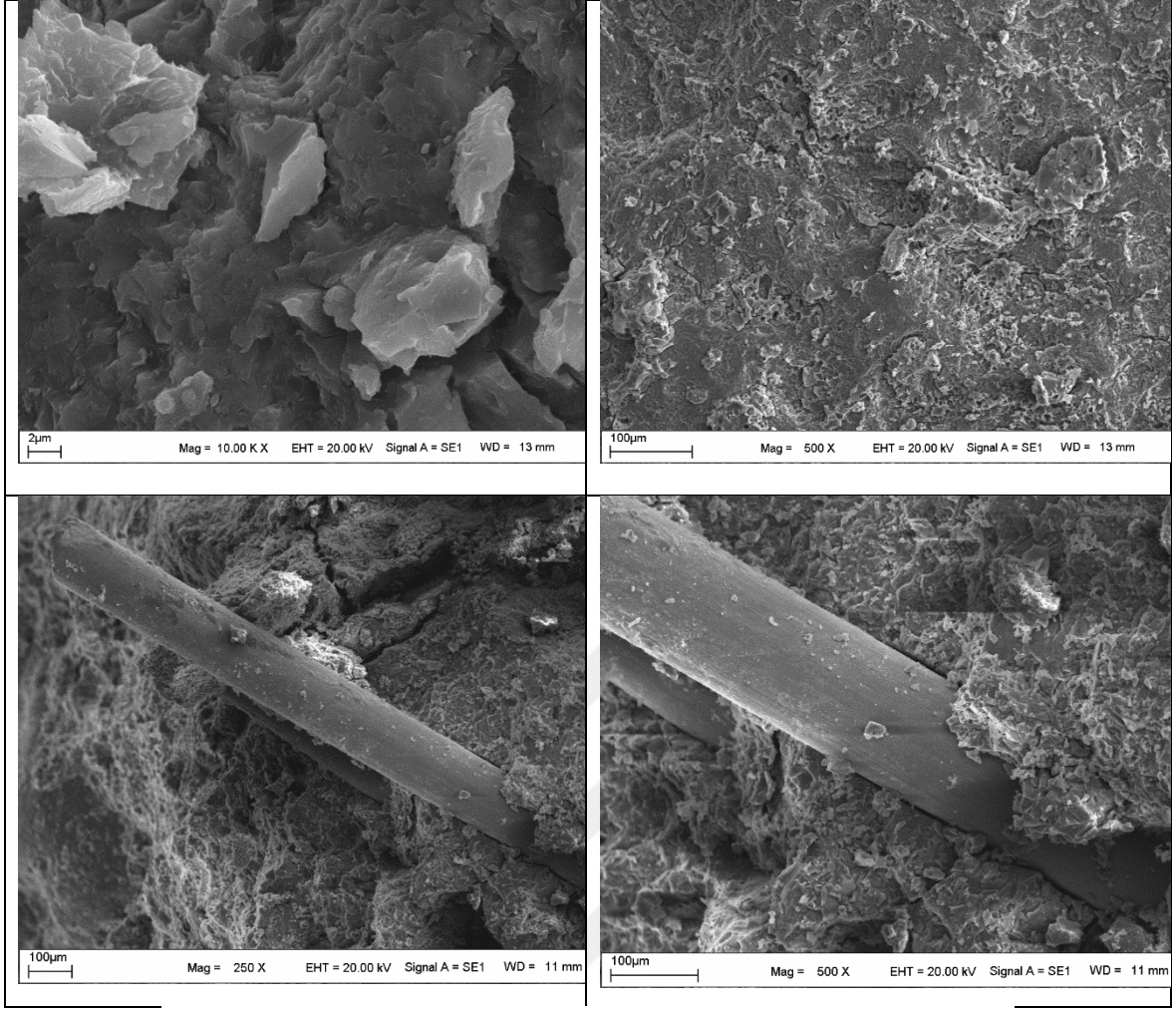
4.2.3.1 SEM analizlerinin bulguları

Geopolimer betonlarda çelik lif kullanımı, mikroyapıda yoğun bir yapı oluşmasına katkı sağlamaktadır. Liflerin bağlayıcı maddelerle kompakt bir yapı oluşturduğu gözlemlenmiştir. Maksimum basınç dayanımı elde edilen örneklerde (K3F) çelik lif katkısının yoğun bir faz yapısı oluşturmadaki etkinliği, SEM analizleriyle açıkça görülmüştür. Bu durum, geopolimer betonların daha yoğun ve sağlam bir yapı kazanmasına katkıda bulunmaktadır.

SEM görüntüleri, geopolimer betonların yüzey özelliklerini ve mikroyapısını ayrıntılı bir şekilde ortaya koymaktadır. Yüksek büyütme oranlarıyla çekilen görüntüler, malzemenin mikroyapısındaki parçacıkların morfolojisini detaylı bir şekilde gösterirken, düşük büyütme oranlarıyla çekilen görüntüler ise lif benzeri yapıların ve bu yapıların matriks malzeme ile etkileşimini ortaya koymaktadır.

Çelik lif kullanımı, geopolimer betonların mikroyapılarında yoğun faz oluşumuna olanak tanıyarak agrega ile yapışma açısından olumlu bir özellik göstermektedir. Bu, betonun mekanik özelliklerinin iyileşmesine katkıda bulunmaktadır.

Aşağıdaki belirtilen SEM görüntüleri, bu bulguların görsel olarak desteklenmesi ve daha iyi anlaşılması için önemli bir araç olarak kullanılmaktadır. Bu sayede, geopolimer betonların mikroyapısal özellikleri ve performansları hakkında daha kapsamlı ve detaylı bir anlayış geliştirilmiştir. Şekil 4.9'da çelik lif takviyeli geopolimer betonun SEM görüntüleri gösterilmiştir.



Şekil 4.9 : Çelik lif takviyeli geopolimer betonun SEM görüntüleri

4.3. Geopolimer Betonlarda Durabilite

4.3.1. Basınç dayanım değişimi

Çelik lifli geopolimer beton numuneleri sülfat ortamında 6 hafta bekletilmiş ve basınç dayanımlarındaki değişimler incelenmiştir. Sonuçlar tablo 4.5.'te sunulmuştur.

Tablo 4.5 : Sülfat ortamında bekletilen çelik lifli geopolimer betonunun basınç dayanımı ve ağırlık değişimi

Karışım No	Önceki Ağırlık (g)	Sonraki Ağırlık (g)	Ağırlık farkı (g)	Önceki Basınç Dayanımı (MPa)	Sonraki Basınç Dayanımı (MPa)	Basınç Dayanımı Farkı (MPa)
K1F	308	314	+6	102.2	91.3	-10
	269	274	+5			
	280	285.3	+5.3			
K2F	330	335	+5	107.5	101.5	-6
	255	259	+4			
	294	298.5	+4.5			
K3F	330	338	+8	116.2	135	18,8
	268	275	+7			
	302	309.6	+7.6			

K1F Karışımı: Başlangıçta 102.2 MPa olan basınç dayanımı, sülfat etkisi sonrasında 91.3 MPa'ya düşerek yaklaşık %10 oranında azalmıştır.

K2F Karışımı: Başlangıç basınç dayanımı 107.5 MPa olan numunenin dayanımı 101.5 MPa'ya düşmüş, bu da %6'lık bir azalmayı göstermektedir.

K3F Karışımı: Bu karışımda ise başlangıçta 116.2 MPa olan basınç dayanımı, sülfat etkisi sonrasında 135 MPa'ya çıkarak %16'lık bir artış göstermiştir.

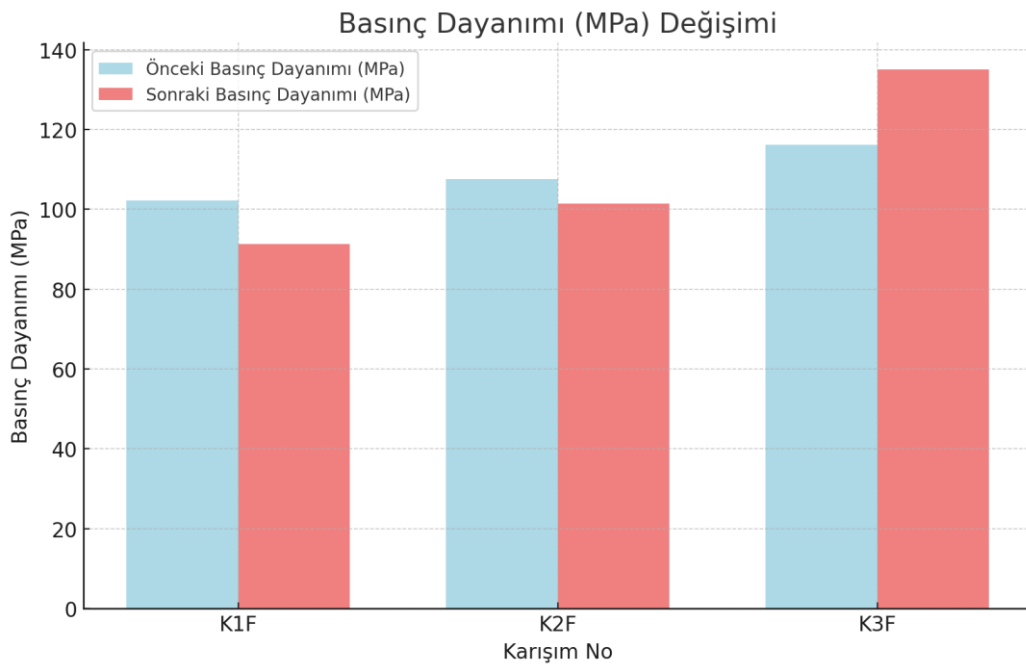
Bu sonuçlar, K1F ve K2F numunelerinin sülfat ortamında dayanımlarının azaldığını ancak K3F numunesinin dayanımının arttığını göstermektedir. K3F numunesinde daha yüksek çelik katkı oranı, sülfat ortamına karşı dayanıklılığı artırmıştır.

Geopolimer beton numunelerinde sülfat ortamında bekletildikten sonra K1F ve K2F karışımlarında dayanım kayıpları gözlenmiştir. Bu durum, sülfat iyonlarının beton içerisindeki kimyasal reaksiyonlar sonucu yapısal zayıflamalara neden olduğunu göstermektedir. K3F karışımında ise çelik lif oranının yüksek olması, betonun sülfat

ortamına karşı dayanıklılığını artırmış ve basınç dayanımını yükseltmiştir. Çelik lifler, betonun iç yapısındaki boşlukları doldurarak dayanımı artırmaktadır.

Yapılan çalışma sonucunda özellikle yüksek fırın cürufu ve uçucu kül kullanılarak üretilen geopolimer betonun sülfat hücumuna karşı iyi direnç gösterdiği görülmüştür. Geopolimer beton normal portland çimentolu betona nazaran sülfat hücumuna karşı daha iyi direnç gösterdiği ortaya konulmuştur (İsmail ve diğ., 2013).

Şekil 4.10'da sülfat etkisi ile çelik lifli geopolimer betonun basınç dayanımı değişimi grafik halinde verilmiştir.



Şekil 4.10 : Sülfat etkisi ile çelik lifli geopolimer betonun basınç dayanımı değişimi

4.3.2. Ağırlık Değişimi

Sülfat ortamında bekletilen numunelerin ağırlık değişimleri de incelenmiştir.

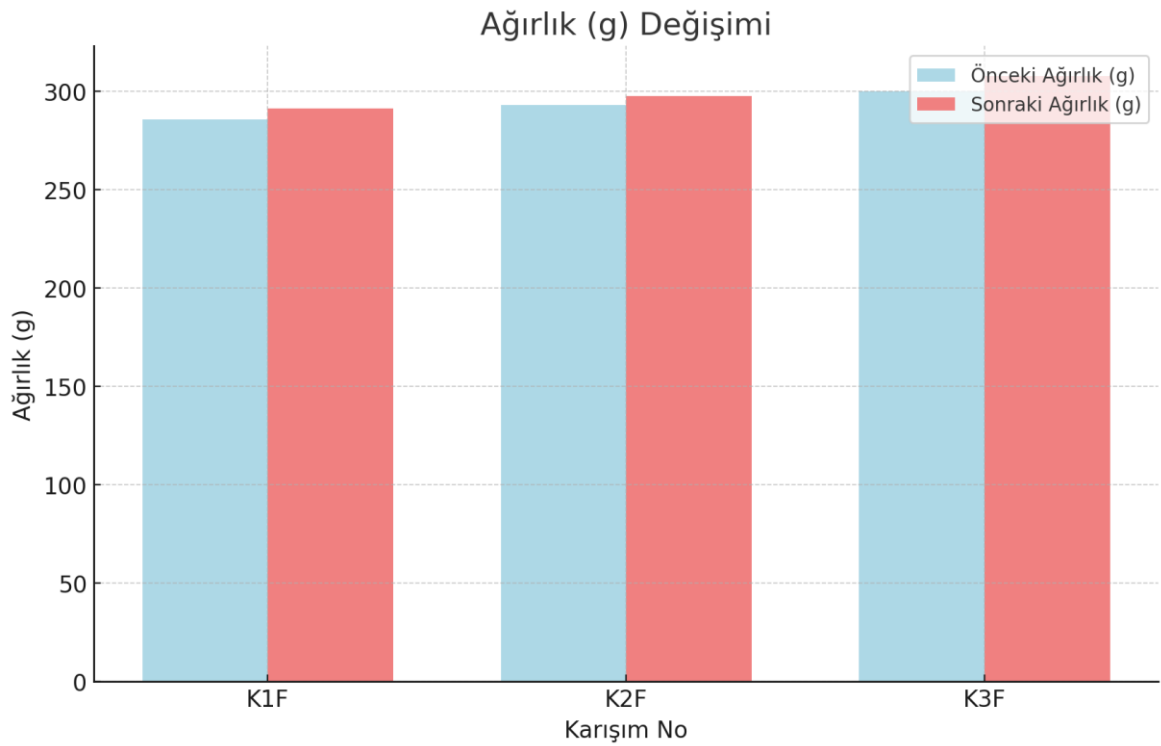
- **K1F Karışımı:** Numunelerin ağırlıkları ortalama olarak 5-6 gram artmıştır.
- **K2F Karışımı:** Ağırlık artışları 4-5 gram civarında gerçekleşmiştir.
- **K3F Karışımı:** Bu numunelerdeki ağırlık artışı 7-8 gram seviyesinde olmuştur.

Genel olarak, tüm numunelerde sülfat etkisi nedeniyle ağırlık artışı gözlenmiştir. Bu artış, beton yüzeylerindeki boşlukların sülfat etkisiyle dolması sonucu oluştuğu tahmin edilebilir.

Özcan ve Karakoç 2019'in gerçekleştirdikleri çalışmanın neticesinde üretilen geopolimer betonun sülfat çözeltisine maruz kaldığında genleşme ve ağırlık değişimlerin olduğu belirlenmiştir.

Bu sonuçlar ışığında, geopolimer betonların özellikle çelik lif katkılı olanlarının sülfat ortamlarına karşı yüksek dayanım gösterdiği ve ağırlık artışlarının minimal düzeyde kaldığı söylenebilir.

Şekil 4.11'de sülfat etkisi ile çelik lifli geopolimer betonun ağırlık değişimi grafik halinde verilmiştir.



Şekil 4.11 : Sülfat etkisi ile çelik lifli geopolimer betonun ağırlık değişimi

4.4. Beton Boru Testleri

4.4.1. Yük- Deplasman

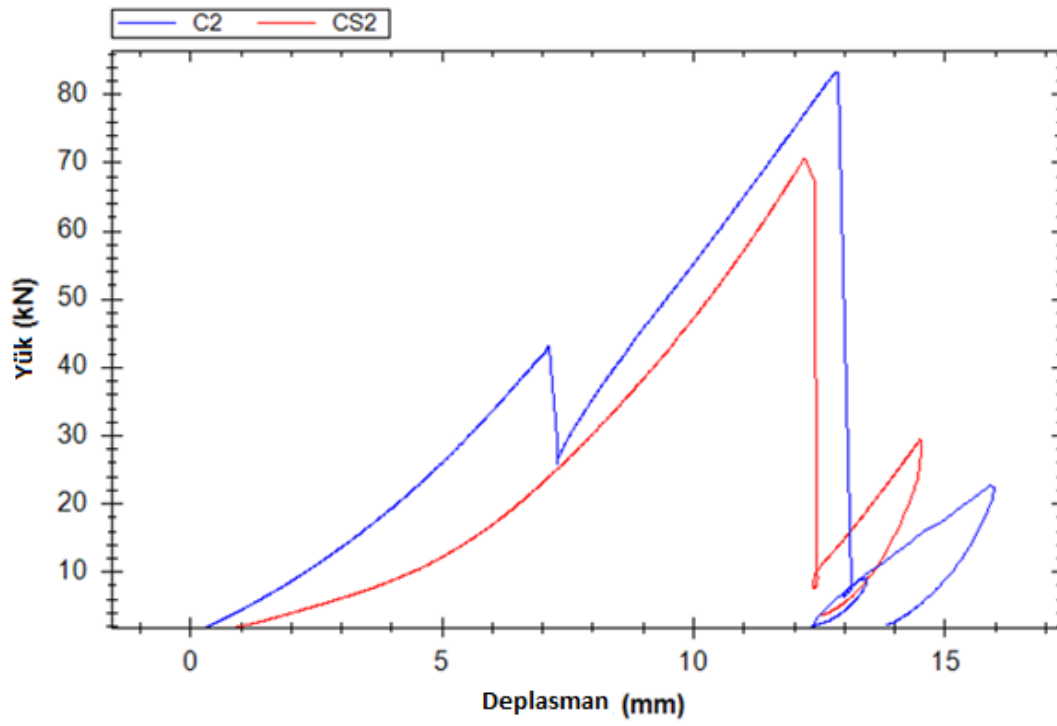
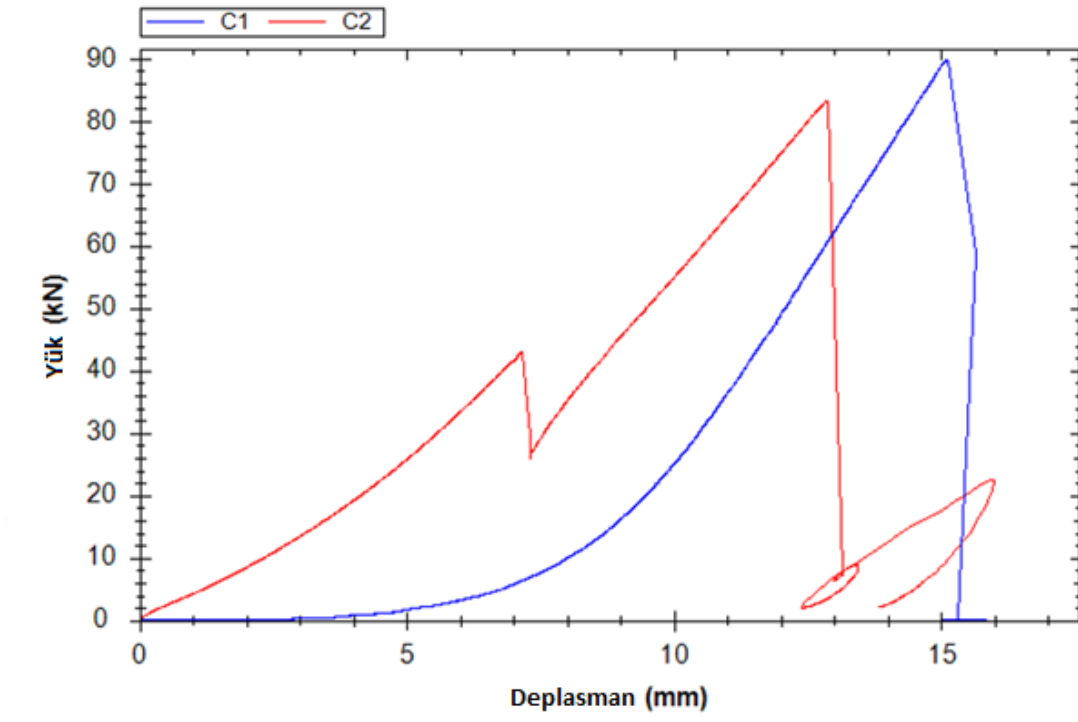
Yapılan deneysel çalışmalar kapsamında, geopolimer beton borular ile Portland çimentolu beton boruların yük-deplasman davranışları karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada, geopolimer beton borular %1 çelik lif katkısı ile üretilmiş, Portland çimentolu beton borular ise altyapı projelerinde yaygın olarak kullanılan türde üretilmiştir. Üretilen beton borular basınç dayanım testlerine tabi tutulmuş ve yük-deplasman eğrileri elde edilmiştir.

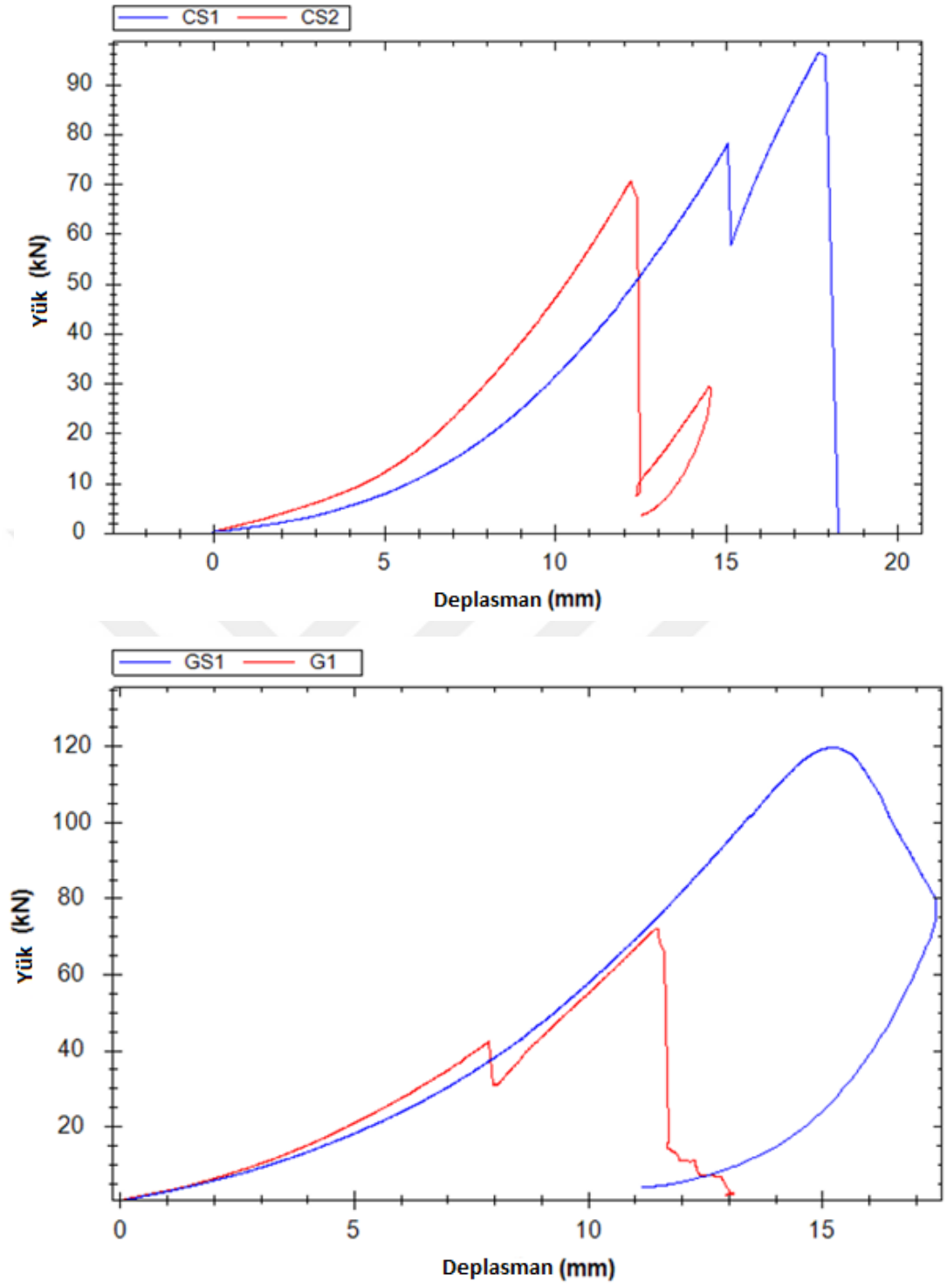
GS1 geopolimer beton borusu, Portland çimentolu CS2 beton borusuna kıyasla yaklaşık %30 daha yüksek dayanım sergilemiştir. GS1 numunesi, G1 numunesine göre daha yüksek yüklerde kırılma göstermiş ve daha büyük bir deformasyon geçirmiştir.

Geopolimer beton boruların (G1 ve GS1) Portland çimentolu borulara (C2 ve CS2) kıyasla daha yüksek bir dayanım gösterdiği ve daha büyük bir deplasman yaptığı görülmektedir. Bu durum, geopolimer beton boruların daha dayanıklı ve esnek olduğunu göstermektedir. Özellikle GS1 numunesi, G1'e göre daha yüksek yüklerde kırılma göstermiş ve daha büyük bir deformasyon geçirmiştir. GS1 numunesi, yaklaşık 120 kN kuvvet ve 16 mm deplasman ile yüksek süneklik sergilemiştir. Bu sonuçlar, lifli geopolimer betonun yüksek dayanım ve deformasyon yeteneğini ortaya koymaktadır.

GS1 geopolimer beton borusu, Portland çimentolu CS2 beton borusuna kıyasla yaklaşık %30 daha yüksek dayanım sergilemiştir. Bu durum, geopolimer beton boruların, Portland çimentolu beton borulara göre üstün performans gösterdiğini ve daha yüksek dayanım kapasitesine sahip olduğunu göstermektedir.

Gerçekleştirilen testler, geopolimer beton boruların Portland çimentolu beton borulara kıyasla daha yüksek dayanım ve süneklik özelliklerine sahip olduğunu göstermektedir. Özellikle GS1 numunesi, çelik lif katkısı ile üstün mekanik özellikler sergilemiştir. Geopolimer betonun bu yüksek dayanım özellikleri, sürdürülebilir altyapı projelerinde kullanımı için güçlü bir alternatif sunmaktadır. Şekil 4.12'de test cihazından elde edilen beton boruların yük-deplasman eğrileri verilmiştir.





Şekil 4.12 : Beton boruların yük-deplasman eğirileri

4.4.2. Geopolimer beton borularda hasar biçimleri

Yapılan testler kapsamında, geopolimer beton borular ile Portland çimentolu beton boruların yük taşıma kapasitesi ve hasar biçimleri incelenmiştir. Bu çalışmalar beton boruların altyapı projelerinde performanslarını değerlendirmek ve dayanıklılıklarını artırmak amacıyla gerçekleştirilmiştir. Geopolimer beton boruların hasar davranışları özellikle çelik lif katkısıyla güçlendirilmiş numuneler için dikkat çekici farklılıklar göstermiştir.

- **Portland çimentolu beton borulardaki hasar biçimleri:**

Portland çimentolu beton borular, ilk çökmelerinde ani kırılmalar sergileyerek gevrek bir davranış göstermiştir. Bu durum boruların ani yük artışlarına karşı hassas olduğunu ve kırılmaların hızla gerçekleştiğini göstermektedir. Özellikle CS2 numunesinde, 46.1 kN yük altında ilk çatlaklar oluşmuş ve yük arttıkça boru 72.3 kN yükte tamamen çökmüştür. Yüzeye yakın beton boru kesitlerinde kesme çatlakları meydana gelmiştir.

- **Geopolimer beton borulardaki hasar biçimleri:**

Geopolimer beton borular, çelik lif katkısıyla güçlendirilmiş numuneler (GS1) özellikle yüksek dayanım ve sünek kırılma özellikleri göstermiştir (Şekil 4.13). Bu özellikler betonun dağılmasını önlemiş ve altyapı projelerinde uzun ömürlü boruların üretilmesine olanak sağlamıştır. GS1 numunesinin hasar biçiminde, artırılmış yük kapasitesi ve çelik liflerin enerji soğurma katkısı sayesinde küçük çatlaklar oluşmuştur.

Yapılan çalışma ve testler neticesinde çelik lif eklenmesinin etkileri aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

1-Yük kapasitesi artışı: Çelik lifler betonun yük taşıma kapasitesini artırarak daha yüksek dayanımların elde edilmesini sağlamıştır. Yapılan çalışmada, çelik liflerin eklenmesi betonun basınç, çekme ve eğilme dayanımlarını önemli ölçüde artırdığı görülmüştür (Abbass ve diğ., 2018).

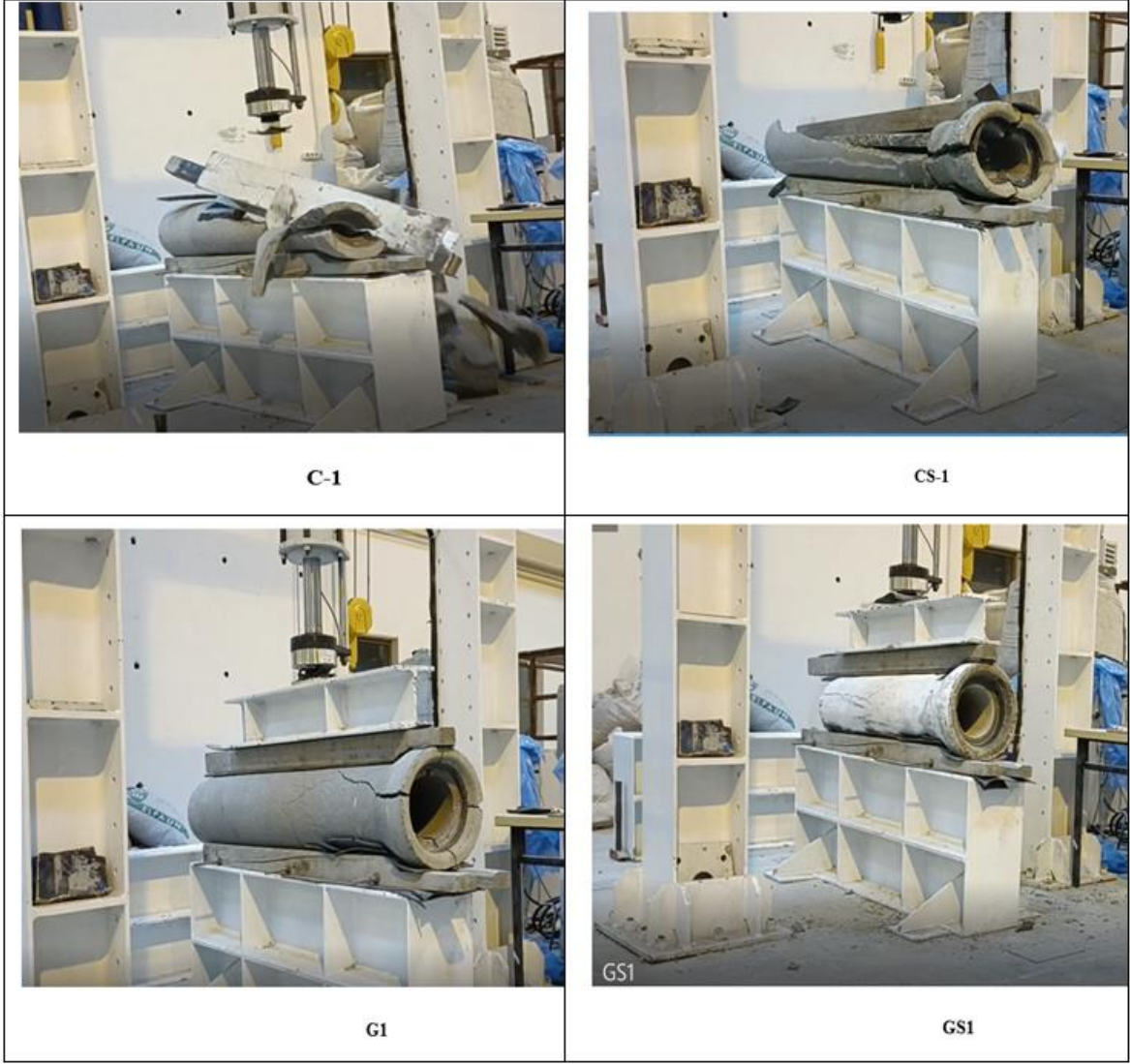
2-Enerji soğurma ve süneklik: Çelik lifler betonun sünekliğini artırarak enerji soğurma kapasitesini yükseltmiştir. Bu durum, ani yük artışlarına karşı betonun daha dirençli olmasını sağlamıştır. Yapılan çalışmada çelik lifler betonun performansını, dayanıklılığını ve sünekliğini önemli ölçüde iyileştirdiği ortaya konulmuştur (Sumathi ve Mohan, 2018).

3-Kesme dayanımı: Çelik liflerin katkısı, betonun kesme dayanımını artırmış ve çatlak oluşumunu minimize etmiştir. Yapılan çalışmada çelik lif içeren betonun çatlak oluşumunu önlediği ve kesme dayanımını belirgin bir şekilde artırdığı tespit edilmiştir (Torres ve Lantsoght, 2019).

Deneysel çalışmalar, geopolimer beton boruların Portland çimentolu beton borulara kıyasla daha üstün mekanik özellikler sergilediğini ve altyapı projelerinde kullanılabilirliğinin yüksek olduğunu göstermektedir. Özellikle çelik lif katkısıyla güçlendirilmiş geopolimer beton borular, yüksek dayanım, süneklik ve enerji soğurma kapasitesi ile dikkat çekmektedir.

Sonuç olarak geopolimer beton boruların hasar biçimleri, çelik lif katkısının etkisiyle önemli ölçüde iyileştirilmiştir. Bu borular Portland çimentolu beton borulara göre daha dayanıklı ve uzun ömürlü olup, altyapı projelerinde sürdürülebilir bir alternatif olarak değerlendirilebilir. Çelik lif katkısı, betonun yük taşıma kapasitesini ve enerji soğurma yeteneğini artırarak, hasar biçimlerini daha yönetilebilir hale getirmiştir.

Şekil 4.13'te beton boruların kırılma sonrası hasar biçimi ve çatlak görünümü verilmiştir.



Şekil 4.13 : Beton boruların kırılma sonrası hasar biçimi ve çatlak görünümü

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada, geleneksel Portland çimentolu beton borulara alternatif olacak çimentosuz geri dönüşüm esaslı yeni nesil geopolimer beton borular geliştirilmiştir. Deneyler ve sonuçlardan çıkarılan bulgular aşağıdaki gibidir:

1-Yüksek dayanımlı ve enerji tasarruflu beton borular:

- Endüstri standartlarını aşan ultra yüksek dayanım değerlerine 123 MPa sahip geopolimer beton borular başarıyla üretilmiş ve bu boruların zorlu altyapı proje uygulamalarında kullanım potansiyeli olduğu gösterilmiştir.
- Geleneksel Portland çimentolu beton borularda yüksek erken dayanım elde etmek için kullanılan buhar kürlemenin geopolimer betonda sona erdirilmesi, enerji tasarrufu ve üretim maliyetlerinde azalma sağlamıştır.

2-Çelik lif katkısının etkisi:

- Çelik liflerin eklenmesi, geopolimer beton boruların dayanım ve dayanıklılık özelliklerini önemli ölçüde artırarak uzun vadeli yapısal bütünlüğü sağlamıştır.

3-Çimento kullanımının ortadan kaldırılması ve dayanıklılık sorunlarının azaltılması:

- Bu geopolimer beton boruların üretiminde çimento kullanılmaması, çimento üretimi sırasında çevreye salınan karbondioksit gibi çevresel zararların azaltılmasına katkıda bulunmuştur. Ayrıca çimentoya bağlı dayanıklılık sorunları, örneğin sülfat saldırısı gibi, minimize edilmiştir.

4-Maliyet ve enerji verimliliği:

- Çimento gibi maliyetli ve çevresel etkileri yüksek bileşenlerin kullanımının ortadan kaldırılması, altyapı elemanlarının daha maliyet etkin bir şekilde üretilmesine olanak sağlamıştır. Ayrıca, endüstriyel süreçlerden elde edilen yan ürünlerin yeniden

kullanılması, depolama, taşıma ve bertaraf sorunlarının çözülmesine yardımcı olmuştur.

- Güncel altyapı elemanlarının maliyetinin büyük bir kısmının çimento ve önemli bir bölümünün buhar kürlemesine ayrıldığı göz önüne alındığında, geopolimer beton boruların benimsenmesi, maliyet tasarrufu ve enerji verimliliği sağlar.

5-Döngüsel ekonomi katkısı:

- Üretim sürecinde atık malzemelerin yan ürün olarak kullanılması, kaynak verimliliğini ve atık azaltımını teşvik eden döngüsel ekonomi konseptine katkıda bulunmaktadır.

6-Sürdürülebilir gelecek:

- Bu araştırma, daha temiz bir geleceğe yönelik çabaları hızlandırmayı ve sürdürülebilir altyapı çözümlerini teşvik ederek yeşil ekonomiye geçişi desteklemeyi amaçlamaktadır.

- **Kısıtlamalar ve gelecek çalışmalar**

Bu çalışmanın bazı sınırlamaları şunlardır: Kullanılan ham maddeler kolayca erişilebilir değildir, döküm yöntemi dikkatli işçilik ve ekipman gerektirmektedir ve üretilen betonun kıvamı düşüktür. Ancak, tüm bu zorluklara rağmen, yüksek dayanıklılık özelliklerine sahip, çevre dostu ve atık malzemelerin üretimde yeniden kullanıldığı yenilikçi bir yapı malzemesi üretmek önemli bir başarı olarak değerlendirilmektedir. Bu çalışmanın literatüre katkı sağlayacağı ve gelecekteki girişimlere rehberlik edeceği umulmaktadır.

Gelecek çalışmaların, boru elemanlarının performansı üzerindeki farklı puzolanik malzemelerin etkilerini incelemeye, yenilikçi ürünlerin asit saldırısı gibi çeşitli kimyasal aşındırıcı etkilere karşı performansını araştırmaya ve aşındırıcı etkiler altında meydana gelecek değişiklikleri farklı mikroyapısal analizler (XRD, FTIR vb.) kullanarak yorumlamaya odaklanması önerilmektedir.

6. KAYNAKLAR

Abbass, W., Khan, M., & Mourad, S. (2018). Evaluation of mechanical properties of steel fiber reinforced concrete with different strengths of concrete. *Construction and Building Materials*, 168, 556-569. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2018.02.164>.

Afroughsabet, V., Biolzi, L., & Ozbakkaloglu, T. (2016). High-performance fiber-reinforced concrete: A review. *Journal of Materials Science*, 51(14), 6517-6551. <https://doi.org/10.1007/s10853-016-9917-4>

Asif, A., Man, Z., Azizli, K., & Hamidi, R. (2014). Effect of Alkali and Water Content on Setting Time and Strength of Fly Ash Based Geopolymer. *Applied Mechanics and Materials*, 699, 93 - 98. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.699.93>.

Bakharev, T. (2006). Thermal behaviour of geopolymers prepared using class F fly ash and elevated temperature curing. *Cement and concrete Research*, 36(6), 1134-1147.

Bilenler Altundal, M. (2019). Yüksek Fırın cürufu ve uçucu kül katkılı geopolimer betonların% 5 sülfürik asit etkisinde mekanik davranışı (Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Gelişim Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü).

Bitencourt, L., Manzoli, O., Bittencourt, T., & Vecchio, F. (2019). Numerical modeling of steel fiber reinforced concrete with a discrete and explicit representation of steel fibers. *International Journal of Solids and Structures*. <https://doi.org/10.1016/J.IJSOLSTR.2018.09.028>.

Concrete Construction. Making Cement Manufacturing Carbon-Neutral. Erişim tarihi: [28/Nisan/2024], URL 3: https://www.concreteconstruction.net/business/management/making-cement-manufacturing-carbon-neutral_c

Cong, P., & Cheng, Y. (2021). Advances in geopolymer materials: A comprehensive review. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 8(3), 283-314.

Çakmak, A., & UYSAL, M. (2021). Geopolimer Beton ve Geleneksel Beton Üretim Süreçlerinden Kaynaklı CO₂ Salınımının Metasezgisel Yöntemlerle Belirlenmesi. *Türk Doğa ve Fen Dergisi*, 10(1), 6-17.

Education Snapshots. University of Queensland - Global Change Institute. Erişim tarihi: 12 Nisan 2024, URL 1:<https://educationsnapshots.com/projects/3817/university-of-queensland-global-change-institute/>

Eryılmaz, K., Polat, R., Turhan, D., & Karagöl, F. (2023). Geopolimer Beton Atıklarından Elde Edilen Agregaların Geopolimer Betonda Kullanılabilirliğinin Araştırılması. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 13(1), 419-431.

Fisher, A., Bullen, F., & Beal, D. (2001). The durability of cellulose fibre reinforced concrete pipes in sewage applications. *Cement and Concrete Research*, 31, 543-553. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00451-8](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00451-8).

Geopolymer Institute. Geopolymer Cement. Erişim tarihi: [28/Nisan/2024], URL 2:<https://www.geopolymer.org/applications/geopolymer-cement/>

Gunasekara, C., Law, D., & Setunge, S. (2016). Long term permeation properties of different fly ash geopolymer concretes. *Construction and Building Materials*, 124, 352-362. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2016.07.121>.

Ismail, I., Bernal, S., Provis, J., Hamdan, S., & Deventer, J. (2013). Microstructural changes in alkali activated fly ash/slag geopolymers with sulfate exposure. *Materials and Structures*, 46, 361-373. <https://doi.org/10.1617/S11527-012-9906-2>.

Kırcalı Beton Boru. 150 BB. Kırcalı. Erişim tarihi: [19 Mayıs 2024], URL 10: <https://kircali.com.tr/urun/150-bb/>

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

Lifli Betonlar. Bisantiye. Erişim tarihi: [14/Mayıs/2024], URL 8: <https://www.bisantiye.com/lifli-betonlar/>

Maslovara, S., Kaninski, M., Perović, I., Laušević, P., Tasić, G., Radak, B., & Nikolić, V. (2013). Novel ternary Ni–Co–Mo based ionic activator for efficient alkaline water electrolysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, 38, 15928-15933. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2013.10.039>.

Mermerdaş, K., & Ekmen, Ş. (2018). Alkali Aktivatör Parametrelerinin ve Test Koşullarının Geopolimer Betonların Büzülme ve Sünme Davranışı Üzerine Etkisi. *Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi*, 3(3), 93-101.

Naaman, A. (2003). Engineered Steel Fibers with Optimal Properties for Reinforcement of Cement Composites. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 1, 241-252. <https://doi.org/10.3151/JACT.1.241>.

Özcan, A., & Karakoç, M. (2019). Evaluation of sulfate and salt resistance of ferrochrome slag and blast furnace slag-based geopolimer concretes. *Structural Concrete*, 20, 1607 - 1621. <https://doi.org/10.1002/suco.201900061>.

Provis, J. (2018). Alkali-activated materials. *Cement and Concrete Research*. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONRES.2017.02.009>.

Provis, J. L., & Van Deventer, J. S. J. (Eds.). (2009). Geopolymers: structures, processing, properties and industrial applications. Elsevier.

Rangan, B. V. (2008). Fly ash-based geopolimer concrete. *Research Report GC4*. Faculty of Engineering, Curtin University of Technology, Perth, Australia.

Sedira, N., & Castro-Gomes, J. (2020). Effect of activators on hybrid alkaline binder based on tungsten mining waste and ground granulated blast furnace slag. *Construction and Building Materials*, 232, 117176. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117176>.

Serin, S., Morova, N., Saltan, M., & Terzi, S. (2012). Investigation of usability of steel fibers in asphalt concrete mixtures. *Construction and Building Materials*, 36, 238-244. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2012.04.113>.

Sorelli, L., Meda, A., & Plizzari, G. (2006). Steel Fiber Concrete Slabs on Ground: A Structural Matter. *Aci Structural Journal*, 103, 551-558. <https://doi.org/10.14359/16431>.

Steel Fiber. Kerakoll Products. Erişim tarihi: [14/Mayıs/2024], URL 7: <https://products.kerakoll.com/en/p/steel-fiber>

Su, Y., Li, J., Wu, C., Wu, P., & Li, Z. (2016). Effects of steel fibres on dynamic strength of UHPC. *Construction and Building Materials*, 114, 708-718. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2016.04.007>.

Sumathi, A., & Mohan, K. (2018). Effect of Steel Fiber on Structural Characteristics of High-Strength Concrete. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 43, 117-130. <https://doi.org/10.1007/S40996-018-0152-X>.

Tadepalli, P., Mo, Y., & Hsu, T. (2013). Mechanical properties of steel fibre concrete. *Magazine of Concrete Research*, 65, 462-474. <https://doi.org/10.1680/MACR.12.00077>.

Temuujin, J., Minjigmaa, A., Rickard, W., Lee, M., Williams, I., & Van Riessen, A. (2009). Preparation of metakaolin based geopolymer coatings on metal substrates as thermal barriers. *Applied clay science*, 46(3), 265-270.

Torres, J., & Lantsoght, E. (2019). Influence of Fiber Content on Shear Capacity of Steel Fiber-Reinforced Concrete Beams. *Fibers*. <https://doi.org/10.20944/preprints201908.0301.v1>.

TS 10513, 1992, “Çelik Teller – Beton Takviyesinde Kullanılan”, Türk Standardları Enstitüsü, Ankara.

Van Chanh, N., Trung, B. D., & Van Tuan, D. (2008, November). Recent research geopolymer concrete. In *The 3rd ACF international conference-ACF/VCA, Vietnam* (Vol. 18, pp. 235-241).

Verma, M., & Dev, N. (2020). Sodium hydroxide effect on the mechanical properties of flyash-slag based geopolymer concrete. *Structural Concrete*, 22, E368 - E379. <https://doi.org/10.1002/suco.202000068>.

Wikipedia. (2023, 09 Nisan). Albite, Erişim tarihi: [01 Mayıs 2024] URL 6: <https://en.wikipedia.org/wiki/Albite>

Wikipedia. (2023, 09 Nisan). Kaolinite., Erişim tarihi: [01 Mayıs 2024] URL 5: <https://en.wikipedia.org/wiki/Kaolinite>

Wikipedia. (2023, 28 Mart). Uçucu kül, Erişim tarihi: [01 Mayıs 2024]URL 4: https://tr.wikipedia.org/wiki/U%C3%A7ucu_k%C3%BCl.

Wikipedia. Millau Viaduct. Erişim tarihi: [14/Mayıs/2024], URL 9: https://en.wikipedia.org/wiki/Millau_Viaduct

Wu, Z., Shi, C., He, W., & Wu, L. (2016). Effects of steel fiber content and shape on mechanical properties of ultra high performance concrete. *Construction and Building Materials*, 103, 8-14. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2015.11.028>.

Xu, H., & Van Deventer, J. S. (2002). Geopolymerisation of multiple minerals. *Minerals engineering*, 15(12), 1131-1139. [https://doi.org/10.1016/S0892-6875\(02\)00255-8](https://doi.org/10.1016/S0892-6875(02)00255-8).

Yang, J., Chen, B., & Nuti, C. (2021). Influence of steel fiber on compressive properties of ultra-high performance fiber-reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 302, 124104. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2021.124104>.

Ye, H., & Radlińska, A. (2016). Fly ash-slag interaction during alkaline activation: Influence of activators on phase assemblage and microstructure formation. *Construction and Building Materials*, 122, 594-606. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2016.06.099>.

Zhang, Z., Fang, H., Bin, L., & Wang, F. (2020). Mechanical Properties of Concrete Pipes with Pre-Existing Cracks. *Applied Sciences*. <https://doi.org/10.3390/app10041545>.

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Baraa RIHAVI

Eğitim Bilgileri:

2021: İnönü Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Lisans

