



**LİFLİ GEOPOLİMER BETONARME YÜKSEK
KİRİŞLERİN YAPISAL DAVRANIŞI**

Yasemin ÖZBEN

Danışman: Prof. Dr. Abdulkadir Cüneyt AYDIN

Yüksek Lisans Tezi

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı

2025

(Her hakkı saklıdır.)

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

**LİFLİ GEOPOLİMER BETONARME YÜKSEK KİRİŞLERİN YAPISAL
DAVRANIŞI**

(Structural Behavior of Fibrous Geopolymer Reinforced Concrete Deep Beams)

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Yasemin ÖZBEN

Danışman: Prof. Dr. Abdulkadir Cüneyt AYDIN
İkinci Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Barış BAYRAK

Erzurum
Eylül, 2025

KABUL VE ONAY TUTANAĞI

Yasemin ÖZBEN tarafından hazırlanan “LİFLİ GEOPOLİMER BETONARME YÜKSEK KİRİŞLERİN YAPISAL DAVRANIŞI” başlıklı çalışması 04/09/2025 tarihinde yapılan tez savunma sınavı sonucunda başarılı bulunarak jürimiz tarafından İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Yapı Bilim Dalında yüksek lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Başkanı:	Prof. Dr. Abdulkadir Cüneyt AYDIN <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır
Danışman:	Prof. Dr. Abdulkadir Cüneyt AYDIN <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır
Jüri Üyesi:	Prof. Dr. Murat Tolga YILMAZ <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır
Jüri Üyesi:	Doç. Dr. Mahmut KILIÇ <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır
Jüri Üyesi:	Doç. Dr. Mahyar MAALI <i>Erzurum Teknik Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır
Jüri Üyesi:	Dr. Öğr. Üyesi Barış BAYRAK <i>Kafkas Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır
İkinci Tez Danışmanı	Dr. Öğr. Üyesi Barış BAYRAK <i>Kafkas Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır

Enstitü Yönetim Kurulunun
.../.../.... tarih ve sayılı
kararı.

Bu tezin Atatürk Üniversitesi Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği'nin ilgili maddelerinde belirtilen şartları yerine getirdiğini onaylarım.

Prof. Dr. Alper NUHOĞLU
Enstitü Müdürü

Aslı Islak İmzalıdır

Bu çalışma BAP projesi kapsamında desteklenmiştir.
Proje No: FYL-2023-13365

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildiriş, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ REKTÖRLÜĞÜ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜ

ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU

Yüksek Lisans tezi olarak Prof. Dr. Abdulkadir Cüneyt AYDIN danışmanlığında sunulan “**LİFLİ GEOPOLİMER BETONARME YÜKSEK KİRİŞLERİN YAPISAL DAVRANIŞI**” başlıklı çalışmanın tarafımızdan bilimsel etik ilkelere uyularak yazıldığını, yararlanılan eserlerin kaynakçada gösterildiğini, Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından belirlenmiş olan Turnitin Programı benzerlik oranlarının aşılmadığını ve aşağıdaki oranlarda olduğunu beyan ederiz.

Tez Bölümleri	Tezin Benzerlik Oranı (%)	Maksimum Oran (%)
Giriş	0	30
Kuramsal Temeller	7	30
Materyal ve Metot	8	35
Araştırma Bulguları ve Tartışma	3	20
Sonuçlar ve Öneriler	1	20
Tezin Geneli	8	25

Not: Yedi kelimeye kadar benzerlikler ile Başlık, Kaynakça, İçindekiler, Teşekkür, Dizin ve Ekler kısımları tarama dışı bırakılabilir. Yukarıdaki azami benzerlik oranları yanında tek bir kaynaktan olan benzerlik oranlarının %5'den büyük olmaması gerekir.

Sunulan bilgilerin doğru olduğunu, aksi halde doğacak hukuki sorumlulukları kabul ettiğimizi beyan ederiz.

Tez Yazarı (Öğrenci)	Tez Danışmanı
Yasemin ÖZBEN	Prof. Dr. Abdulkadir Cüneyt AYDIN
04.09.2025	04.09.2025
İmza: Aslı Islak İmzalıdır	İmza: Aslı Islak İmzalıdır

* Tez ile ilgili YÖKTEZ'de yayınlamasına ilişkin bir engelleme var ise aşağıdaki alanı doldurunuz.

- ☐ Tezle ilgili patent başvurusu yapılması / patent alma sürecinin devam etmesi sebebiyle Enstitü Yönetim Kurulunun/....../.... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 2 (iki) yıl süreyle engellenmiştir.
- ☐ Enstitü Yönetim Kurulunun/....../.... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 6 (altı) ay süreyle engellenmiştir.

TEŞEKKÜR

Akademik yolculuğumun ilk adımlarından yüksek lisans serüvenimin sonuna dek, bilgeliği, deneyimi ve nezaketiyle bana ışık tutan; sabrı, anlayışı ve rehberliğiyle hem akademik hem de kişisel gelişimime değerli katkılar sağlayan değerli danışman hocam Prof. Dr. Abdulkadir Cüneyt AYDIN’a gönülden teşekkür ve saygılarımı sunarım.

Her zaman yapıcı geri bildirimleriyle ufkumu genişleten, sorularımı sabırla yanıtlayarak beni akademik çalışmalarında cesaretlendiren ortak danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Barış Bayrak’a teşekkür ederim.

Eğitim sürecim boyunca her daim yanımda olan, sabır, anlayış ve sevgileriyle bana güç veren aileme teşekkür ederim. Onların desteği, bu sürecin en sağlam temeli olmuştur.

Bu zorlu ve değerli süreçte, her aşamasında yanımda olan, destek ve dostluklarını esirgemeyen sevgili arkadaşlarıma da ayrıca minnettarım. Varlıkları, bu yolculuğu daha anlamlı ve keyifli kılmıştır.

Bu tez çalışması 13365 numaralı temel araştırma projeleri kapsamında Atatürk Üniversitesi BAP birimi tarafından desteklenmiştir. Desteklerinden dolayı Atatürk Üniversitesi’ne teşekkür ederim.

Yasemin ÖZBEN

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

LİFLİ GEOPOLİMER BETONARME YÜKSEK KİRİŞLERİN YAPISAL DAVRANIŞI

Yasemin ÖZBEN

Danışman: Prof. Dr. Abdulkadir Cüneyt AYDIN

İkinci Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Barış BAYRAK

Amaç: Bu çalışmanın amacı, a/d oranı, çelik lif oranı ve boyuna donatı oranının geopolymer betondan üretilen derin kirişlerin kesme davranışına etkisinin deneysel olarak araştırılmasıdır. Bu amaç doğrultusunda iki farklı a/d oranı (0,75 ve 1,5), üç farklı çelik lif oranı (%0, %0,5 ve %1) ve iki farklı boyuna donatı oranı tercih edilmiştir. Çelik lif kullanılan numunelerde enine donatı(etriye) kullanılmayarak geopolymer betonda çelik lif kullanılmasının kesme davranışına etkisinin deneysel olarak araştırılması da hedeflenmiştir. Ayrıca boyuna donatı oranının azaltılmasının ve yerine çelik lif kullanılmasının da kesme davranışı üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

Yöntem: Deneysel çalışma programı kapsamında 12 adet 120x400x1200 mm boyutlarında ve betonarme derin kiriş üretilmiştir. Numuneler a/d oranının 0,75 ve 1,5 olmak göre iki farklı gruba ayrılmıştır. Her grupta 4Ø10 boyuna donatılı ve Ø8/150 yatay donatılı referans numuneleri üretilmiştir. Diğer numunelerde ise enine donatı kullanılmamış olup %0,5 ve %1 oranında çelik lif kullanılmıştır. Ayrıca boyuna donatı oranı 2Ø10 olarak azaltılmış olup %0,5 ve %1 oranında çelik lif kullanılmıştır. Bununla birlikte yüksek fırın cürufu ve metakaolinin bağlayıcı olarak kullanıldığı geopolymer beton üretilmiştir. Beton karışımında atık mermer tozu, kuvars, kum ince agrega ve çakıl iri agrega olarak kullanılmıştır. Betonarme derin kirişlere üç noktalı kesme testi uygulanmıştır.

Bulgular: a/d oranının artması derin kirişlerin kesme dayanımında %55 oranına kadar azalmaya neden olmuştur. Yatay donatının kullanılmaması da kesme dayanımında a/d oranı 0,75 olan numunelerde %30 ve a/d oranı 1 olan numunelerde ise %21 oranında azalmasına neden olmuştur. a/d oranı 0,75 numunelerde enine donatı yerine %0,5 ve %1 oranında çelik lif kullanılması kesme dayanımında %28 ve %7 oranında dayanım artışına neden olmuştur. Fakat benzer durum a/d oranı 1,5 olan numunelerde gözlemlenmemiştir. Boyuna donatı oranının azaltılarak çelik lif kullanılan numunelerde dayanım kaybı gözlemlenmesine rağmen bu azalım %7 ve %15 oranında kalmıştır. a/d oranı 1,5 olan numunelerde ise dayanım kaybı %24 oranına kadar çıkmıştır.

Sonuç: Betonarme derin kirişlerde geopolymer betonun gerek gelecekteki akademik çalışmalarda gerekse de saha uygulamalarında kullanılması açısından elde edilen sonuçlar oldukça önemlidir. Özellikle a/d oranı küçük olan derin kirişlerde çelik lif kullanılmasının hem yatay hem de boyuna donatının azaltılması durumunda tolere edici bir etkisinin olduğu sonucuna varılmıştır. Fakat a/d oranının artması durumunda yatay ve boyuna donatının azaltılmasına çelik lif kullanımının tolere edici özelliğini gözlemlenmemiştir.

Anahtar Kelimeler: Geopolymer beton, derin kiriş, çelik lif, kesme dayanımı

Eylül 2025, 138 sayfa

ABSTRACT

MASTER DEGREE THESIS STRUCTURAL BEHAVIOR OF FIBROUS GEOPOLYMER REINFORCED CONCRETE DEEP BEAMS

Yasemin ÖZBEN

Supervisor: Prof. Dr. Abdulkadir Cüneyt AYDIN

Co-Supervisor: Assist Prof. Dr. Barış BAYRAK

Objective: The aim of this study is to experimentally investigate the effect of the a/d ratio, steel fiber ratio and longitudinal reinforcement ratio on the shear behaviour of deep beams produced from geopolymer concrete. To this end, two different a/d ratios (0,75 and 1,5), three different steel fiber ratios (%0, %0,5 and %1), and two different longitudinal reinforcement ratios were selected. In the specimens using steel fibers, horizontal reinforcement (stirrups) was not used, and the aim was also to experimentally investigate the effect of using steel fibers in geopolymer concrete on shear behaviour. Additionally, the effect of reducing the longitudinal reinforcement ratio and replacing it with steel fibers on shear behaviour was also investigated.

Method: Within the scope of the experimental study programme, 12 reinforced concrete deep beams measuring 120x400x1200 mm were produced. The samples were divided into two different groups according to the a/d ratio of 0,75 and 1,5. In each group, reference samples with 4Ø10 longitudinal reinforcement and Ø8/150 horizontal reinforcement were produced. In the other specimens, no horizontal reinforcement was used, and steel fibers were used at a ratio of %0,5 and %1. Additionally, the longitudinal reinforcement ratio was reduced to 2Ø10, and steel fibers were used at a ratio of %0,5 and %1. Furthermore, geopolymer concrete was produced using blast furnace slag and metakaolin as binders. The concrete mixture included waste marble dust, quartz, sand as fine aggregate, and gravel as coarse aggregate. A three-point bending test was applied to the reinforced concrete deep beams.

Findings: An increase in the a/d ratio has caused a decrease of up to %55 in the shear strength of deep beams. The absence of horizontal reinforcement has also caused a decrease in shear strength of %30 in samples with an a/d ratio of 0,75 and %21 in samples with an a/d ratio of 1. In specimens with an a/d ratio of 0,75, using %0,5 and %1 steel fibers instead of horizontal reinforcement resulted in a %28 and %7 increase in shear strength, respectively. However, a similar situation was not observed in specimens with an a/d ratio of 1,5. Although a strength loss was observed in samples where the longitudinal reinforcement ratio was reduced and steel fibers were used, this reduction remained at %7 and %15. In samples with an a/d ratio of 1,5, the strength loss reached up to %24.

Conclusion: The results obtained regarding the use of geopolymer concrete in reinforced concrete deep beams are quite important in terms of both future academic studies and field applications. It has been concluded that the use of steel fibers in deep beams with a small a/d ratio has a tolerating effect when both horizontal and longitudinal reinforcement are reduced. However, when the a/d ratio increases, the tolerating property of steel fiber use has not been observed in cases where horizontal and longitudinal reinforcement are reduced.

Keywords: Geopolymer concrete, deep beam, steel fiber, shear strength

September 2024, 138 pages

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY TUTANAĞI.....	i
ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU	ii
TEŞEKKÜR	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TABLolar DİZİNİ.....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ.....	xiii
GİRİŞ.....	1
KURAMSAL TEMELLER.....	6
Geopolimer.....	6
Geopolimer tarihçesi	9
Geopolimer kimyası	10
Geopolimer bileşenleri	13
Geopolimer kullanım alanları	15
Yüksek Kiriş	17
Yüksek kiriş davranışı.....	20
Yüksek kirişte donatı.....	24
Yüksek kirişte çelik lif	25
Farklı yönetmeliklerde yüksek kiriş tasarımı.....	26
Literatür Özeti	27
MATERYAL VE YÖNTEM	35
Materyal	35
Beton karışımında kullanılan malzemeler.....	35
Donatı elemanları ve ölçüm için kullanılan malzemeler.....	43
Beton karışım oranları ve beton döküm aşaması	43
Deney numunelerini geometrisi ve donatı detayları	47
Yöntem.....	55
Deney düzenekleri ve ölçüm sistemleri	57
ARAŞTIRMA BULGULARI	61
Basınç, Eğilme ve Yarmada Çekme Dayanımı Sonuçlarının Değerlendirilmesi	61

Betonarme Yüksek Kirişlerin Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi	70
Yük Deplasman Eğrilerinin Karşılaştırılması	73
Göçme Modu ve Çatlak Dağılımı	81
Kesme Dayanımına Parametrelerin Etkileri.....	91
a/d Oranının Kesme Dayanımına Etkisi.....	92
Çelik Lif Katkısının Kesme Dayanımına Etkisi.....	97
Düşük a/d Oranında Çelik Lif Katkısının Kesme Dayanımına Etkisi	98
Yüksek a/d Oranında Çelik Lif Katkısının Kesme Dayanımına Etkisi.....	101
Boyuna Donatı Oranının Kesme Dayanımına Etkisi	104
Donatı ve Betondaki Şekil Değiştirmelerin Karşılaştırılması.....	107
a/d oranının donatı ve betondaki şekil değiştirmelere etkisi.....	107
Çelik Lif Katkısının Şekil Değiştirmeye Etkisi	107
Düşük a/d oranında çelik lif katkısının şekil değiştirmeye etkisi	107
Yüksek a/d oranında çelik lif katkısının şekil değiştirmeye etkisi.....	108
Boyuna Donatı Oranının Şekil Değiştirmeye Etkisi	108
SONUÇ.....	111
KAYNAKLAR.....	114
ÖZGEÇMİŞ.....	122

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. Geleneksel Beton ile Geopolimer Betonu Karşılaştırılması.....	8
Tablo 2. Geopolimerlerin Sentezlenmesi için Kullanılan Bazı Malzemeler	13
Tablo 3. Öğütülmüş Yüksek Fırın Cürufunun Kimyasal Bileşimi(%)	36
Tablo 4. Öğütülmüş Yüksek Fırın Cürufunun Fiziksel Özellikleri	36
Tablo 5. Kuvars Tozu Kimyasal Bileşimi(%).....	39
Tablo 6. Metakaolinin Kimyasal Bileşimi (%).....	40
Tablo 7. Atık Mermer Tozunun Kimyasal Bileşimi (%)	41
Tablo 8. Sodyum Silikatin Kimyasal Bileşimi (%)	42
Tablo 9. Sodyum Hidroksitin Kimyasal Bileşimi (%).....	42
Tablo 10. Çelik Lif Teknik Özellikleri	43
Tablo 11. Geopolimer Beton Karışım için Kullanılan Malzemelerin Miktarları (1 m ³ /kg)	44
Tablo 12. Yüksek Kiriş Donatı Düzenlemeleri ve Çelik Lif İçeriği.....	52
Tablo 13. 7 ve 28 Günlük Basınç Dayanımı Sonuçları (MPa)	62
Tablo 14. 7 ve 28 Günlük Eğilme Dayanımı Sonuçları (MPa)	65
Tablo 15. 7 Günlük Yarmada Çekme Dayanımı Sonuçları (MPa).....	68
Tablo 16. Geopolimer Yüksek Kirişlerin Deney Sonuçları.....	71
Tablo 17. a/d Oranının Kritik Yük Üzerindeki Etkisinin Karşılaştırılması	93
Tablo 18. a/d Oranının Akma Yüğü Üzerindeki Etkisinin Karşılaştırılması.....	93
Tablo 19. a/d Oranının Maksimum Yük Üzerindeki Etkisinin Karşılaştırılması	94
Tablo 20. a/d Oranının Nihai Yük Üzerindeki Etkisinin Karşılaştırılması.....	94
Tablo 21. a/d Oranının Enerji Sönümleme Kapasitesi Üzerindeki Etkisinin Karşılaştırılması	97
Tablo 22. Çelik Lif Oranının Kritik Yük Üzerindeki Etkisinin Karşılaştırılması	98
Tablo 23. Çelik Lif Oranının Akma Yüğü Üzerindeki Etkisinin Karşılaştırılması	99
Tablo 24. Çelik Lif Oranının Maksimum Yük Üzerindeki Etkisinin Karşılaştırılması.....	100
Tablo 25. Çelik Lif Oranının Nihai Yük Üzerindeki Etkisinin Karşılaştırılması	100
Tablo 26. Çelik Lif Oranının Enerji Sönümleme Kapasitesi Üzerindeki Etkisinin Karşılaştırılması	101
Tablo 27. Boyuna Donatı Oranının Kritik Yük Üzerindeki Etkisinin Karşılaştırılması	104
Tablo 28. Boyuna Donatı Oranının Akma Yüğü Üzerindeki Etkisinin Karşılaştırılması	104

Tablo 29. Boyuna Donatı Oranının Maksimum Yük Üzerindeki Etkisinin

Karşılaştırılması 105

Tablo 30. Boyuna Donatı Oranının Nihai Yük Üzerindeki Etkisinin Karşılaştırılması 105

Tablo 31. Boyuna Donatı Oranının Enerji Sönümleme Kapasitesi Üzerindeki Etkisinin

Karşılaştırılması 107

Tablo 32. Deney Numunelerinin Şekil Değiştirme Değerleri ($\mu\epsilon$) 109



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Geopolimer malzemenin üretim aşaması	7
Şekil 2. Geopolimer malzemenin sektörde faydası	8
Şekil 3. Geopolimerin ampirik formülü	11
Şekil 4. Geopolimerizasyonun şematik bir gösterimi: (a) Alüminosilikatin tekrardan düzenlenmesi (b) jel oluşum fazının başlangıcı ve oligomerlerin oluşumu (c) polimerizasyon	12
Şekil 5. Geopolimerizasyonun için kavramsal bir model.....	12
Şekil 6. Geopolimer malzeme oluşumunun şematik bir gösterimi	13
Şekil 7. Ödüllü Queensland Üniversitesi'nin Küresel Değişim Enstitüsü (GCI) binası.....	16
Şekil 8. Brisbane West Wellcamp havalimanı (BWWA)	16
Şekil 9. Kanalizasyona geopolimer malzemeden üretilen beton borular yerleştirilirken.....	17
Şekil 10. Ön gerilimli geopolimer beton demiryolu traversleri.	17
Şekil 11. Yüksek yapıda transfer yüksek kiriş örneği	18
Şekil 12. Yüksek kirişin başlık kirişi olarak köprüde kullanımına bir örnek	19
Şekil 13. a/d oranının kayma gerilimi üzerindeki etkisi.....	20
Şekil 14. Yüksek kirişlerde gerilme dağılımı: (a) $l/h = 4$, (b) $l/h = 2$, (c) $l/h = 1$ ve (d) $l/h < 1$	21
Şekil 15. (a) Üst taraftan yüklü tek açıklıklı yüksek kirişte asal gerilme doğrultuları, (b) Alt taraftan yüklenmiş tek açıklıklı yüksek kirişte asal gerilme doğrultuları (c) Üst taraftan yüklü sürekli yüksek kirişte asal gerilme doğrultuları	22
Şekil 16. Etriyesiz yüksek kirişlerde kesme kırılması.....	23
Şekil 17. Yüksek kiriş kırılma şekilleri	24
Şekil 18. Çelik lif sınıflandırılması	26
Şekil 19. Yüksek fırın cürufuna ait XRD deseni.....	36
Şekil 20. Geopolimer yüksek kiriş üretiminde kullanılan malzemelerin görselleri a) Yüksek fırın cürufu, b) 0-0,5 mm boyutlarında kuvars tozu, c) Metakaolin, d) Atık mermer tozu, e) Kum, f) İri agrega, g) Sodyum silikat (Na_2SiO_3), h) Sodyum hidroksit (NaOH), ı) Kancalı çelik lif	37
Şekil 21. Yüksek fırın cürufuna ait elek analizi	38

Şekil 22. Geleneksel çimento ve öğütölmüş yüksek fırın cürufu katkılı çimentonun CO2 salınımı açısından karşılaştırması	38
Şekil 23. Kuvars tozuna ait XRD deseni	39
Şekil 24. Kuvars tozuna ait elek analizi	39
Şekil 25. Metakaoline ait XRD deseni	40
Şekil 26. Metakaoline ait elek analizi	40
Şekil 27. Atık mermer tozuna ait elek analizi	41
Şekil 28. İnce ve iri agregaya ait elek analizi.....	41
Şekil 29. Çelik lif modeli	42
Şekil 30. 8 mm ve 10 mm çaplı donatı gerilme-şekil değiştirme eğrileri	43
Şekil 31. Yüksek kiriş dökümü için kullanılan kalıp görseli	45
Şekil 32. (a) Yüksek kiriş dökümü ve (b) numune alımı	46
Şekil 33. (a) Yüksek kiriş geometrisi ve (b) donatı detayları (Birimler cm cinsindendir.).....	48
Şekil 34. Yüksek kirişlere şekil değiştirme ölçerlerin eklenmesi (Birimler cm cinsindendir.)	53
Şekil 35. Basınç dayanımı deneyi için deney düzeneği	55
Şekil 36. Yarmada çekme deneyi için deney düzeneği modeli ve deneyin uygulandığı cihaz.....	56
Şekil 37. Eğilme dayanımı deneyi için kullanılan deney düzeneği.....	57
Şekil 38. Üç noktalı eğilme deney düzeneği modeli.....	58
Şekil 39. Üç noktalı eğilme deney düzeneğine ait görsel.....	59
Şekil 40. Üç noktalı eğilme deney düzeneğine ait görsel.....	60
Şekil 41. 7 ve 28 günlük basınç dayanımlarının karşılaştırılması	62
Şekil 42. 7 günlük basınç testi uygulanan silindirik numunelerin resimleri (a) %0 (b) %0,5 lifli (c) %1 lifli.....	64
Şekil 43. 7 ve 28 günlük eğilme dayanımlarının karşılaştırılması	66
Şekil 44. 7 günlük basınç testi uygulanan silindirik numunelerin resimleri (a) %0 (b) %0,5 lifli (c) %1 lifli.....	67
Şekil 45. 7 günlük yarmada dayanımlarının karşılaştırılması	68
Şekil 46. Yüksek kiriş numunelerinin yük-deplasman eğrileri	75
Şekil 47. Tüm numunelerin (a) yük-deplasman eğrileri (b) normalleştirilmiş yük-deplasman eğrileri	80
Şekil 48. K1 yüksek kirişi	81
Şekil 49. K2 yüksek kirişi	82
Şekil 50. K3 yüksek kirişi	83

Şekil 51. K4 yüksek kirişi	84
Şekil 52. K5 yüksek kirişi	85
Şekil 53. K6 yüksek kirişi	86
Şekil 54. K7 yüksek kirişi	86
Şekil 55. K8 yüksek kirişi	87
Şekil 56. K9 yüksek kirişi	88
Şekil 57. K10 yüksek kirişi	89
Şekil 58. K11 yüksek kirişi	90
Şekil 59. K12 yüksek kirişi	90
Şekil 60. Betonarme derin kirişlerin (a) kritik yük (b) akma yükü (c) maksimum yük ve (d) nihai yük dayanımlarının karşılaştırılması	91
Şekil 61. Boyuna donatılardaki şekil değiştirmelerin karşılaştırması	109
Şekil 62. Etriyelerdeki şekil değiştirmelerin karşılaştırması	110
Şekil 63. Beton yüzeyindeki şekil değiştirmelerin karşılaştırması	110

KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ

a	: Kesme Açıklığı
ACI	: American Concrete Institute
Al	: Alüminyum
Al ₂ O ₃	: Alüminyum Oksit
AlO ₄ ⁵⁻	: Sodyum Alüminat
AS	: Australian Standard
b	: Kesit Genişliği
c	: Beton Paspayı
Ca+	: Kalsiyum
CaO	: Kalsiyum Oksit
Cl	: Klorür
CO ₂	: Karbondioksit
CSA	: Canadian Standards Association
d	: Faydalı Yükseklik
d _f	: Lif Çapı (mm)
E	: Enerji sönümlleme kapasitesi
EC	: Eurocode
f _c	: Basınç Gerilimi (MPa)
f _c	: Basınç Dayanımı
f _c	: Basınç Dayanımı
f' _c	: Silindir Basınç Dayanımı (MPa)
Fe	: Demir
Fe ₂ O ₃	: Demir(III) Oksit veya Ferrik Oksit
H ₂ O	: Su
IS	: Indian Standard
K+	: Potasyum
K ₂ O	: Potasyum Oksit
l	: Aynı Hizadaki İki LVDT Arasındaki Mesafe
L	: Aynı Yüzeydeki İki LVDT Arasındaki Mesafe
l _d	: Uzunluk (mm)

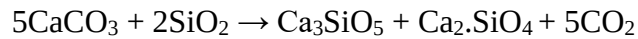
l_f	: Lif Uzunluğu (mm)
L_i	: LVDT'lerden Elde Edilen Değer
Li^+	: Lityum
LOI	: Kızdırma Kaybı
LVDT	: Deformasyon Ölçüm Cihazı (Linear Variable Differential Transformers)
MgO	: Magnezyum Oksit veya Magnezya
Na^+	: Sodyum
Na_2CO_3	: Sodyum Karbonat
Na_2O	: Sodyum Oksit
Na_2SiO_3	: Sodyum Silikat
NaOH	: Sodyum Hidroksit
$\emptyset$	: Çubuk Çapı (mm)
P_a	: Numunede Akma Anındaki Yük Değeri
P_{cr}	: İlk Çatlak Anındaki Yük Değeri
P_{maks}	: Deney Numunesinin Ulaştığı Maksimum Yük Değeri
P_u	: Nihai Yük Değeri
s	: Enine Donatı Aralığı (mm).
SiO_2	: Silisyum dioksit veya Silika
SiO_4^{4-}	: Tetrahedron
SO_3	: Sülfür Trioksit
SO_3	: Kükürt Trioksit
SO_4	: Sülfat

GİRİŞ

Günümüzde dünya genelinde en yaygın şekilde kullanılan yapı malzemelerinden biri betondur. Beton; çimento, su, kum, çakıl veya kırmataş gibi agregaların belirli oranlarda karıştırılmasıyla elde edilen, yüksek dayanıklılık ve şekil verilebilirliği sayesinde inşaat sektöründe geniş bir uygulama alanına sahip olan kompozit bir malzemedir. Altyapı projelerinden yüksek katlı binalara, köprülerden barajlara kadar birçok yapıda tercih edilmektedir. Ancak betonun yaygın kullanımına rağmen, çevresel sürdürülebilirlik açısından bazı önemli dezavantajları bulunmaktadır. Bu dezavantajların başında, betonun ana bağlayıcısı olan çimentonun üretimi sırasında ortaya çıkan yüksek düzeydeki karbon salınımı gelmektedir. Çimento üretiminde kullanılan klinker, kalker (kireçtaşı) ve kil gibi hammaddelerin yaklaşık 1450°C'ye kadar ısıtılması gerekmektedir. Bu yüksek sıcaklık, büyük miktarda fosil yakıt tüketimini zorunlu kılmakta, bu da üretim sürecini enerji yoğun bir hale getirmektedir. Ayrıca, kalkerin ısıtılması sırasında gerçekleşen kimyasal kalsinasyon reaksiyonu sonucunda doğrudan karbondioksit (CO₂) açığa çıkmaktadır. Bu süreç, çimento üretiminden kaynaklanan karbon salınımının yalnızca enerji tüketimine değil, aynı zamanda kimyasal reaksiyonlara da bağlı olduğunu göstermektedir.

Yapılan araştırmalara göre, çimento üretimi, yıllık endüstriyel CO₂ salınımının yaklaşık %5 ila %7'sini oluşturarak, en yüksek karbon emisyonuna neden olan üretim sektörleri arasında yer almaktadır (Davidovits, 1994; Roy, 1999; Rangan, 2010; Mclellan *et al.*, 2011; Kantarcı, 2018; Aygörmez, 2018). Bu veriler, çimento temelli yapı malzemelerine yönelik çevresel etkilerin azaltılması gerektiğini açıkça ortaya koymaktadır.

Çimento üretiminde CO₂ salınımı kimyasal süreci aşağıdaki verilmiştir.



Bu kimyasal reaksiyon, her bir ton geleneksel çimento üretimi için yaklaşık 597 kilogram karbondioksit (CO₂) salınımına neden olmaktadır ve bu da çimento üretiminden kaynaklanan toplam karbon emisyonunun yaklaşık %50'sini oluşturmaktadır. Çimento üretimindeki diğer %50'lik kısmı ise üretim sürecinde kullanılan enerji, taşıma, öğütme ve diğer yardımcı işlemler gibi faaliyetlerden kaynaklanmaktadır (McNulty, 2009). Buradan da anlaşılacağı üzere 1 ton geleneksel çimento üretimi sırasında yaklaşık bir ton CO₂ açığa çıkmaktadır.

Çimento üretimi sürecinde ortaya çıkan karbon salınımı, çevresel açıdan önemli bir sorun teşkil etmektedir. Bu sorunun etkilerini azaltmak ve daha sürdürülebilir yapı malzemeleri geliştirmek amacıyla alternatif çözümler üzerinde yoğun bir şekilde çalışılmaktadır. Bu çözümlerden biri, geleneksel beton üretiminde kullanılan bağlayıcı malzeme olan çimentonun yerine, alternatif olarak atık malzemelerin geri dönüşümüyle elde edilen puzolanik özellikli geopolimer bağlayıcıların kullanılmasıdır.

Geopolimer malzemelerin, çimentoya kıyasla daha düşük karbon emisyonu ile üretilmesi, bu bağlayıcının alternatif bağlayıcı olarak araştırılmasını son derece önemli hale getirmektedir. Literatürde, özellikle uçucu kül ve yüksek fırın cürufu kullanılarak geopolimer beton üretimi üzerine birçok çalışma yapılmıştır. Bu tür alternatif bağlayıcıların geliştirilmesi, karbon salımının azaltılması açısından etkili bir çözüm yolu olarak değerlendirilmektedir (Luukkonen *et al.* 2017). Geopolimer malzemeler, geleneksel çimentoya kıyasla yaklaşık %80 daha az karbon emisyonu ile üretilmektedir (McNulty 2009). Hammaddelerin teminine göre, bu bağlayıcılar geleneksel çimento yerine ya da katkı olarak kullanılabilir. Ayrıca, geopolimerler aside ve sülfata karşı direnç, yüksek ısı dayanımı, düşük kuruma rötresi ve yüksek mekanik dayanım gibi üstün özellikler sunacak şekilde geliştirilebilir (Luukkonen *et al.* 2017).

Geopolimer beton, geleneksel çimento esaslı betonun çevresel etkilerini azaltmayı amaçlayan alternatif bir yapı malzemesidir. Geleneksel beton; çimento, su, kum ve agrega gibi bileşenlerin fiziksel karışımıyla elde edilirken, geopolimer beton ise uçucu kül, yüksek fırın cürufu gibi mineral esaslı tozlar ile alkali aktivatörlerin kimyasal reaksiyonu sonucunda oluşmaktadır. Bu üretim yöntemi, daha düşük sıcaklıklarda gerçekleştiği ve çimento kullanımını ortadan kaldırdığı için hem daha az enerji tüketimi gerektirir hem de daha düşük karbondioksit emisyonuna yol açar. Bu nedenlerle geopolimer beton, son yıllarda sürdürülebilir inşaat uygulamalarında giderek daha fazla ilgi görmekte ve araştırılmaktadır. Ayrıca, geleneksel çimento üretiminde yaygın olarak kullanılan kalker rezervlerinin sınırlı olması ve bu kaynakların tükenme riski, alternatif bağlayıcı sistemlerin geliştirilmesini daha da önemli hale getirmiştir. Geopolimer beton yalnızca çevresel avantajlarıyla değil, aynı zamanda yüksek basınç dayanımı, iyi dayanıklılık özellikleri ve uzun ömürlü performansı ile öne çıkmaktadır. Bu yönleriyle, gelecekte geleneksel betonun yerini alma potansiyeli taşıyan güçlü bir alternatiftir.

Günümüzde çevre dostu ve sürdürülebilir yapı malzemelerine olan ihtiyaç, geleneksel çimento esaslı betonlara alternatif arayışlarını gündeme getirmiştir. Bu bağlamda geopolimer malzemeler, geleneksel betona kıyasla birçok özellik ile öne çıkmakta ve yapısal uygulamalarda kullanımları üzerine araştırmalar giderek artmaktadır. Ancak hem ulusal hem de uluslararası

literatürde, geopolimer kompozitlerin betonarme yapı elemanlarında, özellikle de yüksek kirişlerdeki performansına dair bilgi eksikliği bulunduğu görülmektedir. Bu eksiklik, sunulan tez çalışmasının temel çıkış noktasını oluşturmaktadır.

Son dönemde geopolimer malzemeler ve çeşitli yapı elemanları üzerinde birçok çalışma yapılmış olmasına rağmen, yüksek kirişlerdeki uygulamalarına yönelik kapsamlı araştırmalar oldukça sınırlıdır. Literatürde geopolimer kompozitlerin bazı betonarme elemanlardaki kullanımına ilişkin çalışmalar bulunsada özellikle çelik lif takviyeli geopolimer kompozitlerin yüksek kirişlerin kesme davranışı üzerindeki etkileri yeterince ele alınmamıştır.

Bu çalışmada ise geopolimer beton kavramı bir adım daha ileriye taşınmış ve lifli geopolimer beton teknolojisi kullanılmıştır. Lif katkıları, betonun çekme dayanımı, çatlak kontrolü ve sünekliği üzerinde olumlu etkiler yaratmakta, özellikle yüksek dayanım gerektiren yapısal elemanlarda performansı artırmaktadır.

Yüksek kirişler, binalar, köprüler, viyadükler ve diğer büyük ölçekli mühendislik yapılarında sıklıkla kullanılan, geniş açıklıkları geçebilen ve yüksek taşıma kapasitesine sahip yapı elemanlarıdır. Bu tür elemanlar hem düşey yükleri hem de yatay kuvvetleri karşılayarak yapı sisteminin genel stabilitesini sağlar. Ancak, yüksek kirişlerde oluşan kesme gerilmeleri, elemanın dayanım sınırlarını aşarsa çatlama veya kesme gibi ciddi yapısal hasarlara yol açabilir. Bu da yapı güvenliğini doğrudan etkileyen bir durumdur. Bu kapsamda yürütülen çalışmada, lifli geopolimer betondan üretilen betonarme yüksek kirişlerin kesme davranışı detaylı bir şekilde incelenmiştir. Deneysel çalışmalarda; etkili yükseklik/genişlik oranları, kesme açıklığı uzunlukları ile yatay ve boyuna donatı oranlarının bu özel beton türü üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, lifli geopolimer betonun yüksek kirişlerde kesme dayanımı açısından sunduğu avantajları ortaya koymakta ve bu yeni nesil yapı malzemesinin yapısal uygulamalardaki potansiyel kullanım alanlarını genişletmektedir.

Sunulan bu yüksek lisans tezinin amacı lifli geopolimer betondan üretilen yüksek kirişlerde, kesme açıklığı/derinlik (a/d) oranı, boyuna donatı oranı, enine donatının varlığı ve çelik lif oranının kesme davranışına etkisinin deneysel olarak incelenmesidir. Bu amaç doğrultusunda tüm karışımlarda bağlayıcı olarak yüksek fırın cürufu, metakaolin kullanılacaktır ve geopolimer beton yüksek kirişin yapısal davranışı deneysel olarak incelenmesi hedeflenmektedir. Geopolimer karışımlarda çelik lif kullanılacaktır. Çelik lif kullanımının kesme dayanımına etkisinin tespiti hedeflenmektedir. Bu tez çalışmasında farklı çelik lif oranları (%0, %0,5 ve %1) kullanılarak lif içeriğinin kesme davranışına etkisi analiz edilmiştir. Ayrıca, çalışmada etriyeli ve etriyesiz yüksek kirişler üretilerek farklı boyuna donatı oranları

kullanılan bu kirişlerde, donatı oranlarının ve etriye kullanımının yapısal davranış üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir.

Geopolimer yüksek kirişler, bu çalışma kapsamında öğütülmüş yüksek fırın cürufu esas alınarak üretilmiş, karışımlarda ayrıca kuvars tozu, atık mermer tozu gibi malzemeler de kullanılmıştır. Bu farklı bileşenlerin kesme dayanımına etkisinin belirlenmesi çalışmanın önemli hedeflerinden biridir. Tez çalışması, yukarıda belirtilen parametreler çerçevesinde sunulmuş ve yüksek kirişlerin kesme davranışına yönelik kapsamlı deneysel veriler elde edilmiştir.

Gerçekleştirilen üç noktalı kesme deneylerinde incelenen tüm kirişlerin kesme etkisi altında göçtüğü gözlemlenmiştir. Deneysel sonuçlar, genel olarak değerlendirildiğinde, lif katkısının kirişlerin çatlak gelişimi üzerinde belirgin bir etkiye sahip olduğu ve lif oranı arttıkça çatlakların daha ince ve yaygın dağıldığı tespit edilmiştir. Çelik lif oranı %0,5 seviyesinde kullanıldığında kirişlerin sünekliği ve enerji sönümleme kapasitesi anlamlı şekilde iyileşmiş, ancak lif oranının %1'e çıkarılması halinde beklenen performans artışlarının gözlemlenmediği belirlenmiştir. Ayrıca, etriyelerin varlığı yük taşıma kapasitesini ve sünekliği önemli ölçüde artırmış, boyuna donatı oranının ise kiriş davranışında kritik bir parametre olduğu ortaya konmuştur. Düşük a/d oranına sahip kirişler daha yüksek kesme kapasitesi sergilerken, a/d oranının artmasıyla birlikte dayanımda belirgin bir düşüş meydana gelmiştir. Genel olarak lifsiz kirişler gevrek ve ani bir göçme davranışı gösterirken, çelik lif katkılı kirişlerin yük-sehim ilişkisi bakımından daha sünek bir performans sergilediği sonucuna ulaşılmıştır.

Geleneksel betonla karşılaştırıldığında, geopolimer beton kullanılarak üretilen yapı elemanlarında daha yüksek performansların elde edilmesi, bu alandaki çalışmalar için önemli bir başarı ölçütü olarak değerlendirilmektedir. Farklı parametreler ve alternatif malzemeler kullanılarak gerçekleştirilecek araştırmalar, gelecekteki çalışmalara katkı sağlayacak akademik bir bilgi birikimi oluşturacaktır. Geleneksel betonarme elemanlara kıyasla, geopolimer betonarme kirişlerin daha yüksek dayanım seviyelerine ulaşabilmesi ise bu tez çalışmasının temel hedeflerinden biridir. Özellikle lif katkılı geopolimer betonla üretilen yüksek kirişlerin kesme davranışı üzerine yapılan çalışmaların sınırlı olması, bu alanda özgün bir katkı sunma gerekliliğini ortaya koymaktadır. Bu doğrultuda, çalışmada ele alınan geopolimer esaslı yüksek kirişlerde, geleneksel betona göre farklı malzemelerin kullanılması; daha iyi mekanik performans elde edilmesi ve çevre dostu yapı malzemelerinin geliştirilmesine katkı sağlanması açısından önemli bir adımdır. Elde edilecek bulgular, bu doğrultuda yapılan literatüre katkı sağlamayı ve sürdürülebilir yapı teknolojilerine yönelik yeni yaklaşımlar sunmayı amaçlamaktadır.

Araştırmanın Önemi ve Gerekçesi Sunulan bu yüksek lisans tezinin özgün değeri, yenilikçi, araştırmalarda merak konusu haline gelen, sürdürülebilir ve çevre dostu bir malzeme olan geopolimer betonun yüksek kirişlerde uygulanması üzerinedir. Geopolimer beton kavramı bir adım daha öteye taşınarak lifli geopolimer beton teknolojisi ile yüksek kirişler üretilecektir. Bu çalışmada lifli geopolimer beton ile üretilecek yüksek kirişlerin kesme davranışı üzerine çalışılarak, kısıtlı kaynak bulunan bu konuda literatüre katkıda bulunulacaktır.

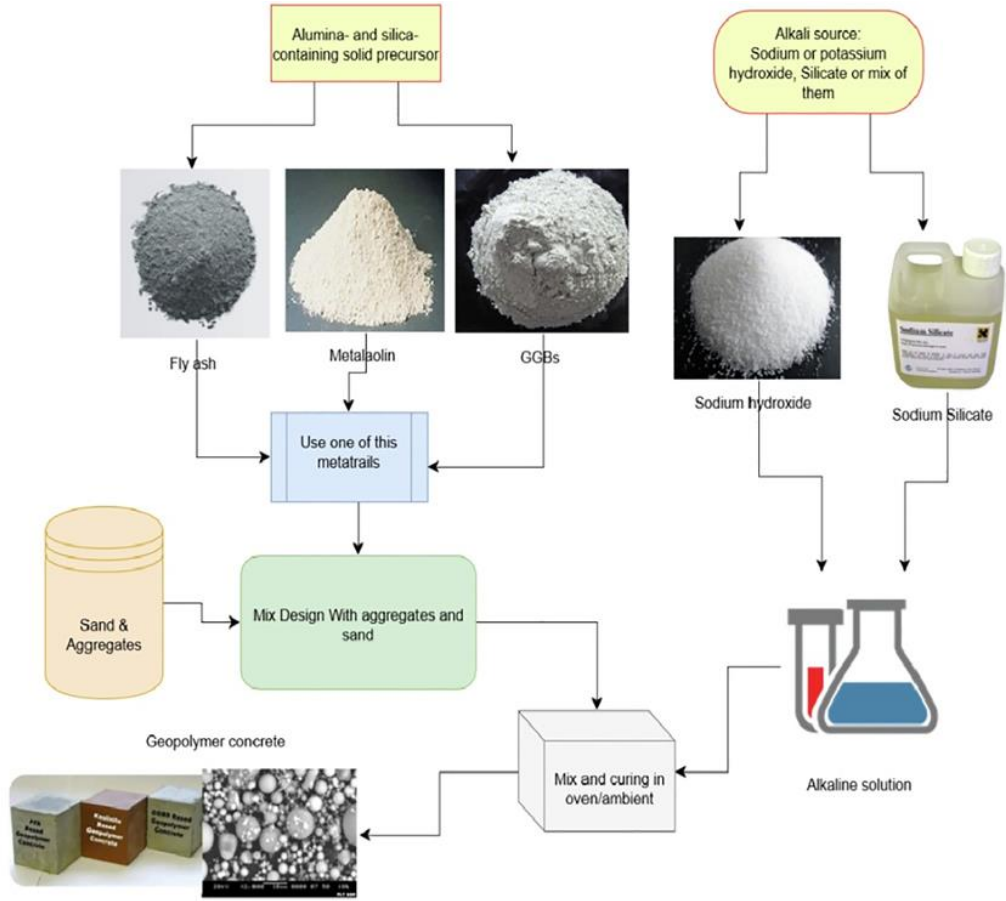


KURAMSAL TEMELLER

Geopolimer

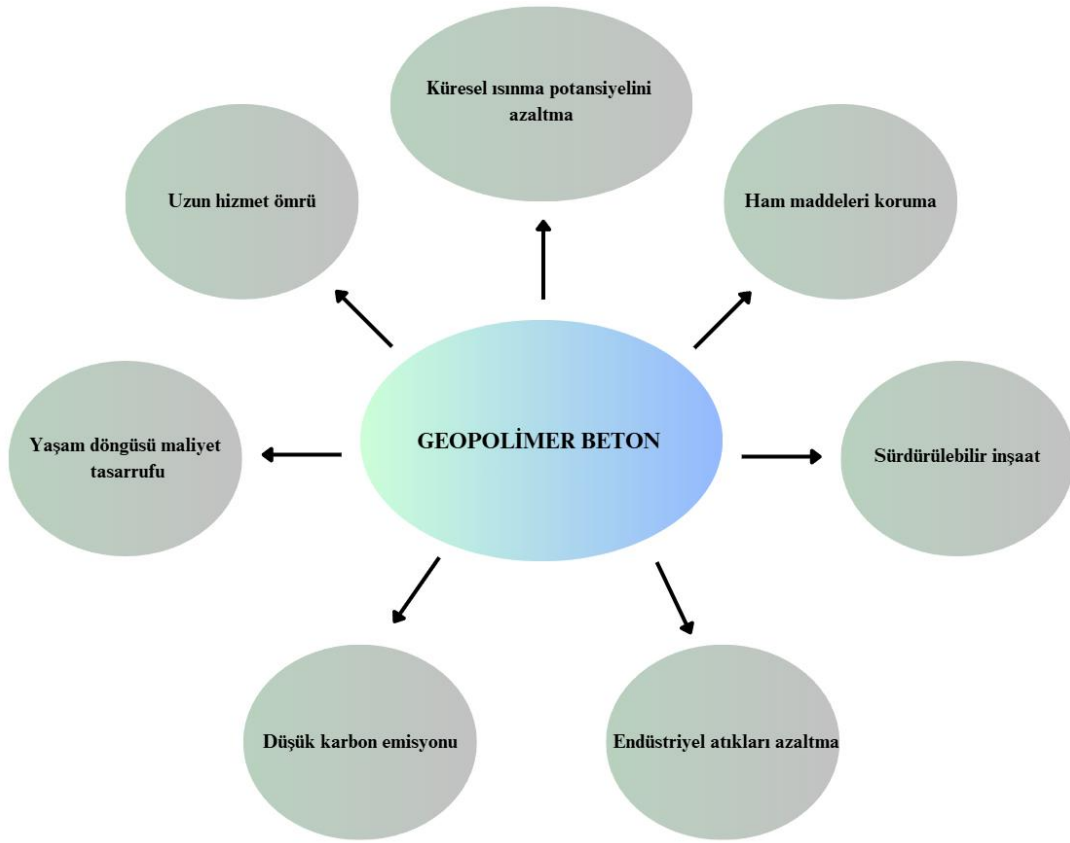
Geleneksel çimento, betonun ana bileşendir ve üretimi için vazgeçilmezdir. Küresel karbondioksit emisyonunun yaklaşık %3,4' ü çimento üretiminde fosil yakıtların kullanılmasından ve üretim sırasındaki diğer süreçlerden kaynaklanmaktadır (Hanle *et al.* 2004). Bundan dolayı kullanılan çimento miktarının azaltılması veya tamamen bırakılması gerekmektedir (Parathi *et al.* 2021) Bu süreç sonunda ortaya çıkan karbondioksit miktarını azaltmak ve daha çevreci bir beton üretebilmek adına geleneksel çimento yerine alternatif bağlayıcı malzeme arayışları ortaya çıkmıştır (Sümeyye 2024). Çimento yerine kullanılabilir olacak geopolimer malzemeler, çimento üretimiyle ilişkili olan karbondioksit emisyonunu %80 oranında azaltabilir. (Kantarcı 2021).

Geopolimer malzemeler, geleneksel çimento ile karşılaştırıldığında daha çevreci olması ve üretim sürecindeki çıkan karbondioksit miktarının düşük olmasından kaynaklı yapı malzemesi olarak ilgi çekici hale gelmektedir. (McNulty 2009). Buna ek olarak, geopolimer malzemeler farklı atık çeşitlerinden veya işlenmemiş doğal malzemelerden elde edilmesinden kaynaklı çevreye olan etkisi bakımından geleneksel çimentodan farklı bir önemi vardır (Kaur *et al.* 2018). Geopolimer terimi 1970'li yıllarda Fransız bilim insanı Joseph Davidovits tarafından ilk defa ortaya atılmış ve üzerinde çalışmalar yapılarak geliştirilmiştir. Geopolimer malzemeler, alüminosilikat bileşeninin (örneğin yüksek fırın cürufu, silis dumanı vb.) bir alkali aktivatör ile reaksiyona girmesi sonucu ortaya çıkan üç boyutlu bir inorganik polimerlerdir. (Davidovits 1991, 1994). Bu kimyasal reaksiyon, bir polimerizasyon süreci olduğundan bu yenilikçi bağlayıcıyı Davidovits “geopolimer” olarak adlandırmıştır. (Davidovits, 1988; Davidovits 1994). Silis ve alümin içeren bileşenler alkali bir ortamda polimerizasyon olarak bilinen hızlı bir kimyasal reaksiyon gerçekleştirir. Bu reaksiyon Si-O-Al-O bağlarından oluşan üç boyutlu bir polimerik zincir ve halka yapılı yeni bir bileşik oluşumuna yol açar (Davidovits, 1988). Yüksek fırın cürufu, uçucu kül, silis dumanı, pirinç kabuğu külü gibi alüminosilikat içeriği yüksek endüstriyel ve tarımsal atıklar ve doğal puzolanlar geopolimerizasyon sürecinde oldukça fazla kullanılan hammaddelerdir (Adjei *et al.* 2022). Geopolimer malzemelerde hammadde olarak çeşitli endüstri ve tarımsal süreçlerden elde edilen atık malzemelerin kullanılması geri dönüşüm için önem arz etmektedir. (Almutairi *et al.* 2021). **Şekil 1'de** geopolimer malzemenin üretim aşaması verilmiştir (Singh *et al.* 2020)



Şekil 1. Geopolimer malzemenin üretim aşaması (Singh *et al.* 2020)

Atık malzemelerin beton üretiminde kullanılması ve bertaraf edilmesi arazi kirliliğini azaltır. Bu nedenle, inşaat sektöründe geopolimer kullanımı çevresel sürdürülebilirlik açısından oldukça önemlidir (Patel *et al.* 2018). Geopolimer malzemenin tercih edilmesi, çevreci ve geleneksel çimentoya alternatif bir bağlayıcı olarak kullanılmasından kaynaklanmaktadır. (Thakur R.N. ve Ghosh S. 2009). **Şekil 2’de** geopolimer malzemenin sektöre faydaları verilmiştir. (Singh *et al.* 2020)



Şekil 2. Geopolimer malzemenin sektörde faydası (Singh *et al.* 2020)

Geopolimer malzemeler; yüksek basınç dayanımı, aşınmaya karşı yüksek direnç, hızlı ve kontrol edilebilir priz alma süreci, 1000°C'ye kadar çıkan yüksek yangın dayanımı hem saf hem de kompozit formda toksik etkiler içermemesi gibi belirgin avantajlara sahiptir. Ayrıca, birçok asit ve tuz çözeltilerine karşı güçlü bir direnç gösterirken, zararlı alkali-agrega reaksiyonlarına yol açmamasıyla da öne çıkmaktadır. Bununla birlikte, düşük kuruma büzülmesi, düşük termal iletkenliği, yüksek pH seviyesi ve düşük klor geçirgenliği sayesinde çelik donatının korozyona karşı korunması gibi avantajları da vardır (Duxson *et al.* 2007). Tüm bu özellikler, geleneksel çimento yerine geopolimer malzeme kullanımının performansı artıracağını göstermektedir. **Tablo 1'de** Geleneksel beton ile geopolimer betonun bazı yönlerden karşılaştırması verilmiştir.

Tablo 1. Geleneksel Beton ile Geopolimer Betonu Karşılaştırılması (Imtiaz *et al.* 2020)

Özellikler	Geleneksel beton	Geopolimer beton	Etkileyen faktörler
Priz Süresi	Yavaş	Hızlı	Alüminosilikat çeşidi, Alkali aktivatörlerin oranı
Basınç Dayanımı	Düşük	Yüksek	Öncül madde kaynağı, Öncül madde reaktivitesi, Aktivatörlerin türü ve oranları, Kürlenme koşulları
Çekme Dayanımı	Düşük	Yüksek	Öncül madde kaynağı, Öncül madde reaktivitesi, Aktivatörlerin türü ve oranları, Kürlenme koşulları

Tablo 1. (devamı)

Su Emme	Biraz daha düşük	Orta	GPC'nin iç yapısı ve gözenek düzeni
Büzülme	Düşük	Orta	Kürleme koşulları
Gözeneklilik	Düşük	Orta	İç yapısı ve gözenek düzeni
Asit Direnci	Düşük direnç	Yüksek direnç	Alüminosilikat bazlı ürünler
Donma-Çözünme Döngüsü	Daha hassas	Daha az hassas	Çevre koşulları
Dayanıklılık	Düşük	Orta	Alüminosilikat bazlı kimyasal ürünler
Yangın Direnci	Sınırlı	Genellikle yüksek	Alüminosilikat öncül maddesi türü
Yalıtım Özelliği	Sınırlı	Yüksek	Öncül madde türü, Aktivatör türü, Kürleme şartları
CO ₂ Emisyonu	Yüksek	Düşük	Alkali aktivatör içeriği, Kürleme şartları
Zamana Bağlı Bozulma	Yüksek	Düşük	Isıtma sırasında geleneksel betonda geopolimer betona kıyasla aşırı yaş bozulması ve karbonatlaşma görülür

Geopolimer tarihçesi

1930'larda, NaOH ve KOH gibi alkali maddeler, başlangıçta yüksek fırın cürufunun geleneksel çimentoya eklenerek, cürufun sertleşip sertleşmeyeceğini test etmek amacıyla kullanılıyordu. (Davidovits 2020). 1940 yılında Purdon, geleneksel çimentola ile yapılan çalışmaların dışında katıların alkali aktivasyonu ile elde edilen cüruf bazlı bağlayıcıları keşfetti. (Provis & van Deventer, 2009). 1949'da Borchert ve Keidel, NaOH ile kaoliniti tepkimesi sonucu hidrosodalit (Na-PS) elde ettiler. 1950'lerde ise artık alkali aktive cüruf çimentoları inşaat sektöründe yerini almaya başlamıştır (Davidovits, 2011). 1950'lerin başlarında alkali ile aktive edilmiş yüksek fırın cürufu çimentolar büyük hacimli yapılarda uygulanmıştır. Bu çimentolar trief çimentoları olarak da isimlendirilmektedir. 1950'li yıllarda, ABD ordusu mühendisleri, su kanalları deneyleri için yaygın olarak kullanılan %97 öğütülmüş cüruf karışımına %1,5 NaCl ve %1,5 NaOH oranının kullanılmasını istemekteydiler (Davidovits 2020). 1957 yılında Kiev İnşaat Mühendisliği Enstitüsü'nde görev yapan Victor Glukhovsky, alkali ile aktive edilen cüruf bazlı bağlayıcılar üzerine çalışmalar yapmıştır. Glukhovsky bu araştırmalarıyla 1960'lı ve 1970'li yıllarda hem kalsiyum-silikat hidrat hem de kalsiyum ve sodyum alümino-silikat hidrat (zeolit)'ın katılaşma ürünü olduğunu keşfederek literatürdeki mevcut bilgi birikimine önemli bir ekleme yapmıştır (Davidovits, 2011). 1963 yılında Howell,

metakaolin kullanarak A tipi Zeolit sentezledi 1969'da ise Besson, Caillere ve Henin, 100 C°'de ve konsantre edilmiş sodyum hidroksit (NaOH) içerisinde çeşitli phyllosilikatlardan hidrosodalit elde etmek için çeşitli çalışmalar yürütmüşlerdir. 1970-72 yılları arasında Fransa'da büyük ölçekte organik plastiklerin neden olduğu yangınlar sonrasında, Prof. Dr. Joseph Davidovits, yangına dayanıklı plastikler üzerinde araştırmalar yapmaya yönelmiştir. Daha sonra bu araştırmalar akabinde Davidovits geopolimer olarak isimlendirdiği yeni bir bağlayıcı malzemeyi literatüre kazandırmıştır. 1972 yılında a Jean Paul Latapie ve Michel Davidovics düşük sıcaklıklarda su geçirmez seramikler üretmeyi başarmıştır. 1988'de ise bu alandaki önemli çalışmalardan olan geopolimer konferansı Davidovits ve Orlinski tarafından düzenlenmiş ve 1991 yılında Davidovits tarafından yapılan çalışmalara genel bir bakış olarak geopolimerler üzerine önemli bir inceleme makalesi yayımlamıştır. 1992 ile 2006 yılları arasında metakaolin bazlı geopolimerler üzerine birçok bilimsel çalışma yayımlanmış, bu dönemde Palomo, Glasser, Rahier, Barbosa, MacKenzie, Kaps, Buchwald, Yip, Van Deventer gibi birçok araştırmacı önemli katkılar sağlamıştır. 1999-2005 yıllarında Davidovits tarafından düzenlenen geopolimer konferansları, geopolimer teknolojisinin küresel anlamda büyümesini ve teknik gelişmeleri hızlandırmıştır (Provis & van Deventer, 2009). Günümüzde ise geopolimerler, gerek akademik gerekse endüstriyel alanda büyük ilgi görmekte ve üzerine yapılan çalışmalar artmaktadır. (Kuranlı 2020)

Geopolimer kimyası

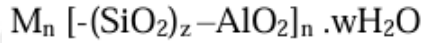
Gepolimer beton, üçüncü nesil çimento olarak kabul edilen yeni bir yapı malzemesinin kullanılmasıyla birlikte ortaya çıkan yeni bir beton türüdür. Ortaya çıkan bu yeni beton türü amorf yapıda bir alüminosilikat malzemedir. Bu malzeme birçok farklı şekilde isimlendirilse de gerçekleşen reaksiyon, oluşacak ürün aynıdır ve tekrar şeklinde oluşan sialate monomer birimden ($-Si-O-Al-O-$) oluşur. (Singh *et al.* 2015). Üretilen geopolimer malzemenin istenilen özellikte olması; katı hammadde karışım oranları, kullanılacak kimyasal malzemelerin gereken molar oranlarda karıştırılarak tepkimeye sokulması, maruz bırakılacak olan ısıl kürün işlem ısısı ve süresine bağlı olarak farklılık gösterecek olan molekül yapıya bağlıdır (Görür 2015). Geopolimerizasyon sürecini etkileyen faktörler aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

- Alüminosilikat içeren hammaddelerin türü
- Katı hammaddelerin özgül yüzey alanı
- Hammaddelerdeki camsı faz içeriği
- Reaktif silisyum ve alüminyum miktarı
- Uçucu kül içindeki demir, kalsiyum ve inert parçacıkların varlığı
- Kür sıcaklığı, basıncı, süresi ve türü

- Alkali türü ve konsantrasyonu
- Alkali sıvı / hammadde oranı
- Na₂O / SiO₂ oranı
- SiO₂ / Al₂O₃ oranı

Geopolimer malzemeler içerdikleri silis, alüminyum ve oksijen elementlerinden dolayı inorganik alüminosilikat malzemeler sınıfına girerler. Davidovits, bu tür malzemelerin kimyasal yapısını tanımlamak için “poly(sialate)” terimini ortaya atmıştır. 3 boyutlu bir sialate ağına sahip olan geopolimer yapısının atomsal yapısı amorf tan yarı kristale kadar değışiklik gösterebilir. Si-O-Al yapısını meydana getirmek amacıyla yapısındaki oksijen atomlarının paylaşılmasıyla değışimli olarak bağlanan tetrahedral (dört yüzlü) SiO₄⁴⁻ ve AlO₄⁵⁻ geometrik yapılarından oluşur. (Thang, 2016)

Geopolimerin ampirik formülü Şekil 3’te verilmiştir.



Şekil 3. Geopolimerin ampirik formülü

M: alkali metal katyonu, n: polikondensasyon derecesini, w: kimyasal bağ ile bağli su molekül sayısı ,z ise 1, 2, 3 silikon-alüminyum oranını (Si/Al) (Davidovits, 1999).

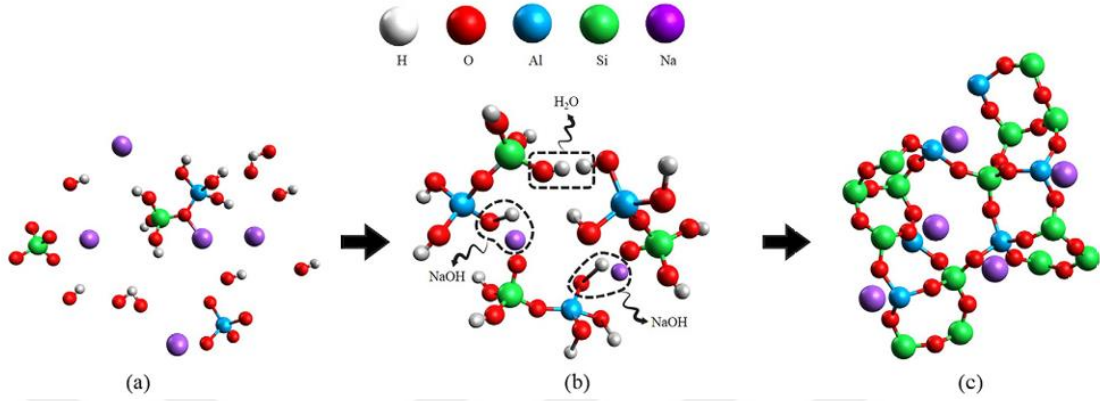
Alkali koşullarda silis ve alümin içeren minerallerin hızlı bir reaksiyon sonucu Si-O-Al bağlarından oluşan, üç boyutlu polimerik zincir ve halka yapısına sahip bir bileşik meydana getirmesine geopolimerizasyon denir. (Rangan 2010). Geopolimerizasyon işlemi, katı bir alüminosilikat malzemenin yüksek bazik ortamda tepkimesi sonucu amorf tan yarı kristale doğru inorganik polimerler oluşturmasını esas alır. (Duxson *et al.* 2007).

Araştırmacılar arasında birtakım fikir ayrılıkları olsa da geopolimerizasyon sırasında gerçekleşen reaksiyonları temel olarak üç aşamaya ayrılmaktadır.

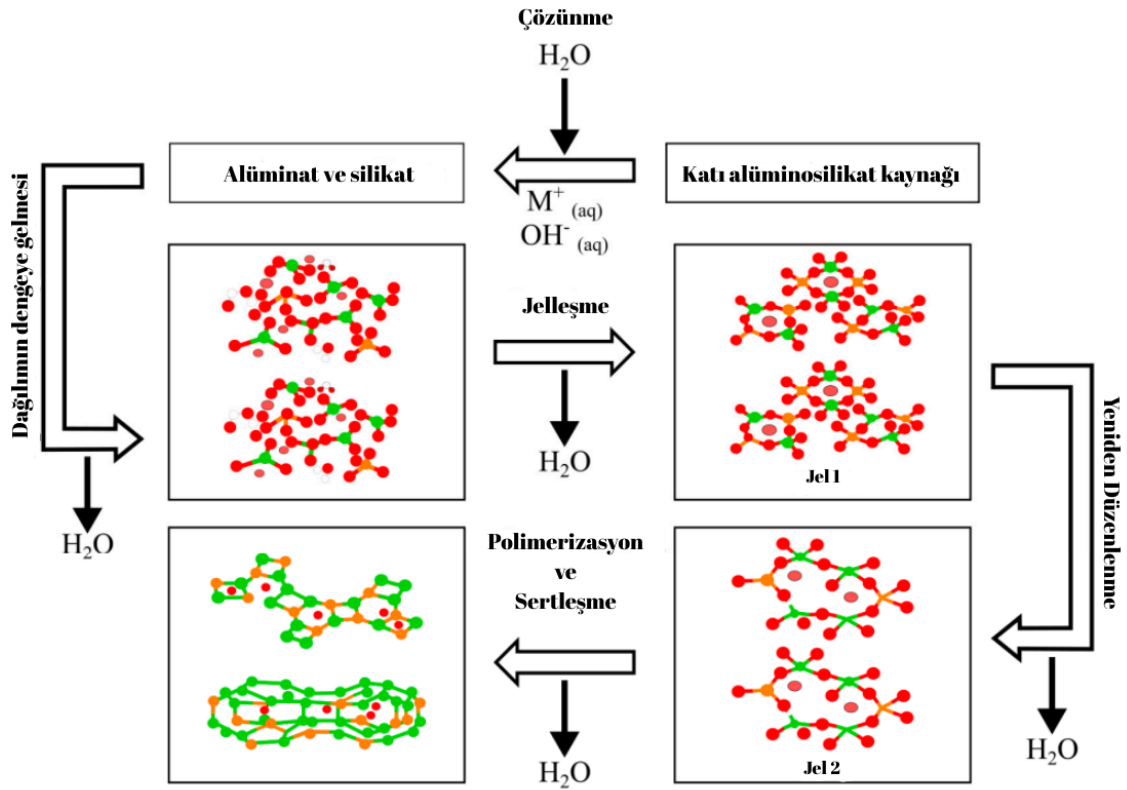
- (1) Alüminosilikat hammaddeleri alkali aktivatörün etkisiyle çözünerek tetrahedral ([SiO₄]⁻ ve [AlO₄]⁻) birimlerini oluşturur.
- (2) Malzemelerin taşınması, katı bir hal alması / jelleşmesi, alümina ve silikanın yoğunlaşma reaksiyonu inorganik geopolimerin jel fazını oluşturur. Bu aşamada, yapıdan dehidrasyon yoluyla hidratlı jelin oluşumuna yardımcı olan su boşaltılır (Cong ve Cheng).
- (3) Jelleşme sürecini takiben, jel ağındaki bağlantı sayılarının artması sistemin yeniden yapılanmasına neden olur ve polikondensasyon sonucu polimerik Si-O-Al-O bağları oluşur. Bu da sıklıkla bir geopolimer oluşturan üç boyutlu alüminosilikat ağı oluşturmak üzere yoğunlaşır. Gerçekleşen bu süreçler, elde edilen malzemenin

fiziksel ve kimyasal özelliklerini belirleyen mikro yapısal karakteristikler ile gözenek boyutu ve dağılımı üzerinde önemli bir rol oynar. (Duxson *et al.* 2007).

Geopolimerizasyon süreciyle ilgili birkaç gösterim Şekil 4, Şekil 5 ve Şekil 6’da verilmiştir.

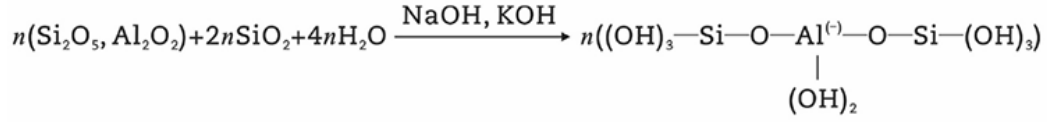


Şekil 4. Geopolimerizasyonun şematik bir gösterimi: (a) Alüminosilikatin tekrardan düzenlenmesi (b) jel oluşum fazının başlangıcı ve oligomerlerin oluşumu (c) polimerizasyon

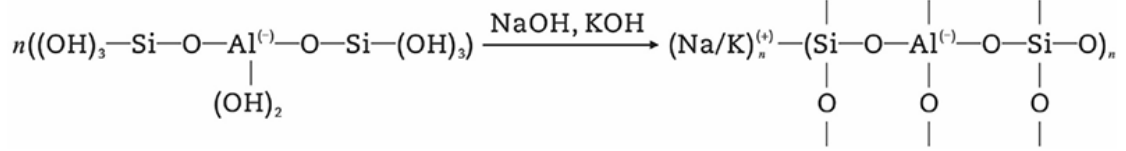


Şekil 5. Geopolimerizasyonun için kavramsal bir model (Abdila *et al.*)

(a)



(b)



Şekil 6. Geopolimer malzeme oluşumunun şematik bir gösterimi (Zhang *et al.*, 2018d).

(a) Geopolimer öncüsü (b) Geopolimer omurgası

Geopolimer bileşenleri

Geopolimer beton üretimi için iki ana bileşen gereklidir. Bunlar alüminosilikat kaynağı kaynak malzeme ve alkali aktivatör sıvısıdır (Kuranlı 2020). Kaynak malzeme olarak, silis ve alümin içeriği yüksek endüstriyel atıklar (uçucu kül, yüksek fırın cürufu, silis dumanı, pirinç kabuğu külü gibi) ile jeolojik kökenli malzemeler kullanılmaktadır. Diğer bir bileşen olan aktivatör sıvısı olarak ise sodyum hidroksit (NaOH) çözeltisi, sodyum silikat (Na_2SiO_3) çözeltisi, potasyum hidroksit (KOH) veya potasyum silikat (K_2SiO_3) çözeltileri çok yaygın olarak kullanılmaktadır. Üretim aşamasında bu aktivatör sıvılar yalnız kullanılabildiği gibi belirli oranlarda birleştirilerek iki aktivatör sıvısı beraber de kullanılabilir. (Yılmazoğlu 2022)

Tablo 2. Geopolimerlerin Sentezlenmesi için Kullanılan Bazı Malzemeler (Kuranlı 2020)

Alüminosilikat kaynak malzemesi	Alkali aktivatör
• Kalsine killeri • Uçucu kül • Pirinç kabuğu külü, • Metakaolin • Bakır madeni atıkları • Yüksek fırın cürufu • Metakaolin • Silis Dumanı • Kırmızı çamur	• Sodyum hidroksit (NaOH) • Sodyum silikat (Na_2SiO_3) • Potasyum hidroksit (KOH) • Potasyum silikat (K_2SiO_3) • Kalsiyum hidroksit ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) • Diğer silikatlar

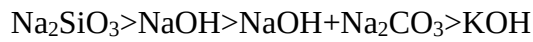
Tablo 2’de geopolimer sentezi için kullanılan iki ana bileşen için bazı örnekler verilmiştir.

Geopolimer sentezinde kaynak malzeme olarak kullanılan alüminosilikatlar, doğada kendiliğinden bulunan ya da ısıtma işlem sonucu oluşan amorf yapıdaki malzemelerdir. Bu

malzemeler silis (Si) ve alüminyum (Al) içeriği açısından oldukça zengindir ve içeriğinde kalsiyum (Ca) miktarı oldukça az ya da hiç yoktur (Palomo 1999). Günümüzde endüstriyel işlemler sonucunda ortaya çıkan birçok katı atık arazine işgaline sebep olmakla birlikte çevreye de zarar vermektedir. Geopolimer malzeme üretiminde bu katı atıkların kullanılarak değerlendirilmesi bu zararları ortadan kaldırmak için etkili bir yöntemdir. (Cong and Cheng 2021). Geopolimer malzeme üretiminde kaynak malzemelerin seçimi oldukça önemli bir husustur. Gerçekleşen reaksiyon sonucu ortaya çıkan ürünlerin, taze malzemenin özelliklerinin ve mekanik özelliklerinin belirlenmesinde hayati bir önemi vardır. Kaynak malzemenin sahip olduğu temel farklılıklar, ortaya çıkan yeni malzemenin genel performansı üzerinde önemli etkiye sahip olan çeşitli kimyasal bileşimler ortaya koyar. Geopolimer malzemenin etkilendiği başlıca özellikler; içerdiği kalsiyum (Ca) miktarı, amorf içeriği, morfolojisi ve malzemenin kökenidir (van Jaarsveld *et al.* 2003). Geopolimerler, daha önce de belirtildiği gibi metakaolin, uçucu kül, cüruf ve silis dumanı dahil olmak üzere yüksek silis (Si) ve alüminyum (Al) içeriği bulunduran birçok farklı kaynak malzemeler kullanılarak üretilir. Geopolimer malzeme üretiminde seçilecek olan kaynak malzemeye, ilk olarak performans, kullanılabilirlik, bulunabilirlik ve maliyet göz önünde bulundurularak karar verilir (Odeh *et al.* 2024).

Geopolimerizasyon reaksiyonunda kullanılacak olan alüminosilikat kaynaklarının seçeneği, son zamanlarda oldukça artmıştır. Geleneksel çimento karışımlarında kullanılan malzemeler olmamasına talepte yaşanan çatışmadan dolayı özellikle vurgu yapılmıştır. Bununla birlikte, farklı tipteki kaynaklar, çok farklı kimyasal yapı ve reaksiyon mekanizmalarına sahiptir. Geopolimer sistemlerin sınıflandırılmasında, kaynak malzemenin yapısında bulunan kalsiyum miktarı belirleyici bir unsur olarak öne çıkmaktadır. Kalsiyum (Ca) içeriği düşük olan sistemlerde reaksiyon sonucu sentezlenen ürünler (alkali ile aktive edilmiş F sınıfı uçucu kül, metakaolin, kırmızı çamur, doğal puzolan, vb. gibi) genellikle yüksek derecede çapraz bağ yapısına sahip ve zeolit benzeri yapı sergileyen N-A-S-H jelleridir. Buna karşılık kalsiyum (Ca) içeriği yüksek olan sistemler (alkali ile aktive edilen C sınıfı uçucu kül, yüksek fırın cürufu vb.) tobermorit benzeri kristal bir yapıya sahip C-S-H jelleri şeklinde sentezlenmektedir. Bu sentez sonucu oluşabilen farklı iki tip jel, alkali ile aktive edilmiş harmanlanmış sistemlerde birlikte bulunabilir ve ana aktivasyon ürününün kalsiyum oksit (CaO) içeriğinin artmasıyla N-A-S-H jelinden C-S-H jeline dönüşebilir (Chen *et al.*). Alkali aktivatörler geopolimerizasyon reaksiyonu için gerekli diğer bir ana bileşendir. Alkali aktivatörler, reaksiyonu başlatmak kaynak malzemenin çözünme işlemini hızlandırmak ve jel oluşumuna yönlendirmek gibi görevler üstlenmektedir (Yuan *et al.* 2021). Geopolimer malzemenin gücü kullanılacak olan aktivatörle ilişkilendirilmektedir. Son derece konsantre alkali ortam, hammaddeler için uygun hidroliz sağlayacaktır. Alkali aktivatör olarak, sodyum silikat

(Na_2SiO_3), sodyum hidroksit (NaOH), potasyum silikat (K_2SiO_3) ve potasyum hidroksit (KOH), alüminyum (Al) ve silisyum (Si) oksitleri çözmek için reaksiyona dahil edilir (Ghafoor vd. 2021). Si^{4+} ve Al^{3+} iyonlarının çözünürlüğü, sodyum çözeltilerde potasyum çözeltilerinden daha yüksektir. Bundan dolayı, genellikle sodyum hidroksit geopolimer beton üretiminde kullanılır. Maliyeti yüksek bir malzeme olduğundan geopolimer beton için, sodyum silikat ve sodyum hidroksit kombinasyonu aktivatör çözeltisi olarak kullanılır (Parathi *et al.* 2021). Alkali aktivatörün türü ve konsantrasyonu polimerizasyon sürecini yönlendirir. Aktivatörlerin aktivasyon potansiyeli, özellikle basınç dayanımı açısından değerlendirildiğinde ve eşit konsantrasyonlara sahip olduğunda aşağıdaki gibi bir sırlamaya yapılmaktadır (Singh & Middendorf, 2020):



Geopolimer kullanım alanları

Geopolimerlerin araştırmalara konu olmasından bu yana, geopolimer ve geopolimer katkılı malzemeler birçok farklı alanda kullanılmıştır. Fransa’da 1970-1993 yıllarında meydana gelen ve organik esaslı plastiklerin sebebiyet verdiği büyük çaptaki yangınlar sonrasında yanmaz malzemelerin üretimi üzerine çalışmalar yapmaya başlamıştır. Geleneksel çimentoya alternatif bir bağlayıcı olan geopolimerlerin üzerine yoğunlaşmıştır (Davidovits 2002). Bununla birlikte geopolimerlerin sahip olduğu birtakım üstün özellikler (termal ve kimyasal direnç, yüksek basınç dayanımı, geopolimerlerin atık ürünler kullanılarak üretilmesi gibi sağladığı ekonomik avantajlar ve düşük karbon emisyonu vb.) sayesinde büyük bir potansiyele sahiptir. Bu potansiyel sayesinde ticari uygulamalarda kullanılabilir olması da oldukça umut vericidir. (Hassan *et al.*, 2019a). Günümüze kadar kullanılan geleneksel bağlayıcılarla kıyaslandığında mühendislik alanında kullanım miktarı artmıştır (Nawaz *et al.* 2020). Geopolimerin kullanım alanları genel olarak; ön germeli köprüler, hava yolları, dayanma duvarları, zemin stabilizasyonu, tehlikeli ve radyoaktif atıkların stabilizasyonu gerektiren betonlar, prefabrik bina inşaatları ve petrol kuyularıdır (Görür 2025, Irmak 2024).

Şekil 7’de görülen 4 katlı bina yapımında yalnızca geopolimer malzeme kullanılarak inşa edilmiştir. Bu yapı dünyada ilk kabul edilir. 2013 yılında Bligh Tanner ile Wagners inşa etmiştir (Eryılmaz 2023).



Şekil 7. Ödüllü Queensland Üniversitesi'nin Küresel Değişim Enstitüsü (GCI) binası (Avustralya)

Şekil 8'deki resimde gösterilen Brisbane West Wellcamp Havaalanı (BWWA), Avustralya'da 48 yıl içinde yapılan ilk yeşil havaalanı niteliğindedir. Tam faaliyete Kasım 2014'te geçmiştir. Projede yaklaşık 40.000 m³ geopolimer beton kullanımıyla yapılmıştır ve kullanılan bu miktar onu bu yenilikçi beton türünün dünyadaki en büyük uygulamalarından biri haline getirmiştir. Bu uygulama alanı için büyük bir dönüm noktası olmaktadır (Glasby *et al.* 2015).



Şekil 8. Brisbane West Wellcamp havalimanı (BWWA) (Avustralya)

Avustralya'da hem prefabrik ürünlerde hem de yerinde döküm yapılar için geopolimer betonun geliştirilmesi ve denenmesi başarıyla gerçekleştirilmiştir. Rocla firması; geopolimer

beton kullanarak kanalizasyon boruları (Şekil 9), demiryolu traversleri (Şekil 10), mezar kasaları, kutu menfezler ve duvar panelleri üretmiş ve bu ürünlerin saha denemelerini başarıyla tamamlamıştır (Gourley 2014).



Şekil 9. Kanalizasyona geopolimer malzemeden üretilen beton borular yerleştirilirken (Toowoomba, Queensland, Avustralya)

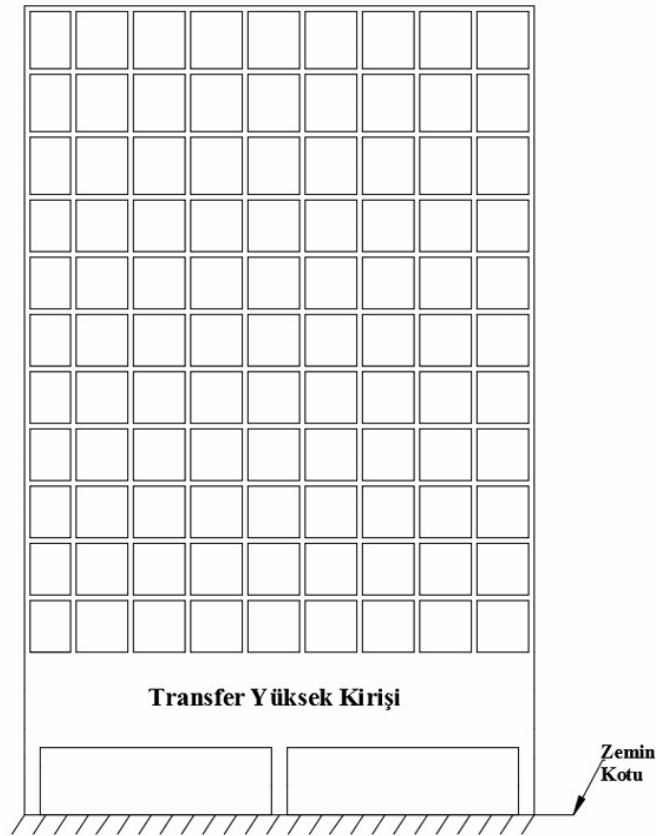


Şekil 10. Ön gerilimli geopolimer beton demiryolu traversleri. (Goulburn, NSW,Avustralya)

Yüksek Kiriş

Günümüzde artık yüksek yapıların inşasına duyulan ihtiyaç artmış ve bu tür yapılar için yeni taşıyıcı sistemlerin geliştirilmesi gerekli hale gelmiştir. Bu sistemler arasında tüp sistemler (birbirine geçmiş çerçeveler), perde duvar çerçeve sistemleri (karma sistemler) ve çapraz

elemanlarla güçlendirilmiş çerçeve sistemleri yer almaktadır. Perde duvarlı sistemler, dış yüklerin karşılanması oldukça başarılıdır. Bu yapısal sistemler genellikle perde çekirdek etrafına sıkça yerleştirilen kolonlarla oluşturulur. Ancak, bu kolonların zemin ve bodrum katlarında sık aralıklarla yer alması, insanların serbestçe hareket edebileceği açık alanların oluşmasını engelleyebilmektedir (Yılmaz 2016). Mimari nedenler gereğiyle özellikle geniş açıklığa ihtiyaç duyulan yapılarda (otellerdeki lobiler, balo salonları ve otopark gibi) bu kolon sıklığı istenmemektedir. Bu yüzden, üst katlardaki kolonların yüklerini zemin katlardaki diğer kolonlara aktarabilmesi için yüksek eğilme ve burulma rijitliğine sahip kirişlerin oluşturulması gerekmektedir. Yüksek kesme dayanımı açısından transfer kirişi olarak öncelikle yüksek kirişler tavsiye edilir. Yapılan son çalışmalarda da yüksek kirişlerin mühendislik alnındaki önemi vurgulanmaktadır (Husem et al 2022). Betonarme yüksek kirişler; yüksek yapılarda transfer kirişi, köprülerde kolon üstü başlık kirişi, perde temeli, temel kazık başlıkları, silolar, su tankları duvarları, kıyı ve liman yapıları gibi çeşitli alanlarda yapı elemanı olarak uygulanmaktadır (Demir 2018).



Şekil 11. Yüksek yapıda transfer yüksek kiriş örneği (Yılmaz 2016)



Şekil 12. Yüksek kirişin başlık kirişi olarak köprüde kullanımına bir örnek (Yılmaz 2016)

Şekil 11 ve **Şekil 12**'de yüksek kirişe ait resimlere yer verilmiştir.

Betonarme yüksek kirişler nispeten derin ve kısa olması ile karakterize edilir. (Abuwarda 2019) Büyük derinliğe sahip kirişler, açıklıkla (l) ilişkili olarak veya kesme açıklığının faydalı yüksekliğe oranına (a/d) bağlı olarak yüksek kiriş olarak adlandırılmaktadır.

Tek donatılı dikdörtgen kirişlerin a/d oranlarına uygun olarak aşağıdaki şekilde sınıflandırılabilir (Nawy, 2009).

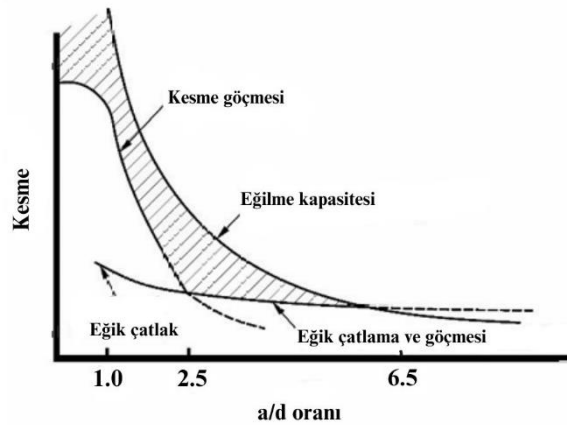
- i. Yüksek kirişler: $1 < a/d < 2.5$
- ii. Orta Seviye Narin Kirişler: $2.5 < a/d < 5.5$
- iii. Narin Kirişler: $a/d > 5.5$

Yüksek kirişler, temel olarak kesitin derinliği boyunca gerilim dağılımının doğrusal olmamasından kaynaklı farklı yönetmeliklerde farklı olarak tanımlanmaktadır. ACI 318-14 (Amerikan) yönetmeliğinde yüksek kirişler; net açıklığının (l_n) kiriş yüksekliğine (h) oranı 4 ya da daha az olması durumunda veya kesme açıklığının (a) kiriş yüksekliği (h) oranı 2 ya da daha az olan kirişler olarak tanımlanmaktadır (Abuwarda 2019). EN 1992-1-1 (2004) yönetmeliğinde ise, toplam açıklığın (l) kirişin yüksekliğine (h) oranı 3 ya da 3'ten küçükse yüksek kiriş olarak tanımlanmıştır (Akkaya 2023). CSAA23.3-04.(Kanada) yönetmeliğinde net açıklığı (l_n), yüksekliğin (h) 2 katından küçük olanlar yüksek kiriş olarak tanımlanmıştır (Yılmaz 2016). Son olarak TS500 standartlarına göre net açıklığı (l_n), toplam yüksekliğinin (h) 2,5 katından küçük olan sürekli kirişler ve 1,5 katından küçük olan basit kirişlerin yüksek kiriş olarak tasarlanıp donatılması bunun yanı sıra bu tür kirişlerin tasarımının, doğrusal olmayan

birim şekil değiştirme dağılımı ve yanal burkulma göz önüne alınarak yapılması gerektiği yer almaktadır (TS-500).

Yüksek kiriş davranışı

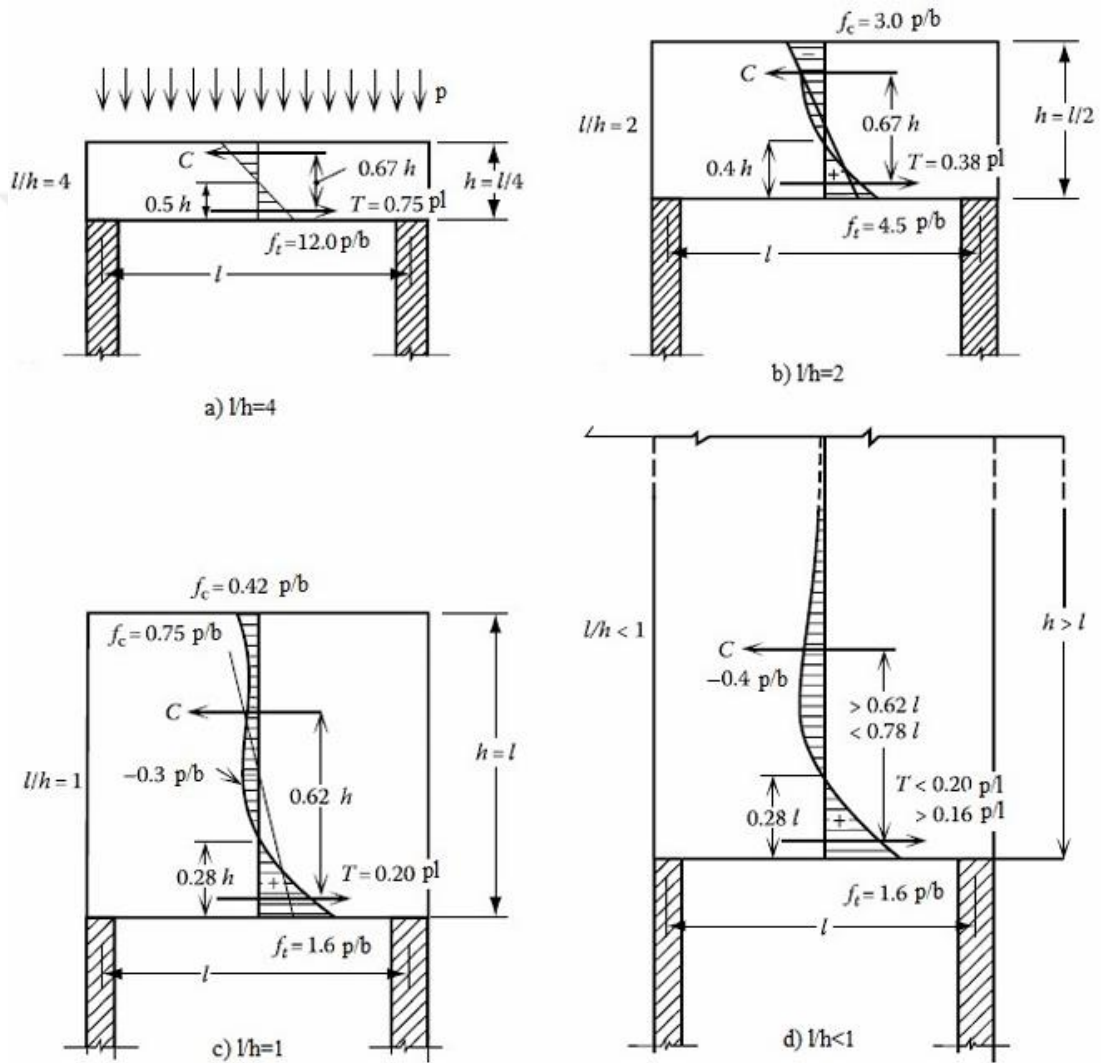
Yüksek kirişler, oldukça küçük a/d oranına sahip olmasından kaynaklı davranışları narin kirişlere göre oldukça farklıdır. Narin kirişlerde eğilme davranışı hakimken yüksek kirişlerde ise bu oran nedeniyle kayma davranışı hakimdir (Sagi *et al.* 2022). Daha önceki süreçte mevcut yüksek kirişlerin davranışı için elastisite teorisi (Bernoulli-Naiver hipotezi) dikkate alınmaktaydı. Yapılan birçok araştırma sonucu elastisite yani eğilmeden önce düzlem olan kesitler eğilmeden sonra da düzlem kalır teorisi bu tür kirişler için geçerli olmadığı görülmüştür (**Şekil 13**) (Akkaya 2023). Bu nedenle de bu hipotezden elde edilen doğrusal gerilme dağılımının kullanımında doğru sonuçlar ortaya çıkmamaktadır. Yüksek kirişlerde a/d oranının çok küçük olması nedeniyle kemerleşme etkisi ortaya çıkmaktadır (Yılmaz 2016). Bu kirişlerde hâkim olan kesme davranışını belirlemek oldukça zordur ve bu davranışını etkileyen birçok faktör vardır. Bunlardan başlıca bazıları; uygulanan yükün konfigürasyonu, a/d oranı, beton dayanım sınıfı, kesme donatısı oranıdır (Akkaya 2023). Numunelerde a/d oranının kirişlerin davranışını etkileyen ve önemli faktörlerden biri olduğu gözlemlenmiştir. (**Şekil 13**) (Turan 2022).



Şekil 13. a/d oranının kayma gerilimi üzerindeki etkisi (Wight ve MacGregor 2009)

Düzgün yayılı yük etkisi altındaki yüksek kirişlerde, açıklığın ortasında oluşan gerilme dağılımı, farklı açıklık/yükseklik (l/h) oranları için **Şekil 14**'de verilmiştir. **Şekil 14(a)**' da, kirişin orta bölgesindeki gerilme dağılımı doğrusal bir dağılım sergilerken, (b), (c) ve (d) şekillerinde l/h oranının azalmasıyla birlikte, gerilme dağılımında doğrusal olmayan bir davranış gözlemlenmiştir. Burada $l/h = 1$ olması durumunda en alt lifteki gerilmeye bakacak olursak Bernoulli-Navier hipotezine göre en büyük gerilme olarak verilen $0.75 p/b$ değerinin iki katından fazla olduğu görülmektedir. Gözlemlenen bu farklılıklar kayma gerilmelerinde de

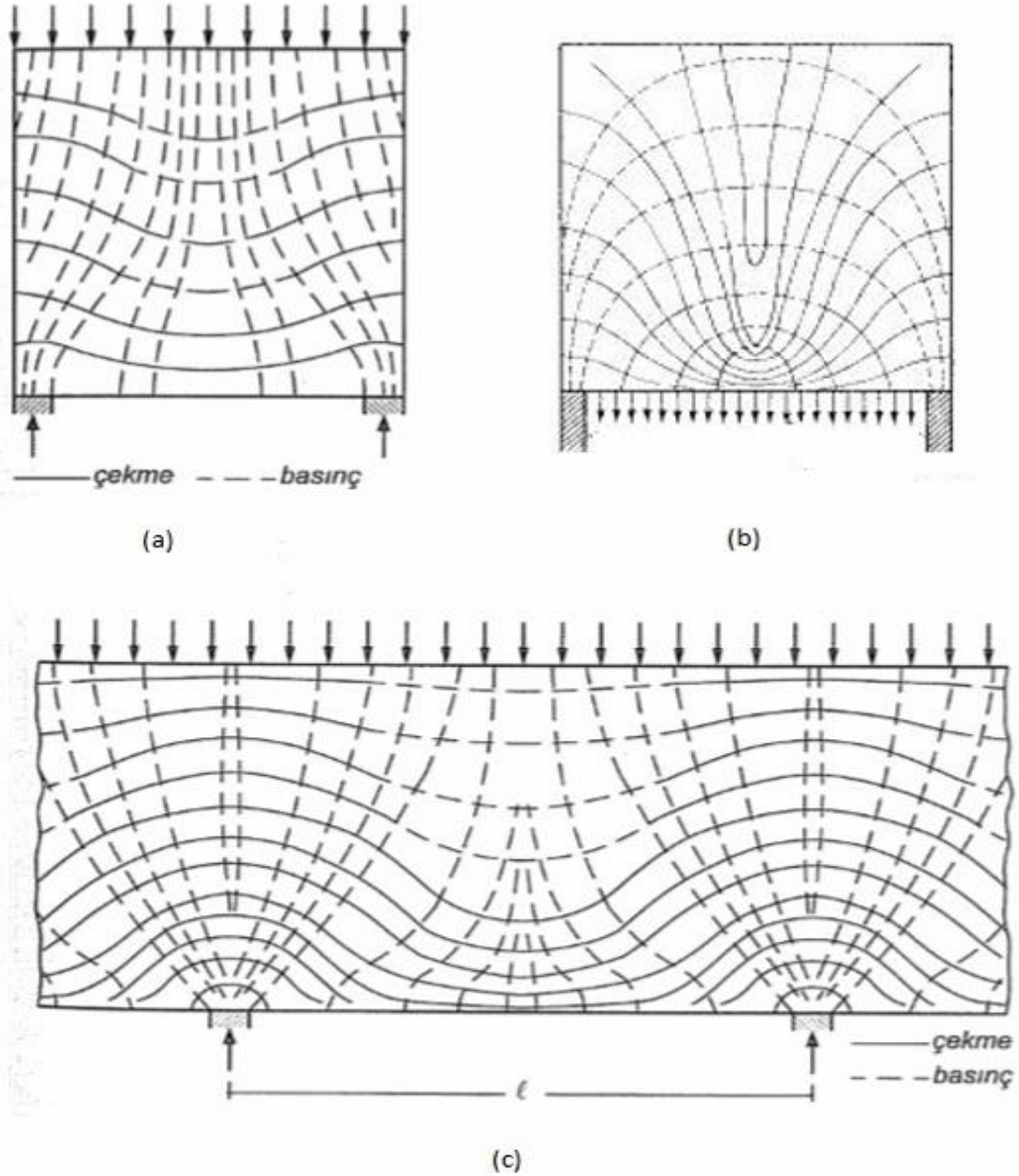
mevcuttur. Kayma gerilmesinin dağılımı incelendiğinde, benzer biçimde doğrusal olmayan farklılıklar ortaya çıkmaktadır. Gerilme dağılım analizleri, tarafsız eksenin kirişin altına doğru kaydığını göstermekte; bu da en büyük çekme gerilme değerinin en alt lifte, en büyük basınç gerilme değerinin ise kirişin üst bölgesinin altında meydana geldiğini ortaya koymaktadır. Bu durum, yüksek kirişlerde yapısal davranışın tek boyutlu değil, iki boyutlu ve doğrusal olmayan bir şekilde gerçekleştiğini göstermektedir. Bu nedenle, Bernoulli-Navier hipotezine dayalı doğrusal gerilme varsayımlarının, yüksek kirişlerin gerçek davranışını yansıtmakta yetersiz kaldığı görülmektedir (Yılmaz 2016).



Şekil 14. Yüksek kirişlerde gerilme dağılımı: (a) $l/h = 4$, (b) $l/h = 2$, (c) $l/h = 1$ ve (d) $l/h < 1$ (Yılmaz 2016)

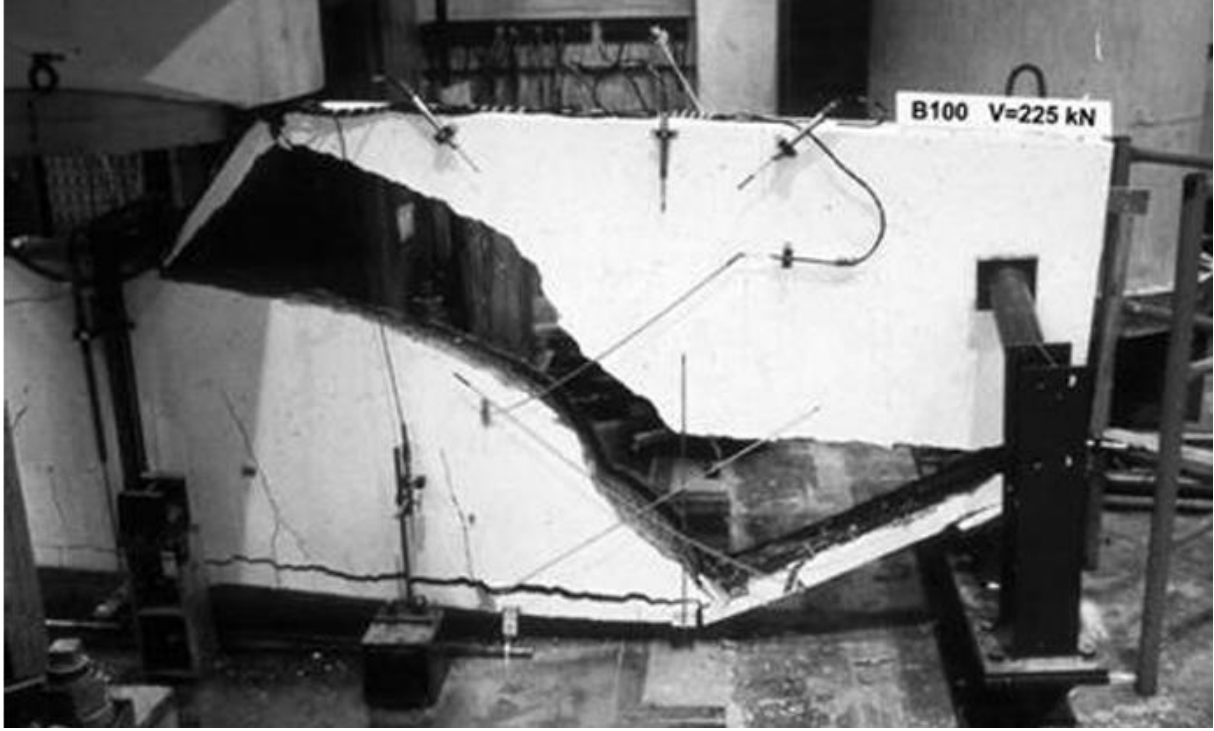
Şekil 15'de üst taraftan (a ve c) ve alt taraftan (b) yüklenmiş kirişlerdeki asal gerilme dağılımları verilmiştir. Asal çekme gerilmelerinin ve gerilme doğrultularının tespit edilmesi, çekme donatılarının yerleştirileceği bölgelerin belirlenmesi için önemli rol oynarlar. Üst taraftan (a ve c) yükleme yapılan kirişlerde oluşan çekme gerilmelerinin büyük oranda yatay doğrultuda gelişmesi, çekme donatılarının yatay şekilde yerleştirilmesi gerektiği anlamına gelir.

Şekilden de anlaşılacağı üzere, uygulanan yüklerin önemli bir bölümü, kemer etkisiyle oluşan basınç gerilmeleri aracılığıyla mesnetlere aktarılmaktadır. Diğer bir durumda (b), yük kirişe alttan birleşen taşıyıcı elemanlarla verilebilir. Bu şekilde yükün, kirişin üst bölgesine iletilmesi amacıyla ek donatıya ihtiyaç vardır. Yüksek kirişlerde çatlak oluşumu çoğunlukla, düşey veya basınç gerilmelerinin etkili olduğu bölgelerde gözlemlenir. Bu nedenle, açıklık boyunca yalnızca düşey kesme donatısı değil, aynı zamanda yatay gövde donatısının da kullanılması gereklidir.



Şekil 15. (a) Üst taraftan yüklü tek açıklıklı yüksek kirişte asal gerilme doğrultuları, (b) Alt taraftan yüklenmiş tek açıklıklı yüksek kirişte asal gerilme doğrultuları (c) Üst taraftan yüklü sürekli yüksek kirişte asal gerilme doğrultuları (Yılmaz 2016)

Betonarme kirişlerde a/d oranı kirişin kırılma biçimini yönetir. Kirişlerde eğilme etkisiyle meydana gelen kırılma istenen kırılma biçimidir ve ani değildir. Yüksek kirişlerde ise değişip azalan a/d oranıyla birlikte yüksek kirişin kırılma biçimi de değişmektedir. Bu tarz kirişlerde eğilme dayanımından ziyade kesme dayanımı hakimdir (Abuwarda 2019). Kesme etkisinde gerçekleşen kırılmalar, ani ve gevrek kırılmalardır. Bu ani ve gevrek kırılmalar istenmeyen bir kırılma şekli olduğundan yüksek kirişlerin yapısal davranışını anlamak ve doğru tasarımı yapmak oldukça önemlidir (Akkaya 2023).

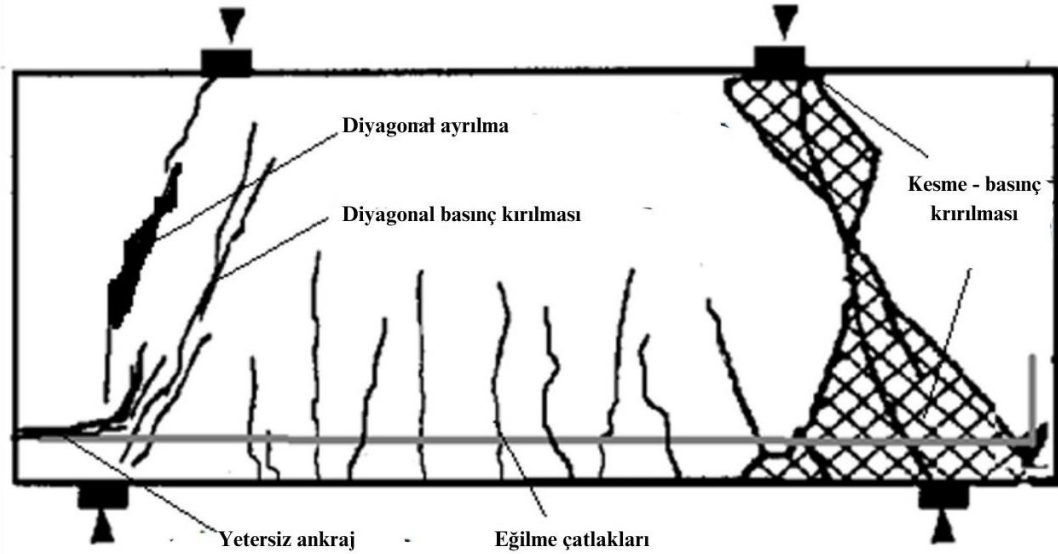


Şekil 16. Etriyesiz yüksek kirişlerde kesme kırılması (Collins ve Kuchma, 1999)

a/d oranının büyük olduğu narin kirişlerde, kemer etkisi oluşma ihtimali oldukça zordur ve bundan kaynaklı yük kiriş davranışı ile taşınır. Kirişteki kayma ve eğilme gerilmelerinden kaynaklı eğik çatlaklar ($30^0 \sim 60^0$) meydana gelir. Bernoulli-Navier hipotezinin kabulünden dolayı kayma şekil değiştirmeleri ihmal edilir. Yüksek kirişlerde ($a/d < 2,5$), yük büyük ölçüde oluşan kemer etkisi ile taşınır ve daha dik çatlaklar (60^0 gibi) oluşur. Yüksek kirişlerde görülen bu kemer etkisi yüksek dayanıma sahip olmasında önemli bir rol oynamaktadır ve bu etkiyle beraber taşınan yük basınç çubukları yardımıyla doğrudan mesnetlere aktarılır (Birincioğlu 2022). Yüksek kirişler, kemer etkisiyle eğimli bir çatlak oluştuğunda basınçlı çalışan bağlı kemer gibi davranmaya başlar ve bu davranış oldukça fazla yük depolama gücüne sahiptir. Yüksek kirişlerin daha fazla kesme kapasitesine sahip olması bundan kaynaklıdır (Abuwarda 2019). Yapılan çalışmalar incelendiğinde yüksek kirişlerde yaygın olarak üç şekilde kırılma olduğu gözlemlenmiştir. Bunlar; kesme kırılması, eğilme kırılması ve yetersiz ankraj arızasıdır. Bu kırılma türleri arasında ilki olan kesme kırılması yaygın olarak görülür ve gevrektrir. İkinci

tür, donatı yetersizliğinden kaynaklı, kirişin orta açıklığının alt tarafında, alt boyuna donatının bulunduğu bölgede meydana gelen eğilme (çekme) kırılmasıdır. Üçüncü tür olan yetersiz ankraj arızası ise, ana donatının yeterli geliş (aderans) boyu veya hiç mekanik ankraj olmadığı durumlarda, kirişin uç bölgelerindeki alt kısımlarında gerçekleşir. Kesme kırılmasını, a/d oranı ve yatay, düşey kesme donatısı oranı etkiler. Bu kırılma türü kendi içinde de üçe ayrılmıştır.

- a) **Diyagonal Ayrılma:** Bu kırılma türü, kirişin yüksekliğinin orta bölgesinde, basınç çubuğuna paralel doğrultuda meydana gelir. Oluşan çatlaklar hem yükleme plakası hem de mesnet plakası yönünde ilerler. Yetersiz donatı durumunda, beton basınç çubuğunun ezilmesi nedeniyle bu tür bir kırılma ani bir şekilde gerçekleşebilir. Bu kırılma türü, incelenen yönetmeliklerden hiçbirinde Çubuk Model Yöntemi (Strut and Tie Model - STM)) esaslarına göre öngörülemmez.
- b) **Diyagonal Basınç (Çubuk Ezilmesi) Kırılması:** Bu kırılma türü, kirişin derinliği boyunca, mesnet bölgesinin sona erdiği nokta ile yükleme noktasının başlangıcı arasında, diyagonal doğrultuda gelişen çatlaklar sonucu ortaya çıkar.
- c) **Kesme-Basınç Kırılması (Düğüm Noktası Kırılması):** Bu kırılma türü, yükleme veya mesnet plakası yakınlarında ortaya çıkar (Latosh 2014).



Şekil 17. Yüksek kiriş kırılma şekilleri

Yüksek kirişte donatı

Kesme donatısı bulunmayan betonarme kirişlerde, eğik çatlaklar oluştuktan kısa bir süre sonra gevrek kesme hasarı meydana gelir. Bu nedenle bu tür kirişlerde kesme kapasitesi, eğik çatlama yüküne eşit sayılmaktadır. Eğik çatlak açıklıklarının artmasını önlemek amacıyla yaygın olarak enine donatılar, yani etriyeler kullanılmaktadır. Yüksek kirişlerde ise, eleman

yüksekliği fazla olduğu için yalnızca etriye kullanımı yeterli olmamakta; bunun yanında kirişin yan yüzeylerine boyuna doğrultuda yerleştirilen ilave donatılar da tercih edilmektedir.

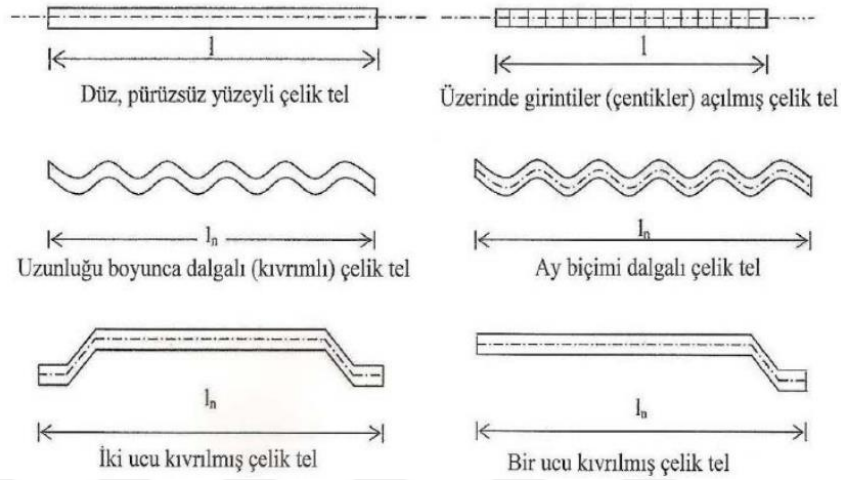
Daha önceki çalışmalarda da belirtildiği gibi, yüksek kirişlerde eğik kesme çatlaklarının davranışını etkileyen en kritik parametrelerden biri kesme donatısı oranıdır. Eğik çatlakların kontrolü, donatıların yerleşim yönü ve a/d oranına bağlı olarak değişmektedir. Düşük a/d oranlarında (<1), yatay yerleştirilen gövde donatısı daha etkiliyken, bu oran yükseldikçe etriyenin etkisi artmaktadır. Ancak yüksek kirişlerde çatlak genişliğini etkili bir şekilde sınırlandırmak için hem etriyenin hem de gövde donatısının birlikte kullanılması gereklidir. Ayrıca belirli bir kesme donatısı oranından sonra yapılacak ilave artışlar, çatlak kontrolünde istenilen performansı sağlamamaktadır. Kesme davranışının baskın olduğu betonarme yüksek kirişlerde, asal çekme gerilmeleri sonucu meydana gelen eğik çatlakların, ani ve gevrek bir kırılmaya yol açabileceği unutulmamalıdır. Bu nedenle mevcut yüksek kiriş elemanlarında oluşabilecek eğik çatlak hasarlarının düzenli şekilde izlenmesi büyük önem taşımaktadır (Demir 2018).

Yüksek kirişte çelik lif

Betonun çekme dayanımının düşük olması nedeniyle, kesme kuvvetlerine maruz kaldığında ani ve kırılgan şekilde göçme riski yüksektir. Bu nedenle, betonarme yapı elemanlarında kesme gerilmelerine karşı koymak ve taşıma gücünü artırmak amacıyla enine donatıya başvurulur. Çelik donatı betonla birlikte en yaygın kullanılan takviye elemanıdır; ancak son yıllarda taşıma kapasitesi ile sünekliği artırmak amacıyla betonun içine çeşitli lifler katılmaya başlanmıştır. Bu gelişmeyle birlikte lif takviyeli betonlar, yapısal mühendislikte dikkate değer bir araştırma alanı haline gelmiştir. İnce ve uzun kirişlerin aksine, yüksek kirişlerde yapısal davranışın belirleyici unsuru kayma gerilmesidir (Smith ve Vantsiotis, 1982). Yüksek kirişlerde çelik lif kullanımının kesme dayanımının artırılmasına yönelik etkisi konusunda çeşitli araştırmalar yapılmaktadır. Betonun süneklik ve dayanım özelliklerini geliştirmek amacıyla, beton karışımına çeşitli katkı malzemeleri eklenmektedir. Bu katkılardan biri olarak lifler dikkat çekmektedir ve lifler arasında en yaygın olarak kullanılanı çelik liflerdir. Beton ile birlikte kullanılan çelik liflerin, betonun mekanik özelliklerini iyileştirdiği pek çok deneysel çalışma ile ortaya konmuştur. Çelik lif katkısı sayesinde betonun eğilme dayanımı, sünekliği, darbe dayanımı ve enerji yutma kapasitesi artmakta; böylece daha dayanıklı ve çatlama karşı dirençli bir yapı malzemesi elde edilmektedir. Özellikle liflerin çatlak oluşumu sırasında köprüleme yaparak gerilmeleri taşıması ve uçlarında bulunan kancalar sayesinde ekstra enerji sönmemesi bu katkının etkinliğini artırmaktadır. Çelik liflerin kullanımı, kesme donatısı bulunmayan betonarme kirişlerin dayanımını, çatlak davranışlarını ve kırılma

mekanizmalarını olumlu yönde etkileyebileceği gibi, bazı durumlarda etriyenin yerini kısmen veya tamamen alabileceği düşünülmektedir (Birincioğlu 2022)

Çelik liflerin sınıflandırılması Türk standardı TS 10513 göre yapılmıştır. **Şekil 18'** de çelik lif isimlendirilmeleri verilmiştir.



Şekil 18. Çelik lif sınıflandırılması (TS 10513 1992)

Farklı yönetmeliklerde yüksek kiriş tasarımı

Farklı ülkelerde geçerli olan yönetmeliklerde, yüksek kirişlerin tanımı ve tasarımına ilişkin önemli farklılıklar ve ortak eğilimler bulunmaktadır. Bu yönetmelikler, yapının geometrik oranlarına, yükleme koşullarına ve malzeme davranışlarına göre yüksek kiriş sınıflandırması yapmakta ve buna uygun tasarım yöntemleri önermektedir.

TS500 (Türkiye Betonarme Standardı) yüksek kirişleri, açıklığın kiriş yüksekliğine oranı temel alınarak tanımlarken, tasarım sürecinde lineer olmayan birim şekil değiştirme davranışı ile yanal burkulma etkisinin mutlaka dikkate alınması gerektiğini vurgular. Bu yaklaşım, yüksek kirişlerin geleneksel kiriş davranışlarından sapmasını kabul ederek, gerilme ve deformasyonların daha gerçekçi bir şekilde modellenmesini hedeflemektedir.

ACI 318-14 (Amerikan Betonarme Yönetmeliği), yüksek kirişleri bir yüzeyden yüklenip diğer yüzeyden mesnetlenen özel elemanlar olarak tanımlar. Kiriş yüksekliği boyunca doğrusal olmayan gerilme dağılımlarına dikkat çeker ve bu durumun çubuk model yöntemine uygun olduğunu ifade eder. Kesme dayanımı sınırlandırılmış olup, donatı oranı ve aralıklarına dair minimum değerler getirilmiştir.

EN 1992-1-1 (Eurocode 2), yüksek kirişleri açıklık/derinlik oranı ile tanımlarken, kesme tasarımında azaltma katsayısı içeren sınır koşulları sunar. Yönetmelik, yüksek kiriş tasarımında Strut-and-Tie Model (STM) yani çubuk model yöntemini açıkça tavsiye etmektedir. Bu öneri,

D bölgelerinde (gerilme dağılımının lineer olmadığı bölgeler) güvenli ve etkin bir çözümleme yapılmasını sağlamaktadır.

IS 456-2000 (Hint Yönetmeliği), yüksek kirişleri benzer şekilde açıklık/derinlik oranına göre sınıflandırır ve çeşitli kiriş tipleri için manivela kolu hesaplamalarına açıklık getirir. Bu yönetmelik de çubuk model yöntemini önermekte olup, yüksek kirişlerin mekanik davranışlarını bu yolla temsil etmeyi amaçlar.

BS 8110 (İngiliz Yönetmeliği) ise yüksek kiriş tanımını geometrik orana göre yapar ancak tasarım için doğrudan hükümler vermek yerine, kullanıcıyı detaylı literatür araştırmasına yönlendirir. Bu yaklaşım, mühendislik yorumuna daha fazla esneklik tanımakla birlikte, standardizasyon açısından belirsizlik yaratabilir.

CSA A23.3-04 (Kanada Betonarme Standardı) da açıklık/derinlik oranı temelinde tanımlama yapar ve doğrudan çubuk model yöntemine yönlendirme yapar. Bu yöntemle, basınç ve çekme kuvvetlerinin ağ benzeri sistemler üzerinden modellenmesi ve hesaplamalara dahil edilmesi sağlanır.

Sonuç olarak yönetmelikler, yüksek kirişlerin tanımı ve tasarımı konusunda farklı önceliklere sahip olmakla birlikte, yüksek kirişlerin klasik kiriş davranışlarından farklılaştığı konusunda ortak bir görüşe sahiptir. Modern eğilimler, özellikle doğrusal olmayan davranışlar, şekil değiştirme etkileri, kesme kuvveti dağılımları ve D bölgesi modellemeleri gibi yapısal detaylara odaklanmakta; bu bağlamda çubuk model yöntemi, çoğu yönetmelik tarafından en uygun çözümleme ve tasarım yöntemi olarak önerilmektedir.

Literatür Özeti

Yapılan bu tez çalışmasında bağlayıcı malzeme olarak, yenilikçi ve sürdürülebilir bir yapı malzemesi olan geopolimerler tercih edilmiştir. Bu bağlamda, geopolimerlerin yapı malzemesi olarak kullanım potansiyelini ortaya koyan ve literatürde yer alan çeşitli araştırmalar incelenmiş; mevcut bilgi birikimi doğrultusunda yapılan çalışmaların bulguları değerlendirilmiştir.

Singh vd. (2015) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, alkali aktivasyon yöntemiyle elde edilen alüminosilikat esaslı geopolimerlerin güncel gelişmeleri ve yapı sektöründeki kullanım potansiyelleri değerlendirilmiştir. Geopolimer bağlayıcılarla üretilen harç ve betonların taze ve sertleşmiş durumdaki özellikleri; agrega ile bağlayıcı arasındaki geçiş bölgesi, donatı çeliğiyle aderans ve yüksek sıcaklık direnci gibi parametreler üzerinden detaylandırılmıştır. Ayrıca, geopolimer betonların çeşitli agresif çevre koşullarındaki dayanıklılık performansları ele alınmıştır. CSIR-CBRI (Merkezi Yapı Araştırmaları Enstitüsü)

bünyesinde yürütülen Ar-Ge çalışmaları kapsamında hem ortam sıcaklığında hem de ısı kürlü üretim koşullarında elde edilen geopolimerlerin deneysel sonuçlarına yer verilmiş; bu sonuçların, geleneksel çimento esaslı betonlarla benzer mühendislik performansı gösterdiği ve geopolimer betonun inşaat mühendisliği uygulamaları için güçlü bir alternatif olabileceği ortaya konmuştur.

Zuaiter vd. 2025 bağlayıcı olarak öğütülmüş yüksek fırın cürufu (GGBS) ve silika dumanı (SF) kullanılan jeopolimer betonun mekanik özellikleri incelenmiştir. SS/SH oranları 1,5 ve 2,0 olacak şekilde farklı bağlayıcı oranlarının etkisi araştırılmış; slump, basınç dayanımı, elastisite modülü ve yarıлма çekme dayanımı 1, 7 ve 28. günlerde test edilmiştir. Sonuçlara göre, SF oranının %50'ye kadar artırılması ve 1,5 çözeltisi oranı kullanılması 28 günlük basınç dayanımını %50 artırmıştır. Ancak SF oranının daha fazla artırılması dayanımlarda ciddi düşüşe neden olmuştur. Çözeltisi oranının 2,0'a çıkarılması, GGBS ağırlıklı karışımlarda basınç dayanımını %63'e kadar artırmış, ancak SF ağırlıklı karışımlarda %87'ye varan düşüşe yol açmıştır. En yüksek elastisite modülü (18,7 GPa), yalnızca GGBS içeren ve 2,0 oranında çözelti kullanılan karışımda elde edilmiştir. Genel olarak, GGBS ağırlıklı karışımlar, SF ağırlıklı olanlara göre daha iyi mekanik performans göstermiştir.

Zhang vd. (2020) tarafından gerçekleştirilen derleme çalışmasında, geopolimer betonların çeşitli agresif çevre koşullarına karşı dayanıklılık özellikleri incelenmiştir. Çalışmada karbonatlaşma, asit etkisi, sülfat saldırısı, yüksek sıcaklık ve klorür penetrasyonu gibi çevresel etkiler altında geopolimer betonların performansı, geleneksel çimento esaslı betonlarla karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgulara göre, geopolimer betonlar çoğu durumda geleneksel çimento esaslı betonlara göre daha üstün dayanıklılık göstermektedir. Özellikle kalsiyum içeriğinin, bu dayanıklılık performansını önemli ölçüde etkilediği vurgulanmıştır. Ayrıca çalışmada, geopolimer betonların ömür döngüsü boyunca dayanıklılığını etkileyen başlıca parametreler ve bu parametreler arasındaki etkileşimler ele alınmış, gelecek araştırmalar için potansiyel fırsatlar ve zorluklara dikkat çekilmiştir.

Farooq vd. (2021) yaptığı çalışmada, çimento içermeyen geopolimer kompozitlerin sürdürülebilirlik açısından mevcut durumunu incelemektedir. Geopolimer bağlayıcılarla hazırlanan betonların fiziksel, kimyasal ve mikro yapısal özellikleri detaylandırılmış, agresif çevresel etkilere karşı dayanıklılıkları geleneksel betonlarla karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Ayrıca, geopolimer betonların küresel ısınma potansiyeline etkileri ve yapı sektöründeki uygulama alanları ele alınmıştır. Elde edilen sonuçlar, geopolimer betonun çevresel açıdan daha avantajlı, dayanıklı ve teknik olarak rekabetçi bir yapı malzemesi olduğunu ortaya koymaktadır.

Manzoor vd. (2024) bu çalışmada, geopolimer betonun yüksek sıcaklıklara karşı gösterdiği performansı incelemektedir. Geleneksel çimento yerine, geopolimer beton, çevresel etkileri azaltmasının yanı sıra, 1000 °C ila 1200 °C arası sıcaklıklara dayanım gösterebilmesi nedeniyle yangına dayanıklı yapılarda güçlü bir alternatif olarak değerlendirilmektedir. Makalede, geopolimer betonun yüksek sıcaklık altında mekanik dayanım özellikleri özetlenmiş; özellikle artık basınç ve çekme dayanımı üzerindeki etkiler ele alınmıştır. Lif, mermer tozu, atık cam, geri dönüştürülmüş kauçuk ve nanoparçacık gibi katkı maddelerinin bu özellikleri nasıl iyileştirdiği analiz edilmiştir. Lif katkısı, özellikle karbon, cam, bazalt, polipropilen ve çelik türlerinde, yüksek sıcaklıklarda oluşan mikro çatlaklara karşı direnç sağlamaktadır. Geri dönüştürülmüş lastik lifleri, düşük maliyetli bir alternatif sunmakta ve optimum 1,2–2 kg/m³ aralığında kullanıldığında olumlu sonuçlar vermektedir. Ayrıca, kauçuk parçacıklarının spalling (pul pul dökülme) etkisini azalttığı, ancak basınç dayanımını olumsuz etkileyebileceği belirtilmiştir. Atık cam kullanımı ise mikro yapıyı ve termal kararlılığı geliştirirken, alkali-agrega reaksiyonlarına dikkat edilmesi gerektiği vurgulanmıştır. Sonuç olarak, geopolimer betonun yüksek sıcaklık dayanımı yönüyle gösterdiği olumlu performans, yangına dayanıklı yapı elemanları için umut verici bir çözüm sunduğunu ortaya koymaktadır. Çalışma, bu alanda yapılacak gelecekteki araştırmalar için hem teorik hem de pratik açıdan kapsamlı bir temel oluşturmaktadır.

Li vd. (2019) yapılan çalışmada, geopolimer beton için geliştirilen karışım tasarım yöntemlerini incelemektedir. Araştırmada, bu yöntemler üç ana grupta sınıflandırılmıştır: hedef dayanım temelli yaklaşımlar, performansa dayalı tasarımlar ve istatistiksel modelleme teknikleri. Makalede, bağlayıcı malzeme türü, alkali aktivatör oranı, kürlenme koşulları gibi parametrelerin geopolimer beton performansı üzerindeki etkileri vurgulanmaktadır. Ancak, geleneksel betonun aksine, geopolimer beton için evrensel bir karışım tasarım standardının bulunmadığı belirtilmekte ve bu durumun uygulama alanlarını sınırladığı ifade edilmektedir. Çalışma, ileride geliştirilecek standartlara ve uygulamalara ışık tutmayı amaçlamaktadır. Farklı türlerdeki cürufu ve uçucu külü içeren geopolimer betonun çeşitli tasarım yöntemleri önerilmiştir.

Almutairi vd. (2021) tarafından gerçekleştirilen bu derleme çalışmasında, geopolimer betonun üretiminde kullanılan farklı öncü malzemeler ve bu betonların çeşitli yapı sektöründeki uygulama alanları kapsamlı şekilde ele alınmıştır. Araştırma, geopolimer betonların çevresel açıdan sağladığı avantajlara ve atık malzeme kullanımı sayesinde maliyetlerin azaltılmasına dikkat çekmektedir. Özellikle silika dumanı, yüksek fırın cürufu, pirinç samanı külü ve mermer tozu gibi katkılarla mekanik özelliklerin ve mikroyapısal dayanıklılığın iyileştirildiği

belirtilmiştir. Yüksek fırın cürufu, uçucu kül ve silis dumanı gibi malzemelerin uygun oranlarda kullanımıyla eğilme dayanımı gibi performans özelliklerinin artırıldığı görülmüştür. Ayrıca, denizel ortamlarda korozyon direncinin artırılması ve yüksek sıcaklıklara karşı dayanımın geliştirilmesi amacıyla mikro kapsül destekli sistemler önerilmektedir. Ancak, geopolimer betonların uzun vadeli dayanıklılığı ve ekonomik sürdürülebilirliği hakkında daha fazla araştırmaya ihtiyaç duyulduğu ifade edilmektedir.

Nishanth ve Patil (2022) yaptığı çalışmada, alternatif bağlayıcılar kapsamında, granüle yüksek fırın cürufu (GGBFS), düşük kalsiyumlu uçucu kül ve Alccofine esaslı kendi kendine yerleşebilen geopolimer beton (SCGC) üzerine çeşitli deneysel araştırmalar gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda yapılan bir çalışmada, farklı bağlayıcı içerikleri (400 ve 450 kg/m³) ile değişen NaOH molariteleri (10 M, 12 M ve 14 M) kullanılarak altı farklı SCGC karışımı tasarlanmıştır. Tüm karışımlarda bağlayıcı sistemi %60 GGBFS, %35 uçucu kül ve %5 Alccofine içerecek şekilde sabit tutulmuştur. Elde edilen bulgular, 14 M NaOH çözeltisi ve 450 kg/m³ bağlayıcı içeren karışımın 673 mm'lik slump akışı ve 28 günde 40,2 MPa'ya ulaşan basınç dayanımı ile optimum işlenebilirlik ve dayanım özelliklerini sunduğunu ortaya koymuştur. Bununla birlikte, 10 M NaOH ve aynı bağlayıcı oranına sahip karışım 715 mm'lik slump akışı ile en yüksek işlenebilirlik değerine ulaşmıştır. Referans olarak değerlendirilen, %100 GGBFS içeren ve 500 kg/m³ bağlayıcı ile 16 M NaOH çözeltisi kullanılan karışım ise 43,5 MPa basınç dayanımı, 2,9 MPa eğilme dayanımı ve 3,5 MPa çekme dayanımıyla en yüksek mekanik performansı göstermiştir. SEM analizleri, 14 M NaOH içeren karışımın daha yoğun ve gelişmiş bir mikroyapı oluşturduğunu göstermiştir. Bu çalışma, SCGC'nin hem taze hem de sertleşmiş durumda yüksek performans sergileyebileceğini ve optimize edilen karışım oranlarının önemli ölçüde etkili olduğunu ortaya koymaktadır.

Sharma vd. (2024) yaptığı çalışmada, geopolimer malzemenin kullanımının sınırlı kalmasının temel nedeni olan gösterdiği yarı gevrek davranışın üstesinden gelmek için farklı lif takviyelerinin kullanımı yaygın hale getirmek hedeflenmiştir. Lif takviyeli geopolimer betonun mekanik özelliklerini vurgulayarak, gelişimi ve çeşitli uygulamalardaki kullanımı üzerine kapsamlı bir değerlendirme sunmaktadır. Çalışma, uygun üretim standartlarının belirlenmesini takiben lif takviyeli geopolimer betonun ticari olarak yaygınlaşmasının gerekliliği sonucuna varmaktadır. Ayrıca yapılan çalışmada çelik lif kullanımı emme kapasitesini azaltarak dayanıklılığı artırırken, alümina kaplı çelik lifler, polimer kompozitlerde yüzeyler arası bağ kuvvetini ve mekanik davranışı önemli ölçüde iyileştirmektedir. Yüksek sıcaklıkların etkisi altında ise, çelik lif takviyeli geopolimer betonun dayanımı başlangıçta 400 °C'ye kadar artış gösterirken, bu sıcaklık değerinden sonra azalma eğilimi göstermektedir.

Mudimby ve Bhanuprakash (2023) yapılan çalışmada, eğilme yüklemesine maruz bırakılan donatılı geopolimer beton elemanların davranışsal özelliklerini sunmaktadır. Hedef 28 günlük basınç dayanımları sırasıyla 30 MPa, 45 MPa ve 60 MPa olan üç farklı geopolimer beton karışımı geliştirilmiştir. Test sonuçları, gevrek kırılmayı önlemek ve çatlak oluşumunu kontrol etmek için geopolimer beton kirişlerde minimum eğilme donatısının gerekli olduğunu göstermiştir. Betonun çekme direnci tükendikten sonra bile donatılı beton elemanların bütünlüğünü koruyabilmek için minimum eğilme donatısı gereklidir. Bu nedenle, kirişlerde gerekli minimum eğilme donatısı için bir bağıntı önerilmiştir.

Bu tez çalışmasında ele alınan bir diğer başlık ise yüksek (derin) kirişlerdir. Literatürde geleneksel (normal) kirişlerle ilgili çok sayıda araştırma ve kaynak bulunmasına karşın, yüksek kirişlerin yapısal davranışlarını konu alan çalışmalar oldukça sınırlıdır. Özellikle geopolimer beton kullanılarak üretilen yüksek kirişlerle ilgili mevcut literatür son derece sınırlı olup, bu alandaki bilgi birikimi gelişme aşamasındadır. Bu kapsamda, bu çalışmada, yüksek kirişlere ilişkin mevcut araştırmalar sistematik bir şekilde incelenmiş ve elde edilen bulgular değerlendirilmiştir. Yapılan incelemeler, yüksek kirişlere dair literatürdeki boşluğa dikkat çekmekte ve bu alanda gelecekte yapılacak çalışmalara ışık tutmayı amaçlamaktadır.

Albidah (2023) yapılan çalışmada, geopolimer betonarme derin kirişlerin kesme davranışıyla ilgili literatürdeki boşluğu doldurmayı amaçlamaktadır. Çalışma kapsamında, dört noktalı eğilme deneyi konfigürasyonu altında, metakaolin ve uçucu kül esaslı altı geopolimer beton kiriş, göçme noktasına kadar test edilmiştir. Deney parametreleri olarak çelik lif içeriği (hacimce %0, %0,35 ve %0,70) ile etriye oranı (%0 ve %0,67) belirlenmiştir. Kirişlerin çatlak oluşum desenleri ve göçme modları bakımından gösterdiği davranış, geleneksel çimento esaslı betonarme derin kirişlerin davranışlarına genel olarak benzerdir. Kesme donatısı içermeyen geopolimer kirişlerde, çelik liflerin hacimce %0,35 ve %0,70 oranlarında ilavesi, sırasıyla %16,7 ve %31,6 oranlarında kesme dayanımında anlamlı artış sağlamıştır. Gerek etriyesiz gerekse etriyeli kirişlerde, çelik lif oranının artmasıyla birlikte, tepe dayanımdaki orta açıklık deplasman kapasitesi de artış göstermiştir. Bu çalışma kapsamında, test edilen geopolimer derin kirişlerin kesme dayanımını yüksek doğrulukla öngörebilen, strut-and-tie (basınç-çekme çubuğu bağlantısı) yaklaşımına dayalı bir öngörü modeli geliştirilmiştir. Ayrıca, geleneksel çimento esaslı betonarme kirişlere yönelik literatürde önerilmiş beş ampirik modelde, geopolimer derin kirişlerin kesme dayanımını tahmin etmedeki yeterlilikleri açısından değerlendirilmiştir.

Kadhim ve Zinkaah (2025) lif takviyeli polimer (FRP) ve çelik donatılı geopolimer beton (HRGPB) kirişlerin eğilme davranışı, ABAQUS ile sonlu elemanlar analizi ve teorik modeller

kullanılarak incelenmiştir. Analizler ve deneysel veriler arasında hasar modu, yük-hasar ve yük-şekil değiştirme açısından yüksek uyum sağlanmıştır. Parametrik çalışmalar, basınç dayanımının sınırlı etkisi olduğunu, donatı oranı ve FRP/çelik oranının ise eğilme performansını önemli ölçüde etkilediğini göstermiştir. %50 GFRP ve %50 çelik donatı kombinasyonu, yalnızca çelik donatılı kirişlere kıyasla yük kapasitesini %12,3 artırmış ve HRGPB kirişler sadece FRP donatılı olanlardan daha düşük defleksiyon göstermiştir.

Wu vd. (2018) geleneksel kiriş teorisinin geometrik ve statik süreksizlikler karşısında yetersiz kaldığı durumlarda öne çıkan çubuk-model (strut-and-tie) yaklaşımının, hafif agregalı beton kullanılan yüksek kirişlerdeki uygulanabilirliğini araştırmaktadır. Bu doğrultuda, sekiz adet yüksek kiriş üretilmiştir. Deneylerde, kesme açıklığı/etkin yükseklik oranı (a/d : 0,26–1,04) ile açıklık/yükseklik oranının (l/h : 2–3) kesme davranışı üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Tüm numunelerde kesme-basma veya kesme-eğilme birleşik kırılma türleri gözlemlenmiş, a/d oranı arttıkça eğilme kırılmasının daha belirgin hale geldiği saptanmıştır. Açıklık/yükseklik oranının (l/h) ise diyagonal çatlak oluşumu ve nihai taşıma kapasitesi üzerinde sınırlı bir etkisi olduğu belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar; ACI 318-14, Kanada Standardı, Eurocode 2 (EC2), Tan & Cheng modeli, yumuşatılmış çubuk-model ve sadeleştirilmiş yumuşatılmış çubuk-model gibi çeşitli kesme dayanımı tahmin yaklaşımlarıyla karşılaştırılmış, bu yöntemlerin hafif agregalı yüksek kirişlerin kesme dayanımını öngörmeye yeterli doğrulukta sonuçlar verdiği görülmüştür.

Tuchscherer ve Quesada (2015) yaptıkları çalışmada amaç, yüksek kirişler için minimum dağıtılmış yan yüzey donatısı yerine ihtiyaç duyulan çelik lif miktarını nicel olarak belirlemektir. Çelik liflerin geleneksel donatının yerini alma potansiyeli, hizmet performansı yani maksimum diyagonal çatlak genişliği üzerinden değerlendirilmiştir. Bu kapsamda, 1,8 kesme açıklığı/derinlik (a/d) oranına sahip, 300 mm genişliğinde ve 460 mm derinliğinde dokuz kiriş numunesi üretilmiş ve test edilmiştir. Deneysel değişkenler, çelik lif hacim oranı ile enine donatı oranı olarak belirlenmiştir. Elde edilen çatlak genişlikleri karşılaştırılarak hizmet performansı değerlendirilmiştir. Sonuçlar, %0,5 ve %1,0 çelik lifi içeren örneklerin çatlak genişliklerinin geleneksel donatılı kirişlerle benzer olduğunu, ayrıca lif ve etriyenin birlikte kullanılmasının çatlak kontrolünü artırdığını göstermiştir. %0,5'in üzerindeki lif oranlarının ise ek bir fayda sağlamadığı belirlenmiştir.

Javed vd. (2016) tarafından yapılan çalışmada, sekiz donatılı beton derin kiriş üretilip test edilmiştir. İki kiriş kontrol grubu olarak kesme donatısız hazırlanırken, diğer altı kiriş üç gruba ayrılmıştır. Bir grup geleneksel çelik perde donatısı ile, diğer iki grup ise farklı yönelimlerde karbon lif takviyeli polimer (CFRP) levhalarla güçlendirilmiştir. Kesme

çatlaklarının başlangıç yükü ve kırılma yükü kaydedilmiş, CFRP ve çelik donatı ile güçlendirme sonucunda taşıma kapasitesinde önemli artışlar gözlenmiştir. CFRP uygulamalarının çatlakların oluşumunu geciktirerek servis performansını iyileştirdiği, çatlaklara dik yerleştirilen CFRP levhaların ise kesme dayanımını daha fazla artırdığı belirlenmiştir. Sonuçta, CFRP laminatlar hem mevcut yapıları güçlendirmede hem de yeni yapılarda çelik perde donatısının azaltılmasında etkili bir alternatif olarak görülmüştür.

Zhang vd. bu çalışmada HTRB600 donatılı yüksek dayanımlı betonla üretilmiş sekiz derin kirişin, tekil yük altındaki kesme taşıma kapasitelerini incelemektedir. Araştırmada, kesme açıklığı/etkin derinlik oranı (a/d), boyuna donatı oranı ve enine donatı oranının etkileri değerlendirilmiştir. numunelerde a/d :2,0, kesme açıklığı/derinlik oranı ise 0,3, 0,6 ve 0,9 olarak belirlenmiştir. Boyuna donatı oranı %0,67–%1,27, etriye oranı ise %0–%0,5 arasında değişmiştir. Deneylerde, gerilmeler ve yer değiştirmeler ölçülerek göçme biçimi, yük-şekil değiştirme ilişkisi ve kesme davranışı analiz edilmiştir. Sonuçlar, küçük a/d oranına sahip kirişlerde diyagonal basınç göçmesinin baskın olduğunu ve bu göçme tipinin gövde donatı düzeni ve miktarından etkilendiğini göstermiştir. Ayrıca, kesme kapasitesi boyuna donatı oranının artışıyla belirgin şekilde artarken, enine donatı oranının etkisinin sınırlı olduğu gözlemlenmiştir.

Appa Rao ve Leon Raj (2024) çalışmada on bir adet donatılı betonarme (RC) derin kirişin dayanımı, servis davranışı ve göçme (hasar) şekilleri değerlendirilmiştir. Yükseklikleri 300 mm ile 1250 mm ve etkili açıklıkları 600 mm ile 2500 mm arasında değişen küçük, orta ve büyük boyutlardaki numuneler, üç noktalı eğilme testi ile göçmeye kadar test edilmiştir. Yükleme ve mesnet plakalarının uzunluğu 100 mm ile 400 mm, yatay etriye donatısı oranı ise %0,00 ile %0,45 arasında değiştirilmiştir. Deney sonuçları, yayılı yerleştirilmiş donatının ve orantılı yükleme/mesnet plakalarının boyut etkisini azalttığını göstermiştir. Ayrıca yatay kesme donatısı oranı arttıkça, kirişlerin göçme modu çapraz çekmeden kesme basınca dönüşmüştür. Test sonuçlarına göre, en yüksek nihai ve servis yükünü elde etmek için optimum enine donatı oranı %0,25 olarak belirlenmiştir. Ayrıca, ACI 318–19 standardında yer alan maksimum kesme kuvveti ifadesine ait dayanım azaltma katsayısının, kesme basınç göçmesi yaşayan derin kirişler için dahi yeterli olduğu deneysel olarak doğrulanmıştır.

Xu vd. (2024) önerilmeli çelik donatılı beton kompozit kirişlerin (PSRCC) kesme davranışı deneysel ve analitik olarak incelenmiştir. Yedi PSRCC derin kiriş üzerinde yapılan statik yükleme testleriyle; kesme açıklığı/yükseklik oranı, öngerme derecesi, donatı formu, yerleşim yüksekliği ve uygulama sırasının yapısal performansa etkileri değerlendirilmiştir. Deneysel bulgular, prefabrik ve yerinde döküm beton bileşenlerinin bütünlük sağladığını ve

tüm kirişlerin diyagonal basınç göçmesiyle sonlandığını göstermiştir. Kesme açıklığı/yükseklik oranının düşürülmesi çatlama ve tepe yüklerini artırırken, öngerme derecesindeki artışın daha sınırlı etkileri olduğu gözlemlenmiştir. Öngerme sonrası döküm uygulaması çatlama yükünü anlamlı biçimde artırmış, ancak tepe yüküne etkisi düşük kalmıştır. Ayrıca çelik-beton etkileşimini dikkate alan geliştirilen yeni tahmin modeli, PSRCC kirişlerin kesme dayanımını mevcut standartlara göre daha doğru öngörebilmiştir. Elde edilen sonuçlar, PSRCC kirişlerin tasarımında kesme açıklığı/yükseklik oranının belirleyici olduğunu ortaya koymuştur.

El-Sayed ve Shuraim (2024) çalışmalarında yüksek dayanımlı beton derin kirişlerin kesme dayanımına boyut etkisi bu çalışmada araştırılmıştır. Toplam 12 adet web donatısı olmayan tam ölçekli donatılı beton kiriş, kırılma aşamasına kadar test edilmiştir. Testte değişkenler olarak kiriş derinliği ve betonun basınç dayanımı ele alınmıştır. Basit mesnetli kirişler, dört nokta eğilme deneyi ile incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, kiriş derinliğinin artmasıyla birlikte kırılma anındaki kesme gerilmelerinin azaldığını ve böylece boyut etkisinin açıkça gözlemlendiğini ortaya koymuştur. Ayrıca, yüksek dayanımlı beton kirişlerde boyut etkisinin, normal dayanımlı beton kirişlere kıyasla daha belirgin olduğu tespit edilmiştir. Kesme dayanımı analizleri, ACI 318 strut-and-tie modeli (STM), Zhang ve Tan'ın STM'si ile kinematik model kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, ACI 318 STM'nin test edilen derin kirişler için tutarlı tahminler sunduğunu ancak boyut etkisini dikkate almadığını göstermiştir. Buna karşın, Zhang ve Tan'ın STM'si ile kinematik model, kiriş boyutunun kesme dayanımı üzerindeki etkisini doğru şekilde yansıtmaktadır.

Dang vd. (2021) farklı hacim oranlarında (0,5%, 1,0% ve 1,5%) ayrı makro çelik lif içeren kendiliğinden yerleşen beton (KYB) derin kirişlerin kesme davranışı incelenmiştir. Tüm kirişler, kesme açıklık-derinlik oranı 1,0 olan koşullarda test edilmiştir ve yükleme plakası genişliğinin kesme taşıma kapasitesi üzerindeki etkisi de değerlendirilmiştir. Ayrıca, çelik liflerin kesme davranışını iyileştirmedeki etkinliği, düz beton kirişler ve yatay ve dikey yönde %0,3 gövde donatısı bulunan kirişlerle karşılaştırılmıştır. Test sonuçları, makro çelik liflerin özellikle ilk çatlama yükü, maksimum kesme kapasitesi ve sünekliği önemli ölçüde artırdığını göstermiştir. Ancak, çelik lif hacim oranının %1,0'ın üzerine çıkarılması, maksimum kesme kapasitesinde ek bir artış sağlamamıştır. Maksimum kesme kapasitesini tahmin etmek üzere basitleştirilmiş bir analitik model önerilmiştir.

MATERYAL VE YÖNTEM

Materyal ve Yöntem kısmında tez çalışmasında kullanılan malzemelerin özellikleri, standartlara uygunluk kontrolü, deney yöntemleri vb. ilişkin detaylı bilgiler verilmiştir. Materyal başlığı kısmında hazırlanan karışımında ve deneysel ölçümler için hazırlanan malzemelerin özellikleri anlatılmıştır. Yine bu kısımda geopolimer numunelere ve donatılara ait karakteristik özelliklerini ortaya koymak amacıyla izlenen deneysel adımlar açıklanmıştır. Yöntem başlığı kısmında ise deney düzeneği, ölçüm yöntemi ve yükleme prosedürüne ilişkin bilgi sunulmuştur. Bu başlık kısmının devamında hazırlanan deney numunelerin geometri ve donatı detayları anlatılmış ve gösterilmiştir. Kesme davranışları incelenen çelik lifli geopolimer betonlu yüksek kirişlerin yapılan deneyler sonucunda elde edilmek istenilen parametreler de bölüm sonunda sunulmuştur.

Materyal

Materyal başlığı kapsamında, tez çalışmasında kullanılan malzemeler; hazırlanan beton karışımları ile ölçüm düzeneğinde kullanılan sistemler kapsamlı biçimde açıklanmıştır.

Beton karışımında kullanılan malzemeler

Bu tez çalışmasında, geopolimer yüksek kiriş üretimi amacıyla tüm kirişler için üç farklı beton karışımı hazırlanmış olup, bu karışımında kullanılan çelik lif oranı %0, %0,5 ve %1 olmak üzere üç farklı düzeyde değiştirilmiştir. Beton karışımının ana bağlayıcı bileşenleri olarak yüksek fırın cürufu ve metakaolin tercih edilmiştir. Kullanılan metakaolin, yüksek fırın cürufuna kıyasla daha ince yapıda olup bağlayıcının reaktivitesini artırmaya yönelik olarak karışıma dahil edilmiştir. Alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit (NaOH) ve sodyum silikat (Na_2SiO_3) kullanılmıştır. Bununla birlikte agrega olarak atık mermer tozu ve kuvars tozu ince agrega olarak değerlendirilmiş, bu sayede hem sürdürülebilirlik hedeflenmiş hem de atık malzemelerin yeniden kullanımı sağlanmıştır. Ayrıca, karışımında iri agrega kullanılarak geopolimer beton üretimi gerçekleştirilmiştir. Lifli geopolimer kompozit üretiminde ise takviye malzemesi olarak çelik lif tercih edilmiştir. Beton üretiminde kullanılan tüm malzemelerin kimyasal, fiziksel ve morfolojik özellikleri ile karışıma dahil edilme gerekçeleri bu bölümde detaylı şekilde sunulmuştur.

Geopolimer bağlayıcının temel bileşeni olan yüksek fırın cürufu, demir-çelik endüstrisinin yan ürünü olup, atık malzeme niteliği taşıdığı için çevresel sürdürülebilirliğe katkı

sağlamak amacıyla kullanılmıştır. Kullanılan yüksek fırın cürufu, ASTM C618 (2012) standardına uygun olup, Türkiye'nin Bolu ilinde bulunan OYAK Çimento fabrikasından temin edilen öğütülmüş formda kullanılmıştır.

Yüksek fırın cürufunun kimyasal bileşimi TS EN 196-2 (2013) standardı doğrultusunda belirlenmiş ve elde edilen sonuçlar **Tablo 3'** te, fiziksel özellikleri ise **Tablo 4'**te sunulmuştur. Ayrıca, bu bağlayıcı malzemeye ait XRD analizi **Şekil 19'**da verilmiş, öğütülmüş yüksek fırın cürufunun görüntüsü ise **Şekil 20a'**da gösterilmiştir. Malzemenin tane boyutu dağılımını ortaya koyan elek analizi sonuçları ise **Şekil 21'**de yer almaktadır.

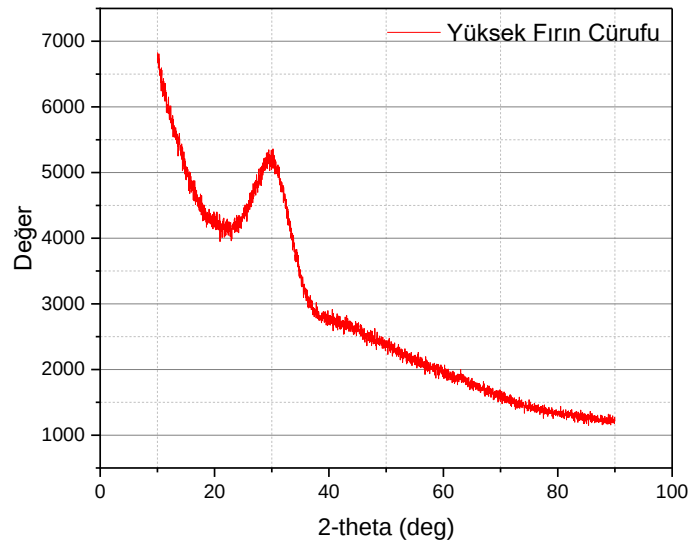
Tablo 3. Öğütülmüş Yüksek Fırın Cürufunun Kimyasal Bileşimi(%)

Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Na ₂ O	K ₂ O	CaO	SO ₃	MgO	LOI
10,09	3,13	38,88	0,51	0,62	35,59	2,32	7,79	0,39

SiO₂: Silisyum dioksit, CaO: kalsiyum oksit, Al₂O₃: alüminyum oksit, MgO: magnezyum oksit, Fe₂O₃: demir(III) oksit, SO₃: sülfür trioksit, K₂O: potasyum oksit, Na₂O: sodyum oksit, LOI: düz kızdırma kaybı

Tablo 4. Öğütülmüş Yüksek Fırın Cürufunun Fiziksel Özellikleri

Fiziksel Özellik	Değer	Deneysel yaklaşım
Özgül ağırlık (g/cm ³)	2,95	TS EN 196-6 (2020)
Özgül yüzey (blaine) (cm ² /g)	5443	TS EN 196-6 (2020)
Priz sonu (dakika)	229	TS EN 196-3 (2017)
Referans priz başlangıcı (dakika)	153	TS EN 196-3 (2017)
Nemlilik oranı(%)	0,99	TS EN 15167-1 (2006)



Şekil 19. Yüksek fırın cürufuna ait XRD deseni



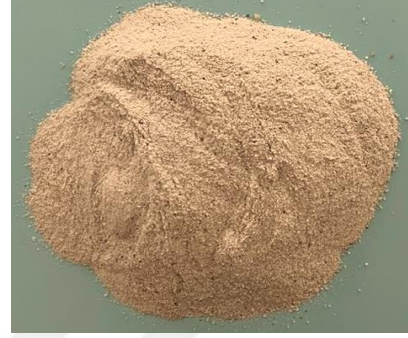
(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)



(g)

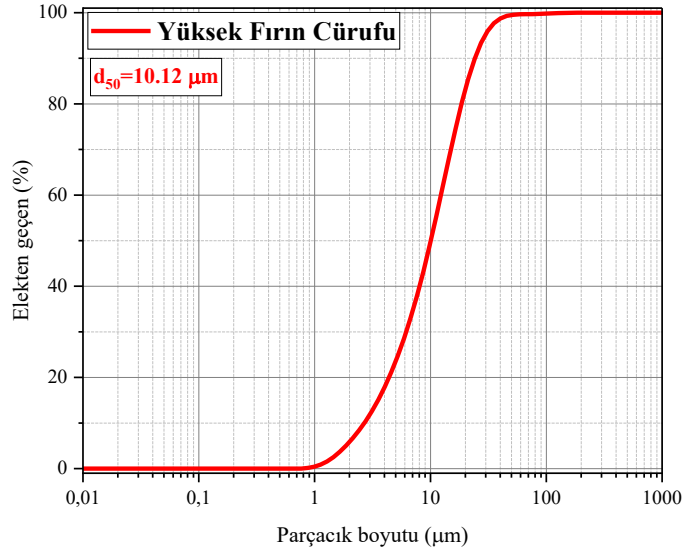


(h)



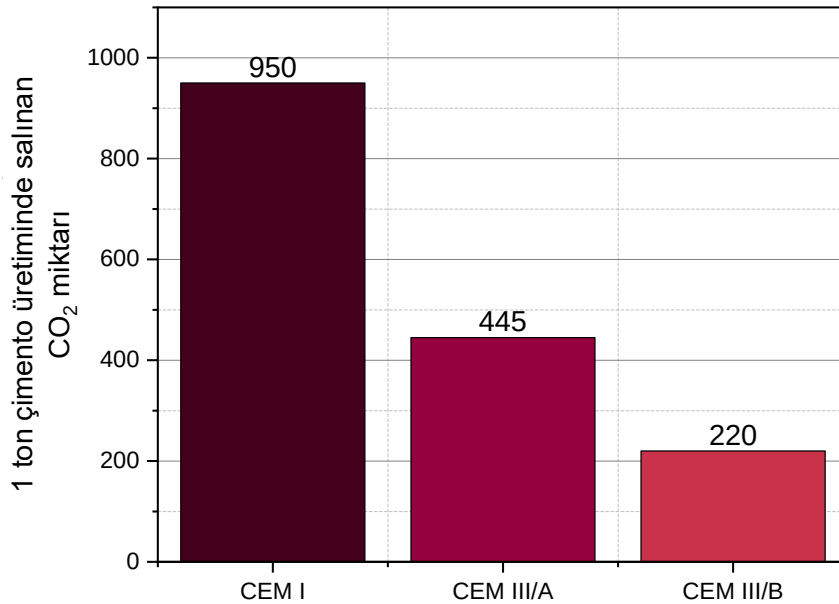
(i)

Şekil 20. Geopolimer yüksek kiriş üretiminde kullanılan malzemelerin görselleri a) Yüksek fırın cürufu, b) 0-0,5 mm boyutlarında kuvars tozu, c) Metakaolin, d) Atık mermer tozu, e) Kum, f) İri agrega, g) Sodyum silikat (Na_2SiO_3), h) Sodyum hidroksit (NaOH), ı) Kancalı çelik lif



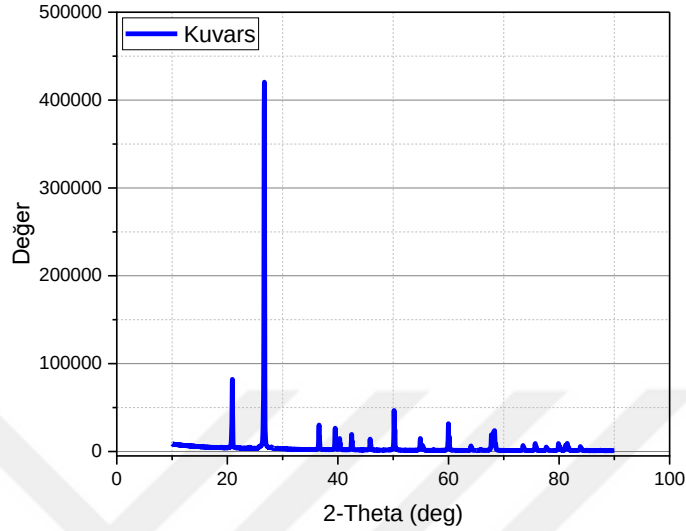
Şekil 21. Yüksek fırın cürufuna ait elek analizi

Yüksek fırın cürufu içeren çimentolar geleneksel çimentoya kıyasla daha az klinker içermesinden kaynaklı daha az CO₂ salımını yaparlar ve bundan dolayı bu tür çimentolar daha çevre dostudur. **Şekil 22**'deki grafiğe bakıldığında zaman yüksek fırın cürufunun bu özelliği daha iyi anlaşılmaktadır. Bununla birlikte daha az klinker kullanımı sayesinde azaltılan CO₂ salınımı, çevre dostu yapı malzemesi üretiminin mümkün olduğunu ortaya koymakta ve bu tez çalışmasının sürdürülebilir beton teknolojilerine katkı sağladığını kanıtlamaktadır. Bundan dolayı çalışmada esas bağlayıcı olarak öğütülmüş yüksek fırın cürufu tercih edilmiştir.



Şekil 22. Geleneksel çimento ve öğütülmüş yüksek fırın cürufu katkılı çimentonun CO₂ salınımı açısından karşılaştırması

Çalışmanın karışımlarda 0-0,5 mm boyutlarında kuvars tozu kullanılmıştır. Karışımlarda kullanılan kuvars tozuna ait XRD deseni **Şekil 23**'te ve kuvars tozuna ait görsel **Şekil 20b**'de verilmiştir. Kuvars tozu 2,71g/cm³ özgül ağırlığına sahiptir. Kuvars tozunun kimyasal bileşimi **Tablo 5**'te ve **Şekil 24**'de elek analizi verilmiştir.

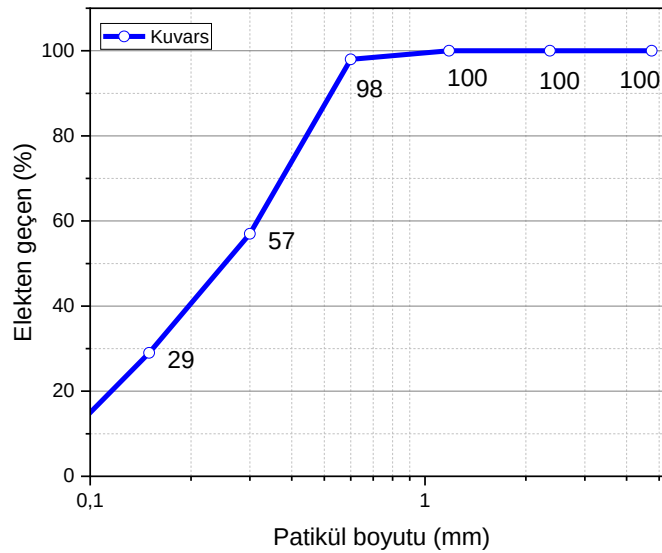


Şekil 23. Kuvars tozuna ait XRD deseni

Tablo 5. Kuvars Tozu Kimyasal Bileşimi(%)

Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	MgO
10,9	0,19	98,1	<0,09

SiO₂: silisyum dioksit, Al₂O₃: alüminyum oksit; Fe₂O₃: demir(III) oksit, MgO: magnezyum oksit



Şekil 24. Kuvars tozuna ait elek analizi

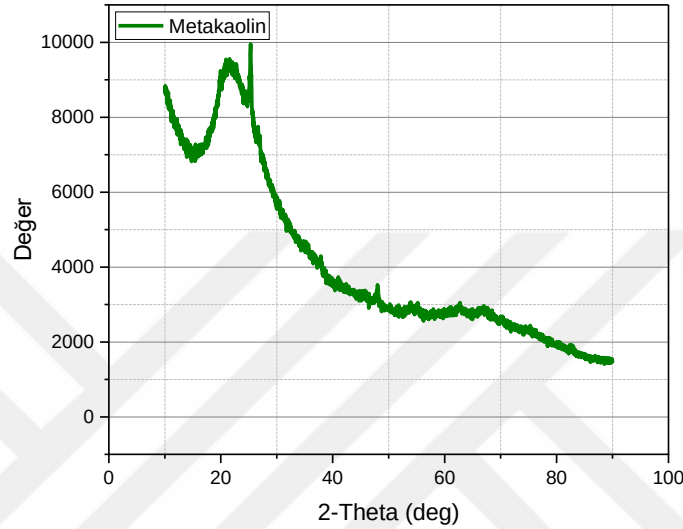
Geopolimer beton karışımında yüksek fırın cürufunun yanında bir miktar metakaolin kullanılmıştır. **Şekil 20c**'de metakaolin görseli verilmiştir. Kullanılan metakaolin malzemesi yüksek fırın cürufundan daha ince bir yapıdadır. Çalışmasında kullanılan metakaolin 2,62 g/cm³

özgül ağırlığına sahiptir. Metakaolinin kimyasal bileşimi **Tablo 6**'da, XRD deseni **Şekil 25**'de ve elek analizi **Şekil 26**'da verilmiştir.

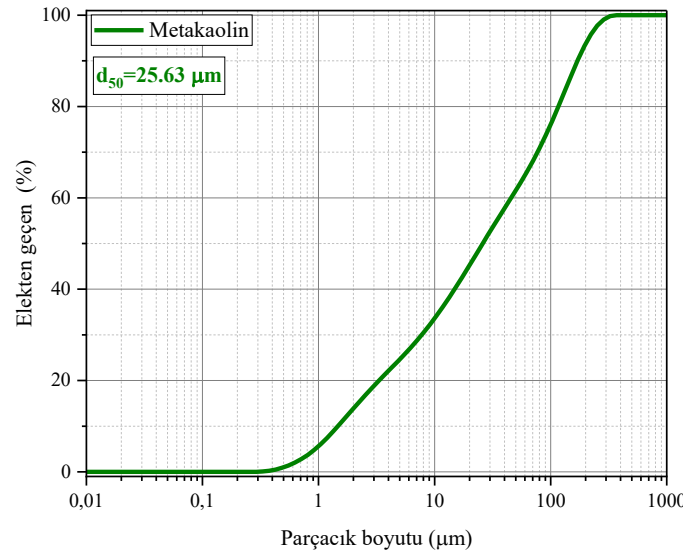
Tablo 6. Metakaolinin Kimyasal Bileşimi (%)

Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Na ₂ O	K ₂ O	CaO	SO ₃	MgO	LOI
37,9	0,69	57,59	0,48	0,79	0,79	0,19	0,29	0,69

SiO₂: Silisyum dioksit, CaO: kalsiyum oksit, Al₂O₃: alüminyum oksit, MgO: magnezyum oksit, Fe₂O₃: demir(III) oksit, SO₃: sülfür trioksit, K₂O: potasyum oksit, Na₂O: sodyum oksit, LOI: düz kızdırma kaybı



Şekil 25. Metakaoline ait XRD deseni



Şekil 26. Metakaoline ait elek analizi

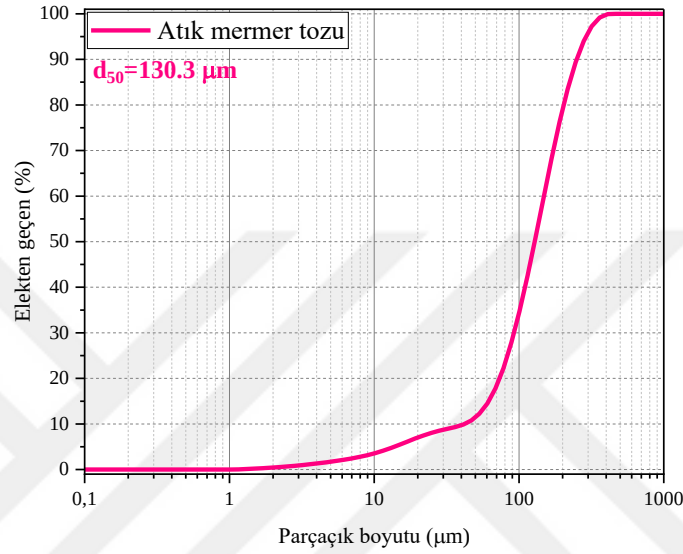
Geopolimer beton karışımında atık malzeme olarak mermer tozu kullanılmıştır. Kullanılan atık mermer tozuna ait görsel **Şekil 20d**'de verilmiştir. Atık mermer tozu 2,65g/cm³ özgül ağırlığına sahiptir. Çalışmada atık mermer tozunun kullanımı, atık malzemelerin değerlendirilmesini sağlamakta olup, çalışmanın çıkış noktalarından biri olan çevre dostu ve

sürdürülebilir bir inşaat sektörü hedefine katkı sağlamaktadır. Kullanılan atık mermer tozunun kimyasal bileşimi **Tablo 7**'de ve atık mermer tozuna ait elek analizi **Şekil 27**'de verilmiştir.

Tablo 7. Atık Mermer Tozunun Kimyasal Bileşimi (%)

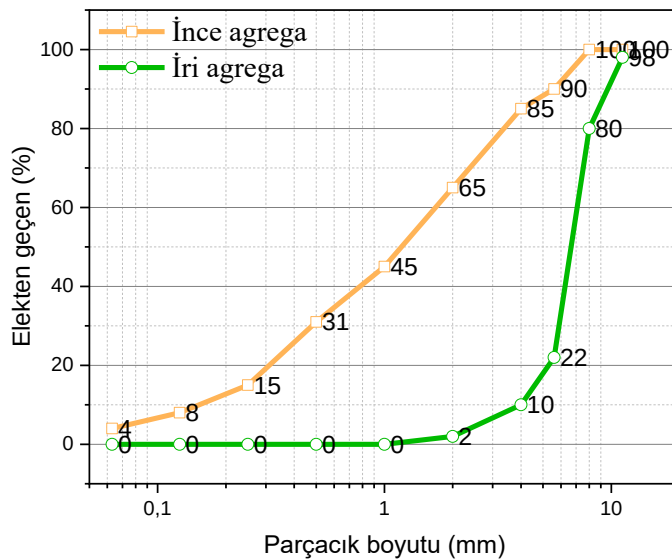
Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Na ₂ O	K ₂ O	CaO	SO ₃	MgO	LOI
0,09	0,09	0,39	0,19	0,09	53,19	0,09	0,39	44,99

CaO: kalsiyum oksit; SiO₂: silisyum dioksit veya silika; Al₂O₃: alüminyum oksit; Fe₂O₃: demir(III) oksit veya ferik oksit; MgO: magnezyum oksit veya magnezya; Na₂O: sodyum oksit; K₂O: potasyum oksit; SO₃: kükürt trioksit; LOI: kızdırma kaybı



Şekil 27. Atık mermer tozuna ait elek analizi

Geopolimer beton karışımında agrega olarak ince kum ve iri agrega kullanılmıştır. Kullanılan ince kum ve iri agrega 2,65g/cm³ özgül ağırlığına sahiptir. Sırasıyla **Şekil 20e** ve **Şekil 20f**'de bu iki malzeme ait görsele yer verilmiştir. İnce ve iri agregaya ait elek analizleri ise **Şekil 28**'de verilmiştir.



Şekil 28. İnce ve iri agregaya ait elek analizi

Yapılan tez çalışmasında alkali aktivatör malzeme adına sıvı fazda sodyum silikat (Na_2SiO_3) ve sodyum hidroksit (NaOH) kullanılmıştır. Bu bileşenler, geopolimerizasyon reaksiyonlarının başlatılması amacıyla karışıma dâhil edilmiştir. Karışım, (Na_2SiO_3)/(NaOH) oranı 2,5 olarak belirlenmiştir. Belirlenen bu oran, yapılan ön deneme dökümleri sonucunda hem yeterli işlenebilirlik hem de istenilen dayanımın sağlanabilmesi açısından en uygun değer olarak tespit edilmiştir. Kullanılan sodyum hidroksitin, 30 °C’de yoğunluğu 1,494 g/cm³, kaynama noktası ise 1390 °C’dir. Sodyum silikatın 20 °C’de yoğunluğu 1,39–1,41 g/cm³ aralığında olup, saflık derecesi 2 modül olarak belirlenmiştir. Hazırlanan karışımında kullanılan sodyum silikat ve sodyum hidroksite ait görseller sırasıyla **Şekil 20g** ve **Şekil 20h**’te verilmiştir. Bu alkali aktivatörlerin kimyasal özellikleri ise **Tablo 8**’de ve **Tablo 9**’da verilmiştir.

Tablo 8. Sodyum Silikatın Kimyasal Bileşimi (%)

H ₂ O	Na ₂ O	SiO ₂	Fe
62,99	8,79	27,99	<0,011

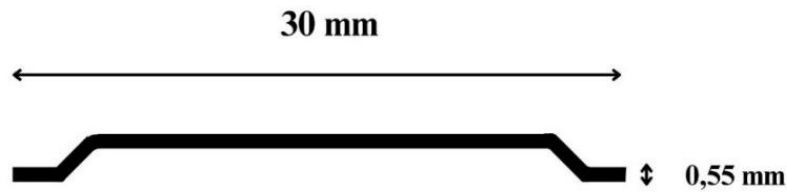
SiO₂: silisyum dioksit veya silika; Na₂O: sodyum oksit; H₂O: su; Fe: demir

Tablo 9. Sodyum Hidroksitin Kimyasal Bileşimi (%)

Na ₂ CO ₃	NaOH	Cl	Fe	SO ₄	Al
0,29	98	<0,011	<0,011	<0,011	<0,011

Na₂CO₃: sodyum karbonat; NaOH: sodyum hidroksit; Cl: klorür; SO₄: sülfat; Fe: demir; Al: alüminyum

Lifli yüksek kırı ş karışımlarında lif olarak çelik lif kullanılmıştır. Karışım içerisinde rastgele dağılan çelik liflerin yüksek çekme mukavemeti ve dayanıklılığı sayesinde karışımın mekanik özelliklerinin artırılması hedeflenmiştir. 30 mm uzunluğunda çelik lif kullanılmıştır. Çelik lifin uç kısmında bulunan kancaların amacı betonda aderansı artırmaktır. Çalışmada kullanılan çelik life ait özellikler **Tablo 10**’da verilmiştir. Ayrıca çelik life ait görsel **Şekil 20a**’da ve **Şekil 29**’da çelik life ait basit bir model verilmiştir.



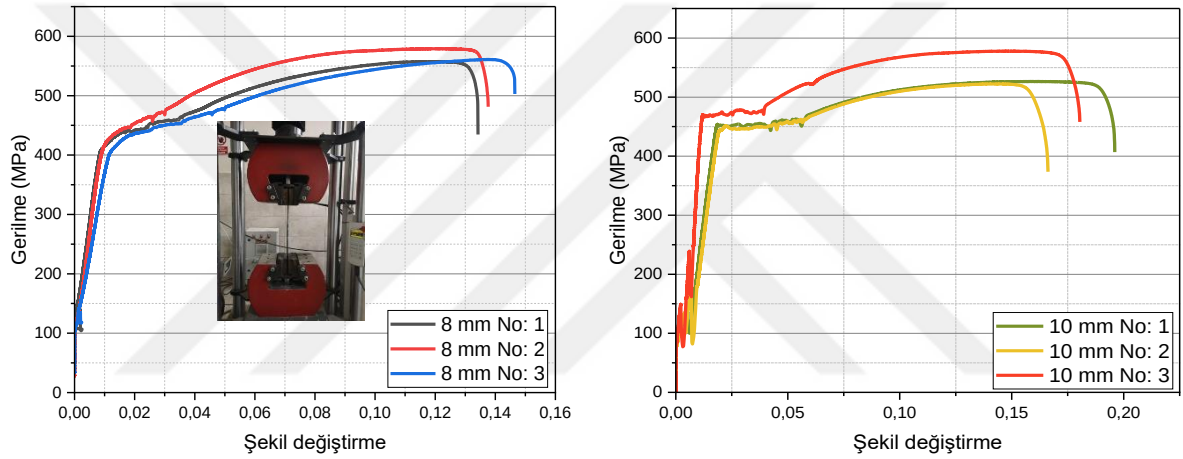
Şekil 29. Çelik lif modeli

Tablo 10. Çelik Lif Teknik Özellikleri

Çekme dayanımı (MPa)	1345
Elastisite modülü (GPa)	210
Maksimum dayanımda gerinim (%)	0,8
Özgül ağırlık (gr/cm ³)	7,6
Standart uygunluğu	ASTM A820, EN 14889-1 ve ISO 13270 A Sınıfı

Donatı elemanları ve ölçüm için kullanılan malzemeler

Geopolimer esaslı yüksek kirişlerin üretiminde, enine donatı olarak 8 mm ve boyuna donatı olarak 10 mm çapında nervürlü donatılar tercih edilmiştir. Betonarme kirişlerde kullanılan bu donatılardan rastgele seçilen üç örnek üzerinden çekme testi gerçekleştirilmiştir. Bu testler sonucunda elde edilen gerilme-şekil değiştirme ilişkileri, **Şekil 30**'da sunulmuştur.

**Şekil 30.** 8 mm ve 10 mm çaplı donatı gerilme-şekil değiştirme eğrileri

Yapılan deneysel çalışmada, betonarme yüksek kiriş örneklerinde oluşan sehim, yer değiştirme gibi çeşitli parametrelerin belirlenmesi amacıyla deformasyon ölçüm ekipmanları olarak LVDT (Linear Variable Differential Transformer) tipi cihazlar kullanılmıştır. Kullanılan LVDT'lerin ölçüm doğruluğu 0,001 mm hassasiyetindedir. Bu cihazlardan elde edilen ölçüm verileri dijital ortama aktarılmış, ardından gerekli hesaplamalar yapılarak değerlendirmeye tabi tutulmuştur.

Beton karışım oranları ve beton döküm aşaması

Yapılan tez çalışmasında geopolimer beton teknolojisi ile üretilen yüksek kirişlerde a/d oranı, boyuna donatı oranı, yatay donatının varlığı ve çelik lifin kesme davranışına etkisinin deneysel olarak incelenmesi üzere 12x40x120cm boyutlarında 12 adet kiriş üretimi yapılmıştır. Yapılan çalışmada yukarıdaki parametrelerin etkilerini incelemek amacıyla tüm kirişler için aynı beton karışım oranı kullanılmıştır. Deneysel çalışmada yüksek fırın cürufu esaslı

geopolimer beton üretilmiştir. Dolayısıyla tüm karışımlarda esas bağlayıcı malzeme olarak yüksek fırın cürufu ile birlikte metakaolin de kullanılmıştır. Geopolimer beton karışım miktarları **Tablo 11**'de verilmiştir. Söz konusu karışım oranları ve miktarları, ön döküm çalışmaları sırasında elde edilen işlenebilirlik, kıvam ve dayanım gibi performans kriterlerinin değerlendirilmesi sonucunda belirlenmiştir.

Tablo 11. Geopolimer Beton Karışım için Kullanılan Malzemelerin Miktarları (1 m³/kg)

Malzeme	Birim hacim ağırlık	M1	M2	M3
Yüksek fırın cürufu	2,70	850	850	850
Metakaolin	2,60	25	25	25
Mermer tozu	2,65	70	70	70
Kuvars	2,71	200	200	200
İnce agreg	2,65	300	300	300
İri agreg	2,65	180	180	180
Sodyum silikat	1,42	160	160	160
Sodyum hidroksit	1,42	400	400	400
Çelik lif	7,60	0	6,46	12,92
Çelik lif (%)	-	-	0,5	1
Bağlayıcı/Aktivatör	-	0,64	0,64	0,64
S.Hidroksit/S.Silikat	-	2,5	2,5	2,5

4 adet yüksek kirişte %0,5 ve 4 adet yüksek kirişte %1 olmak üzere toplamda 8 adet kirişte çelik lif kullanılmıştır. Kirişlerde toplamda 77,5 kg çelik lif katkısı kullanılmıştır. Toplamda üretilen 12 adet kirişten geriye kalan 4 adet kirişte ise çelik lif katkısı kullanılmamıştır.

Yüksek kiriş dökümü için kullanılacak kalıplar sanayide hazırlanmıştır. Kalıp malzemesi olarak 2 mm kalınlığında sac malzeme kullanılmıştır ve kalıp için kullanılan sac malzemesi kaynak ile birleştirilmiştir. Hazırlanan kalıplara ait görsel **Şekil 31**'de verilmiştir.



Şekil 31. Yüksek kiriş dökümü için kullanılan kalıp görseli

Tez çalışması için yapılan yüksek kiriş beton döküm işlemi Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği bölümü laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Döküm işlemi için 300 dm³ kapasitesine sahip laboratuvar tipi betoniyer kullanılmıştır. Kirişler için beton dökümü yapılırken lif katkısı bulunmayan ve farklı iki lif içeriğine sahip karışımlardan basınç, yarmada çekme ve eğilme deneyleri için TS EN 12390-1 (2021), standardına uygun olarak numuneler alınmıştır. Basınç dayanımı için dört adet 100x200 mm boyutlarında silindir, yarmada çekme dayanımı için altı adet 100x200 mm boyutlarında silindir ve eğilme dayanımı için 70x70x280 mm boyutlarında altı adet prizma numuneler alınmıştır. Beton dökümünden sonra yüksek kirişler ve alınan numuneler yaklaşık 24 saat sonra kalıptan çıkarılmıştır. Kalıptan çıkarılan kirişler ve numuneler deney gününe kadar laboratuvar ortamında ortam kürü uygulanmıştır. Beton dökümünden 7 gün sonra yüksek kirişlere deneyler uygulanmıştır. Bununla beraber betonun basınç için üç adet, yarmada çekme için üç adet ve eğilme için üç adet alınan numunelere deneyler uygulanmıştır. Her birinden kalan üçer adet numuneye ise deneyler 28 gün sonra uygulanmıştır. Dökülen yüksek kirişlere ait bazı görseller **Şekil 32a**'da ve kirişlerden alınan numunelere ait bazı görseller **Şekil 32b**'de verilmiştir.



(a)

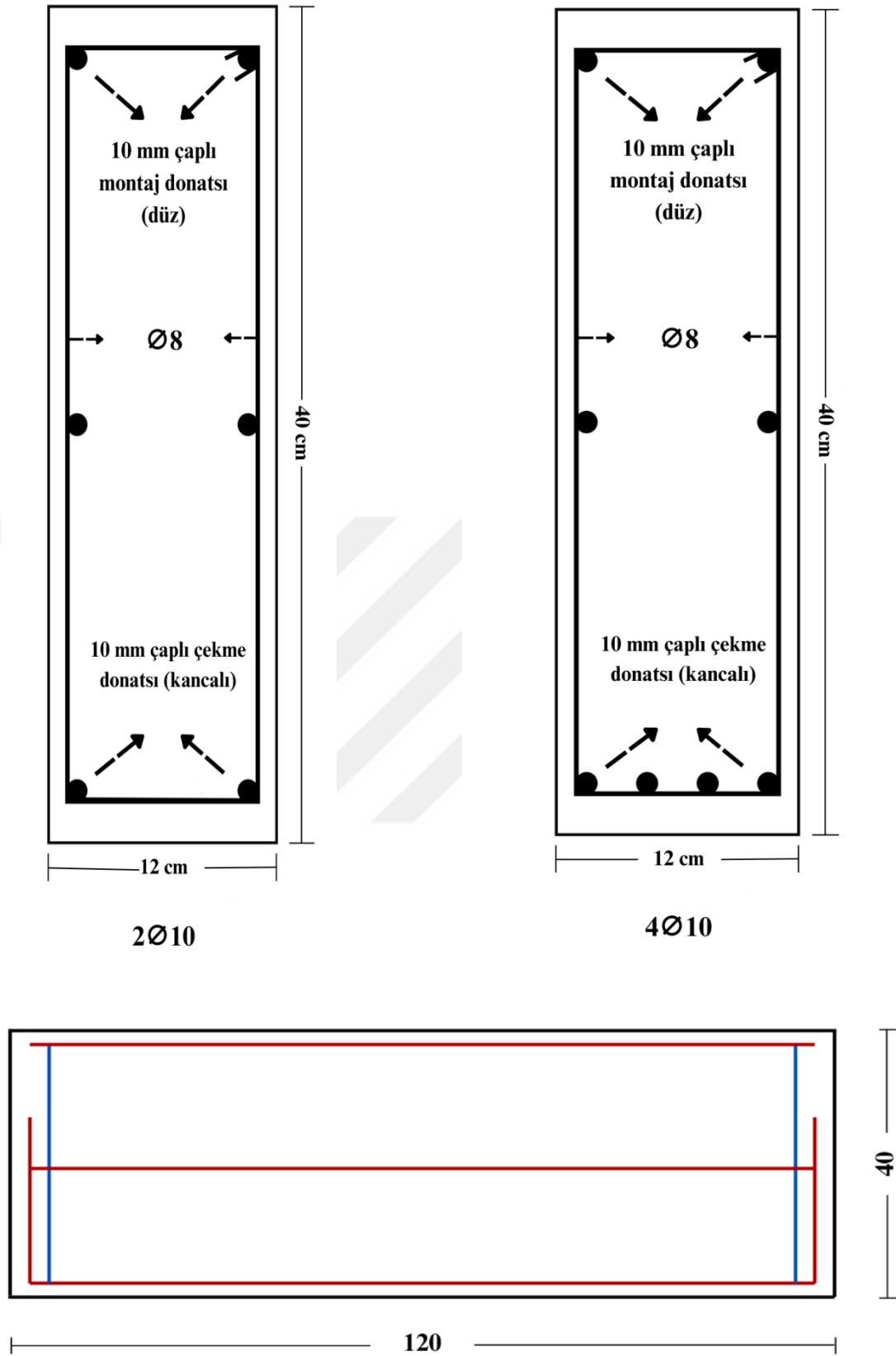


(b)

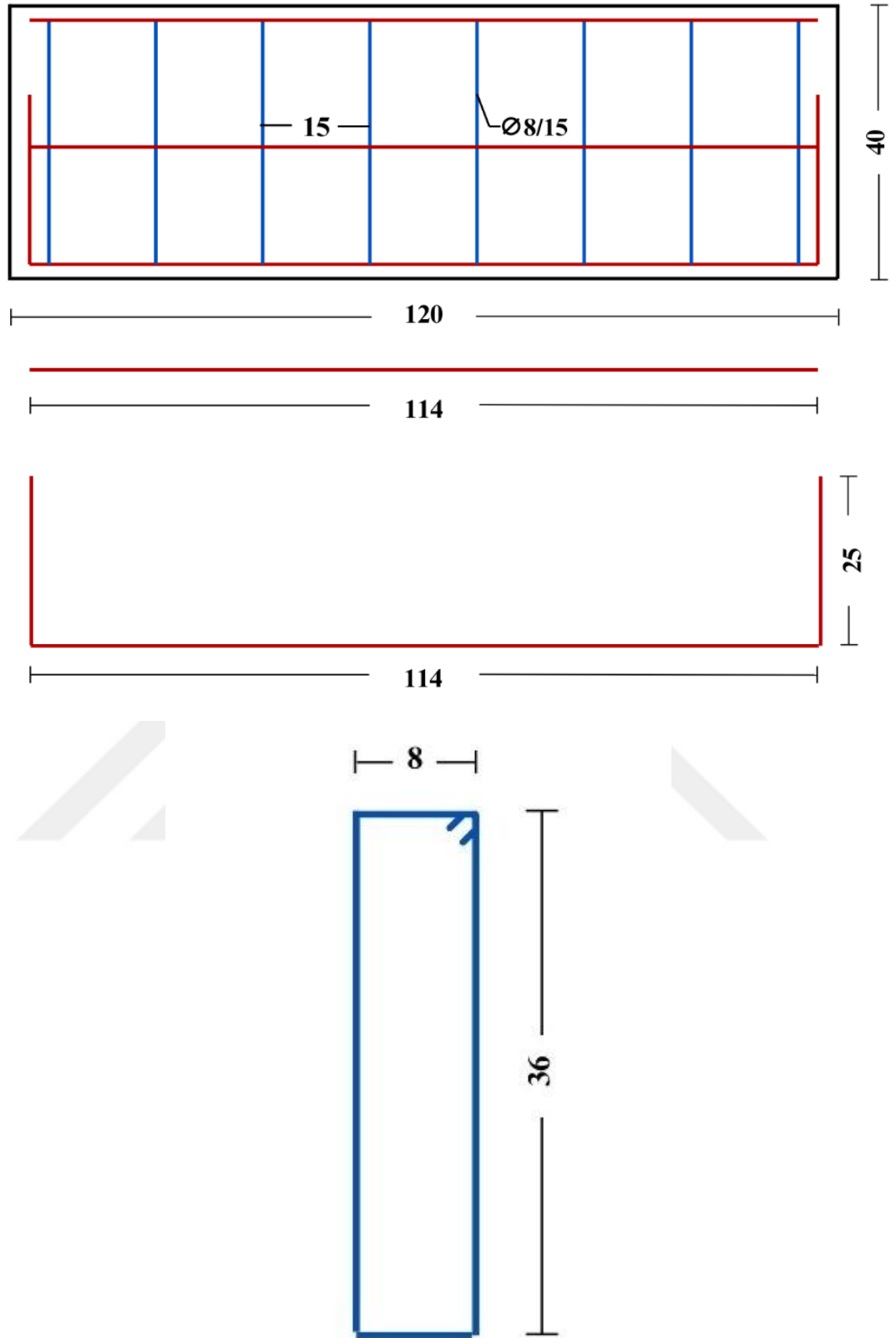
Şekil 32. (a) Yüksek kiriş dökümü ve (b) numune alımı

Deney numunelerini geometrisi ve donatı detayları

Yapılan tez çalışmasında, geopolimer beton kullanılarak üretilmiş toplam 12 adet yüksek kiriş numunesi üzerinde kesme davranışının deneysel olarak incelenmesi amaçlanmıştır. Kiriş boyutları, 12x40x120 cm olacak şekilde tasarlanmıştır. Tüm kirişlerde pas payı 30 mm olarak sabit tutulmuştur. Çekme bölgesinde kullanılan boyuna donatılarda 25 cm uzunluğunda kanca boyu bırakılmıştır. Montaj donatı olarak kullanılan boyuna donatılarda ise kanca boyu oluşturulmamış olup 114 cm uzunluğunda donatı kullanılmıştır. Kirişlerde 0,0035 (2Ø10) ve 0,007 (4Ø10) olmak üzere iki farklı boyuna donatı oranı kullanılmıştır. Yüksek kirişlerin bazılarında etriye kullanılırken bazılarında etriye bulunmamaktadır. Etriyenin bulunan yüksek kirişlerde 8 mm çapında ve 150 mm aralıkla enine donatı kullanılmıştır. Yatay donatının bulunmadığı kirişlerde ise sadece uç bölgelerde ve boyuna donatıları bir arada tutması için birer adet etriye kullanılmıştır. **Şekil 33a** da geopolimer yüksek kirişlerin geometrisi ve donatı detaylarının modelleri, **Şekil 33b** de ise kirişlere ait donatı düzenlerinin görselleri verilmiştir.



Şekil 33. (a) Yüksek kiriş geometrisi ve (b) donatı detayları (Birimler cm cinsindendir.)



(a)

Şekil 34. (a) Yüksek kiriş geometrisi ve (b) donatı detayları (Birimler cm cinsindendir.)
(devamı)



(b)

Şekil 35. (a) Yüksek kiriş geometrisi ve (b) donatı detayları (Birimler cm cinsindendir.)
(devamı)

Kiriş numuneleri, yüksek kırış davranışını temsil edecek şekilde boyutlandırılmış ve çalışmada değişken olarak iki farklı açıklık/derinlik (a/d) oranı dikkate alınmıştır. Bu oranlara karşılık gelen mesnet açıklıkları 58 cm ve 104 cm olarak belirlenmiş, böylece eğilme ve kesme davranışlarına olan etkilerinin karşılaştırmalı olarak analiz edilmesi hedeflenmiştir.

Kirişler, donatı düzenlemesi ve çelik lif katkısı açısından altı farklı gruba ayrılmıştır. Her bir grup, iki farklı a/d oranında tekrarlanarak toplamda 12 adet yüksek kırış elde edilmiştir. Çelik lif katkısının karışımlardaki hacimsel oranları (%0,5 ve %1), kapsamlı literatür taraması ve ön deneme niteliğindeki ön döküm deneyleri sonucunda, uygunluk ve uygulanabilirlik kriterleri dikkate alınarak belirlenmiştir. Çelik lif katkısı bulunmayan karışım (%0) kontrol grubu olarak seçilmiştir. %0,5 çelik lif oranı, geopolimer betonlarda hem işlenebilirliği kayda değer ölçüde bozmadan hem de çatlak oluşumunu sınırlayarak süneklik ve enerji sönmeme kapasitesini artıracak şekilde düşünüerek seçilmiştir. %1 lif oranı ise, lif katkısının daha yüksek seviyelerde kırış davranışına etkilerini gözlemlemek amacıyla eklenmiştir. Ayrıca hem çelik lif katkılı hem de lif katkısız geopolimer betonun kullanıldığı yüksek kırışlarda etriyenin bulunmadığı ve boyuna donatı oranının yarıya indirildiği durumlarda çelik lifin nasıl davranış sergileyeceğinin tespiti amaçlanmıştır. Etriye bulunmayan ve boyuna donatı oranının yarıya indirildiği kırışlarda özellikle kesme kuvveti açısından dayanım düşüşü beklenmektedir. Fakat geopolimer betonda çelik lif katkısı ile bu düşüşün ne ölçüde tolere edilebileceği deneysel olarak tespit edilmiştir.

İlk grup, boyuna ve enine donatının birlikte kullanıldığı kırışlardan oluşmaktadır. Bu grupta, Ø10'luk dört adet boyuna donatının yanı sıra, Ø8'lik enine donatılar 15 cm aralıklarla yerleştirilmiştir. İkinci grup ise sadece boyuna donatı (4Ø10) içermekte olup, enine donatı bulunmamaktadır. Üçüncü ve dördüncü gruplarda, sadece boyuna donatı(4Ø10) içeren kırışlara sırasıyla %0,5 ve %1 oranında çelik lif katkısı ilave edilmiştir. Beşinci ve altıncı gruplarda ise boyuna donatı oranı yarıya düşürülmüş (2Ø10) ve sırasıyla %0,5 ve %1 oranlarında çelik lif ilavesi yapılmıştır. Bu konfigürasyonla, azalan donatı miktarının çelik lif katkısıyla telafi edilemeyeceği değerlendirilmiştir.

Tüm numuneler, belirlenen konfigürasyonlara uygun şekilde hazırlanarak aynı kür koşullarında kür edilmiştir. Kür süreci sonunda kırışlar, üç noktalı eğilme deneyi düzeneğinde test edilmiştir. Deneylerde, kırışların ortasına tekil yük uygulanmış ve yükleme sırasında oluşan çatlak şemaları, maksimum taşıma kapasiteleri, yük-deplasman ilişkileri ve kırılma modları detaylı şekilde kaydedilmiştir. Ayrıca her testte, LVDT kullanılarak orta noktadaki düşey yer değiştirmeler izlenmiş ve veriler dijital sistemlere aktarılmıştır. Bu deneysel kurgu ile hem donatı düzenlemelerinin hem de çelik lif katkılarının kesme davranışına etkisi a/d oranı

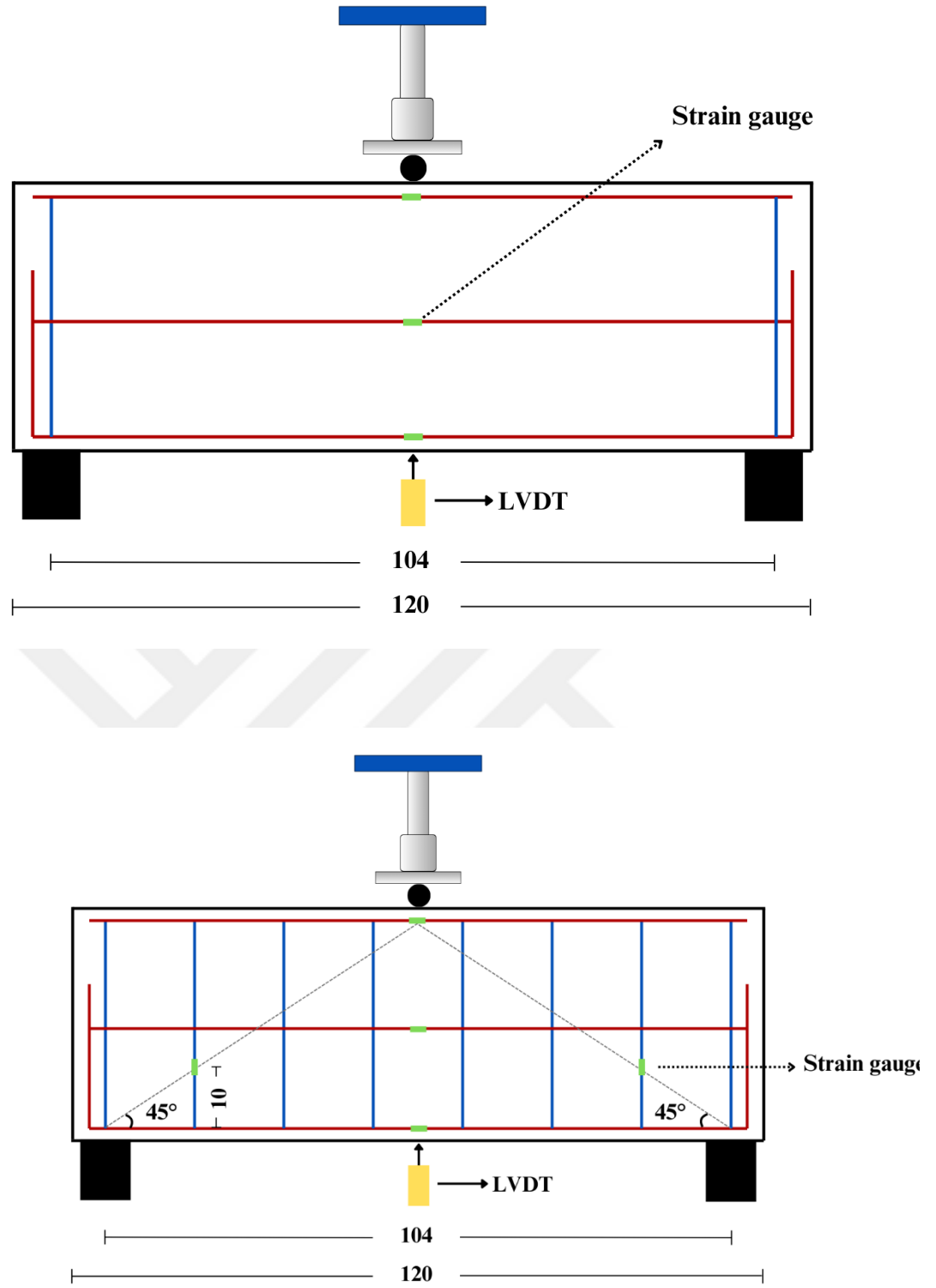
değişkeniyle birlikte karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Aşağıda bulunan **Tablo 12'** de donatı düzenlemeleri ve lif kullanılan kirişlerdeki lif içerikleri verilmiştir.

Tablo 12. Yüksek Kiriş Donatı Düzenlemeleri ve Çelik Lif İçeriği

	a/d	Boyuna Donatı	Enine Donatı	Çelik Lif Yüzdesi (%)
K1	0,75	4Ø10	Ø8/15	0
K2		4Ø10	-	0
K3		4Ø10	-	0,5
K4		4Ø10	-	1
K5		2Ø10	-	0,5
K6		2Ø10	-	1
K7	1,50	4Ø10	Ø8/15	0
K8		4Ø10	-	0
K9		4Ø10	-	0,5
K10		4Ø10	-	1
K11		2Ø10	-	0,5
K12		2Ø10	-	1

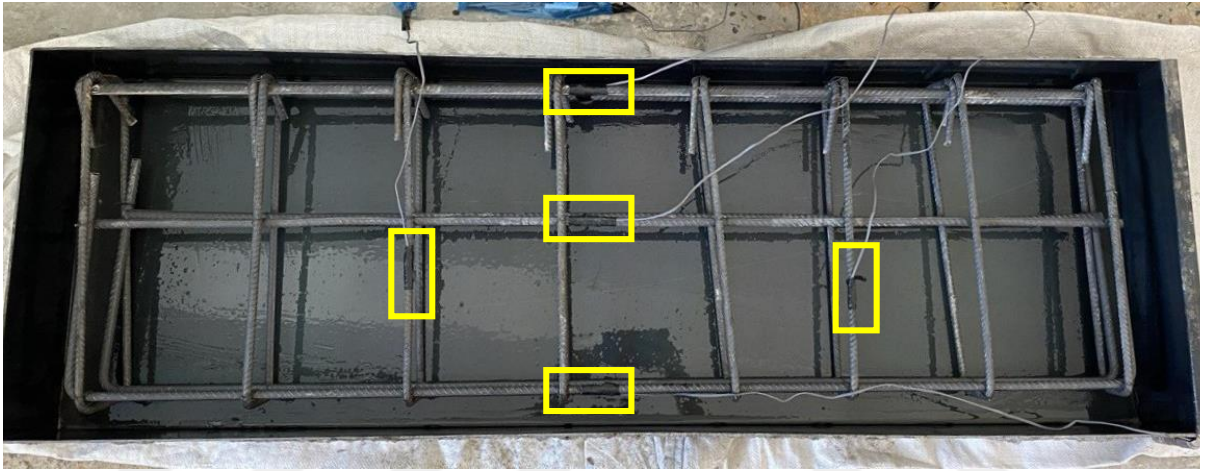
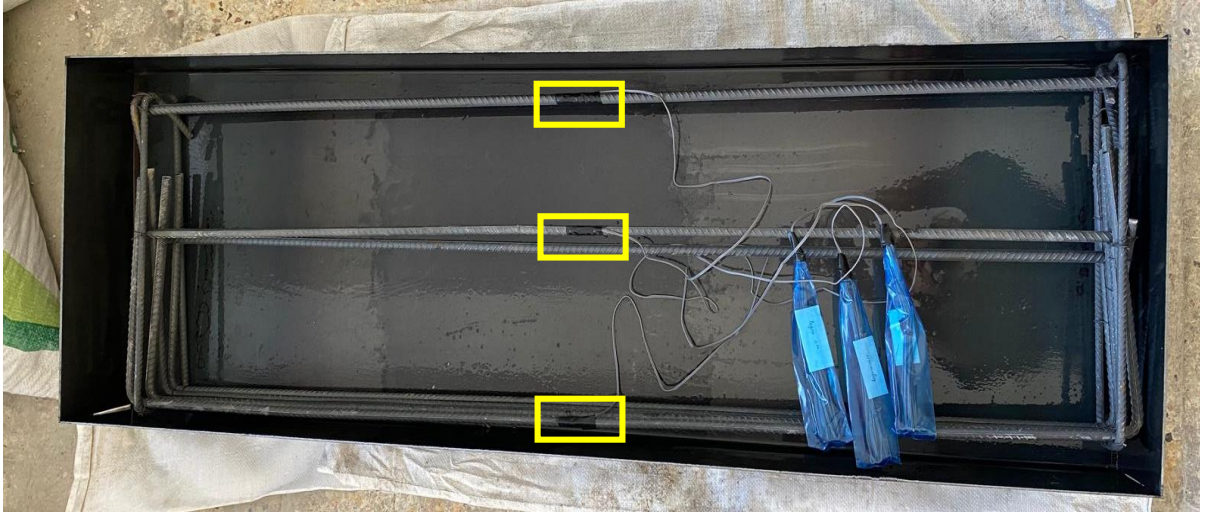
Bununla birlikte birim şekil değiştirme değerlerinin ölçülebilmesi için donatıların belirli bölgelerine ve dökümü yapılan kirişlerin beton basınç bölgelerine şekil değiştirme ölçer (strain gauge) yapıştırılmıştır. Bütün kirişlerde eğilme donatısının orta kısmına, etriyeli kirişlerde de ek olarak yüke en yakın ve öngörülen çatlağın alt noktalarına isabet edecek şekilde iki etriye üzerine şekil değiştirme ölçer (strain gauge) yerleştirilmiş birim şekil değiştirme değerleri ölçülmüştür.

Şekil değiştirme ölçerleri donatılara yapıştırmak için ilk önce yapıştırılacak konumlar belirlenmiştir. Daha sonra pamuk ve aseton yardımıyla donatılar temizlenip şekil değiştirme ölçerler hızlı yapıştırıcı ile konumlara yapıştırılmıştır. Yapıştırma işleminden sonra şekil değiştirme ölçerlerin üstleri koruma amacıyla elektrik bandıyla kaplanmıştır. Şekil değiştirme ölçerlere ilişkin sırasıyla etriyesiz ve etriyeli kirişlere ait model **Şekil 34a'** da, buna ait görseller **Şekil 34b'** de ve beton basınç bölgesine yapıştırılan şekil değiştirme ölçer **Şekil 34c'** de verilmiştir.



(a)

Şekil 36. Yüksek kirişlere şekil değiştirme ölçerlerin eklenmesi (Birimler cm cinsindendir.)



(b)



(c)

Şekil 37. Yüksek kirişlere şekil değiştirme ölçerlerin eklenmesi (Birimler cm cinsindendir.)
(devamı)

Yapıştırılan şekil değiştirme ölçerler etriyesiz kirişlerde alt, orta ve üst donatı olarak isimlendirilmiş etriyeli kirişlerde ek olarak sağ ve sol etriye olarak isimlendirilmiştir. Ayrıca beton dökümü yapılırken karışmaması adına özen gösterilmiştir.

Yöntem

Bu başlık altında, yürütülen deneysel çalışmada uygulanan deney prosedürleri, kullanılan deney düzenekleri ve gerçekleştirilen ölçüm yöntemleri ayrıntılı biçimde anlatılmıştır. Bu kapsamda üretilen yüksek kirişlerin kesme davranışını ve bu kirişlerin beton dökümü esnasında alınan numunelerin mekanik davranışlarının belirlemek amacıyla farklı deneyler uygulanmıştır. Uygulanan bu deney yöntemleri bu başlık altında anlatılmıştır. Bölümün sonunda ise, bu tez çalışması kapsamında elde edilmesi hedeflenen yapısal parametreler ve bu parametrelerin deneysel veriler ışığında nasıl analiz edildiği açıklanmıştır.

Geopolimer yüksek kirişlerin beton dökümü yapılırken basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve yarmada çekme dayanımının belirlenmesi için alınan numunelere mekanik test işlemleri yapılmıştır. İlk önce basınç dayanımının belirlenmesi amacıyla 100x200 mm boyutlarında silindir numune örnekleri alınmıştır. Basınç dayanımlarının belirlenmesi amacıyla alınan bu numuneler, TS EN 12390-3 (2019) standardı doğrultusunda, sabit 0,6 MPa/sn yükleme hızıyla basınç yüklemesine tabi tutulmuştur. Yükleme, numuneler göçme moduna ulaşana dek sürdürülmüştür. Deney sonucunda kaydedilen maksimum yük (N), numunenin enine kesit alanına (m^2) bölünerek karakteristik basınç dayanımı (F/A) hesaplanmıştır (**Şekil 35**).

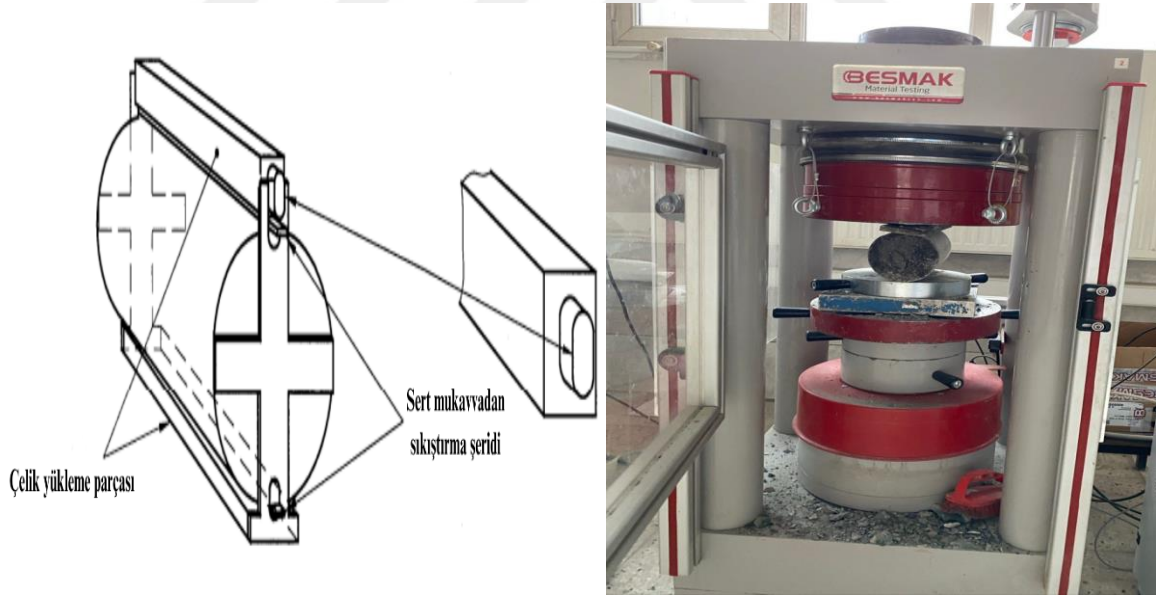


Şekil 38. Basınç dayanımı deneyi için deney düzeneği

Betonun çekme dayanımını belirlemek amacıyla farklı deneysel yaklaşımlar literatürde yer almakta olup, bu yöntemler genel olarak eksenel çekme, yarmada çekme ve eğilme altında çekme dayanımı gibi sınıflandırılmaktadır. Yapılan tez çalışmasında yarmada çekme deneyi tercih edilmiştir. Tercih edilen bu deney yönteminde uygulama, TS EN 12390-6 (2024) standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir; testlerde 100x200 mm boyutlarında olan silindirik beton numuneleri kullanılmıştır. Numunelere yükleme, 0,06 MPa/sn yükleme hızıyla uygulanmış ve numune göçme moduna ulaşınca dek devam ettirilmiştir. Maksimum yük değeri, deneyin sonunda kaydedilmiş ve çekme dayanımı bu verilere dayalı olarak hesaplanmıştır. İlgili deney düzeneği modeli ve deneyin uygulandığı cihaz görseli **Şekil 36'** da gösterilmiştir. Hesaplama, TS EN 12390-6 (2024) standardında yer alan denkleme göre yapılmış olup, çekme dayanımı hesabı için gereken formül **Eşitlik 1'**de verilmiştir.

$$f_{ct} = \frac{2F}{\pi \cdot L \cdot d} \quad (1)$$

f_{ct} : Yarmada çekme dayanımı MPa (N/mm²), F: En büyük yük (N), L: Numunenin yükleme parçasına temas çizgisi uzunluğu (mm), d: Numunenin seçilen en kesit boyutu (mm)



Şekil 39. Yarmada çekme deneyi için deney düzeneği modeli ve deneyin uygulandığı cihaz

Betonun eğilme dayanımını belirlemek üzere, boyutları 70×70×280 mm boyutlarında olan prizma numuneler hazırlanmış ve bu numuneler üzerinde gerekli deneyler gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneyler, TS EN 12390-5 (2019) standardına uygun olarak yapılmıştır. Numuneler, **Şekil 37'** de verilen düzenekte, göçme moduna ulaşana dek 0,06 MPa/sn yükleme hızıyla teste tabi tutulmuştur. Deney sırasında elde edilen maksimum yük (F),

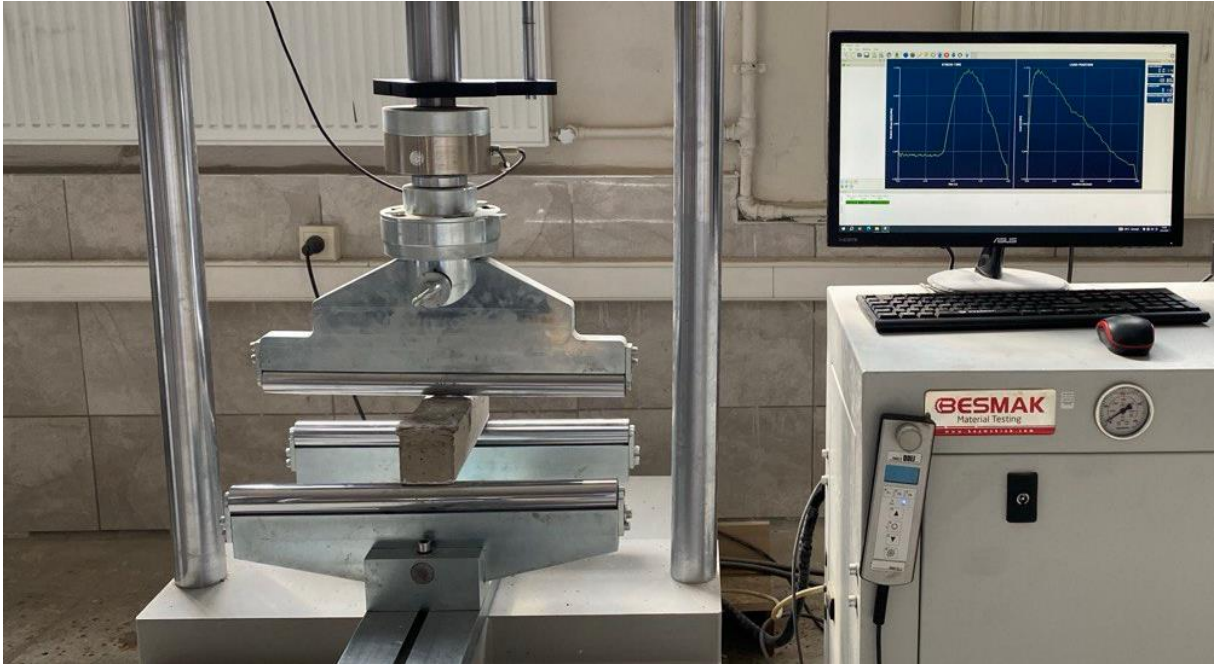
eğilme dayanımının belirlenmesinde kullanılmıştır. Hesaplamalar, ilgili standartta verilen formül doğrultusunda yapılmış ve eğilme dayanımı hesabı için formül **Eşitlik 2**'de verilmiştir.

$$\frac{3.F.L}{2.d_1.d_2^2}$$

(2)

$$f_{cf} = \frac{3.F.L}{2.d_1.d_2^2}$$

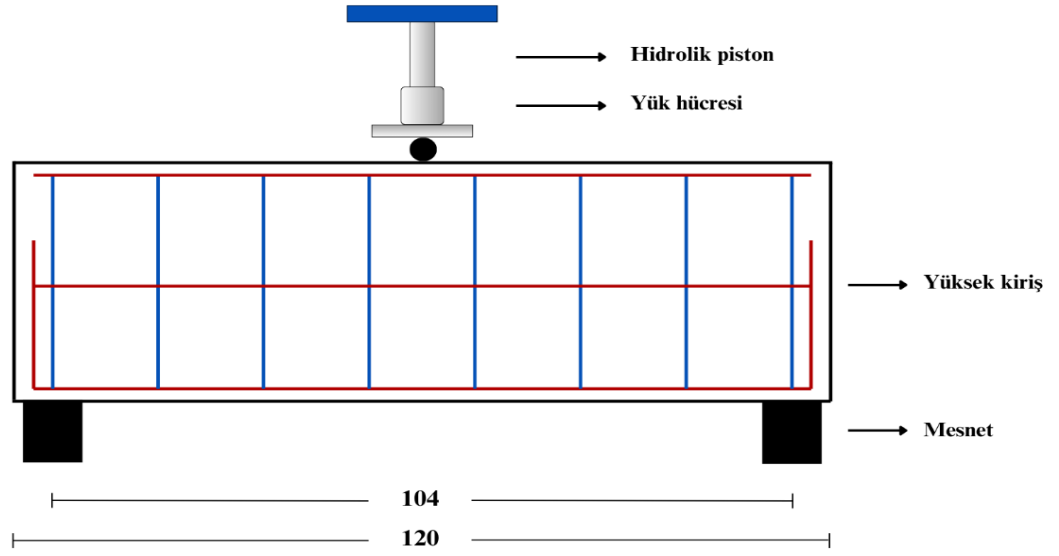
f_{cf} : Eğilme dayanımı MPa (N/mm²), F: En büyük yük (N), L: Mesnet silindirleri arasındaki açıklık (mm), d_1 ve d_2 : Numunenin en kesit boyutları (mm)



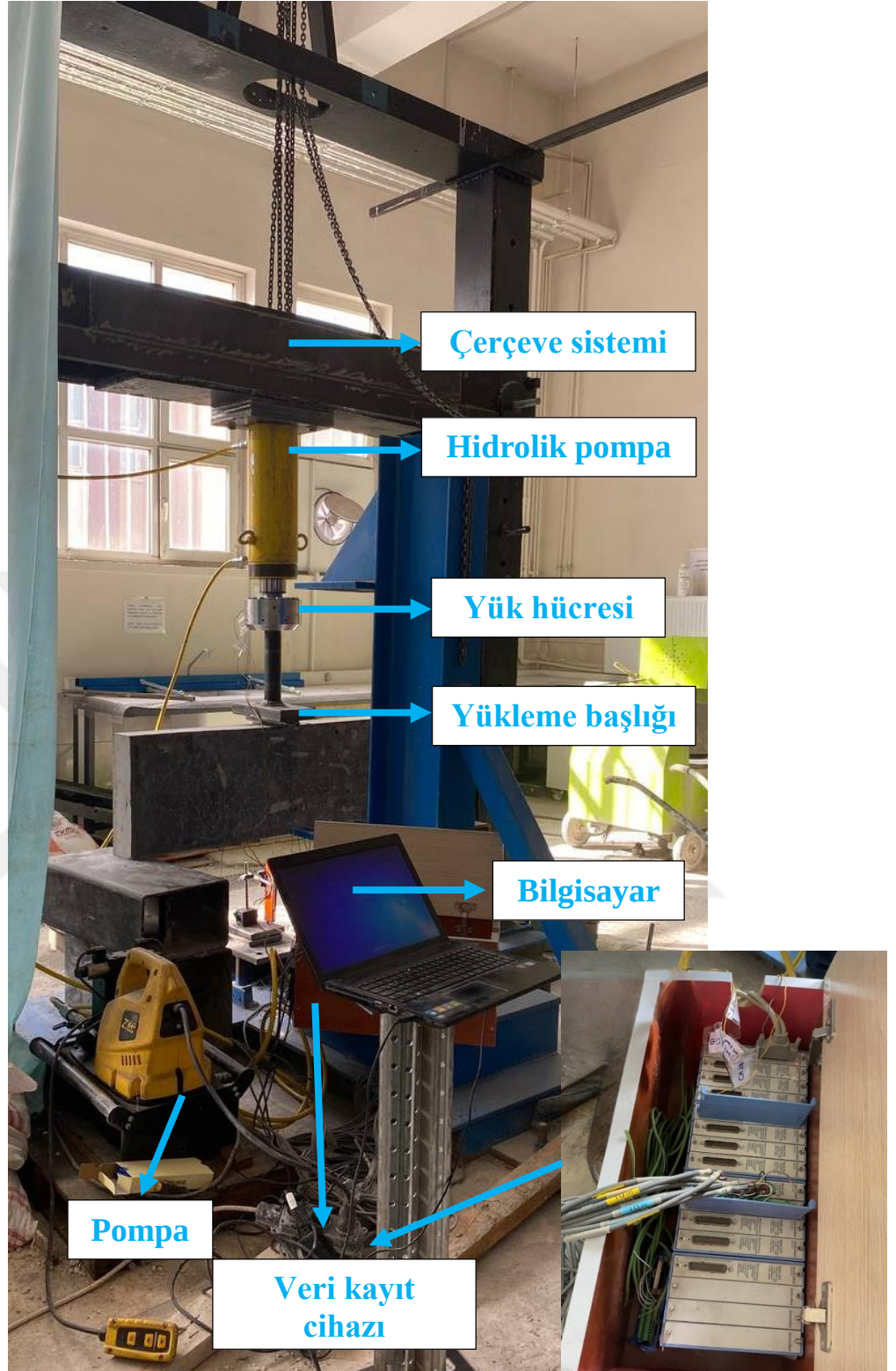
Şekil 40. Eğilme dayanımı deneyi için kullanılan deney düzeneği

Deney düzenekleri ve ölçüm sistemleri

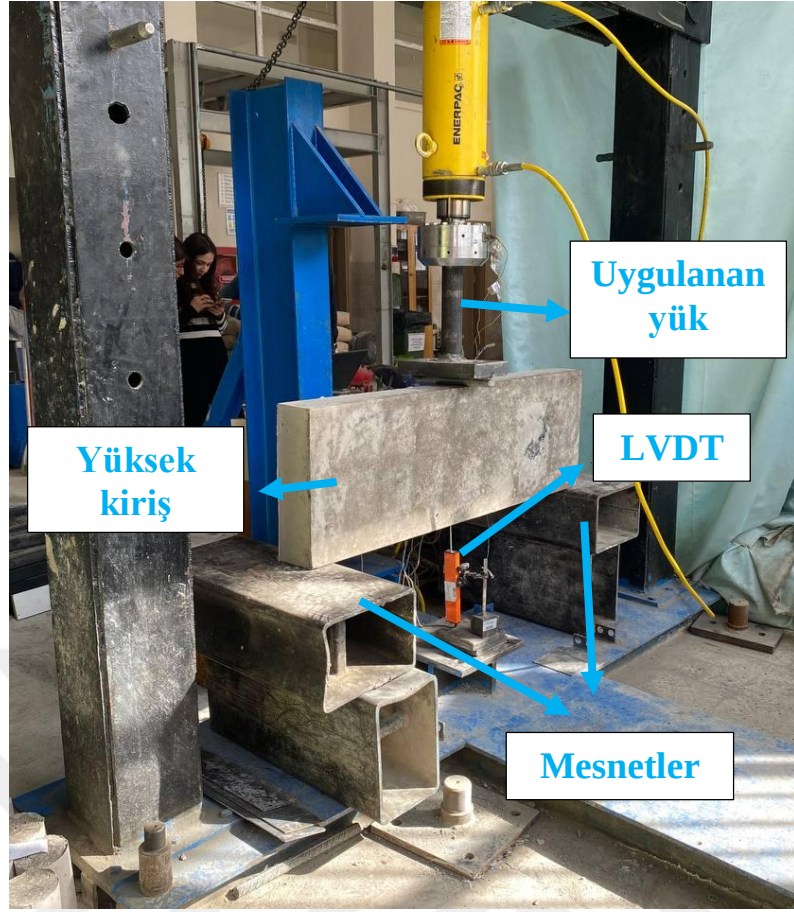
Yapılan tez çalışmasında geoplimer yüksek kirişlerin kesme davranışının belirlenmesi amacıyla üç noktalı eğilme deney düzeneği kullanılmıştır. Kullanılan düzeneğe ait model **Şekil 38**' de, düzeneğe ait görseller **Şekil 39** ve **Şekil 40**' da verilmiştir. Kullanılan deney düzeneğinde bir adet yük hücresi ve bir adet hidrolik pompa sistemi (90 kN kapasiteli) bulunmaktadır. Deney anında kirişlerdeki yer değiştirmelerin ölçülmesi amacıyla LVDT ölçüm sistemi kullanılmıştır. Yapılan bu ölçümlerden elde edilecek veriler, veri kayıt cihazı ile kayıt altına alınıp bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Aktarılan veriler program aracılığıyla yorumlanmıştır.



Şekil 41. Üç noktalı eğilme deney düzeneği modeli



Şekil 42. Üç noktalı eğilme deney düzeneğine ait görsel



Şekil 43. Üç noktalı eğilme deney düzeneğine ait görsel

Geopolimer yüksek kirişlerin kesme davranışlarının belirlenmesi amacıyla üç noktalı eğilme deney düzeneği kullanılmıştır. Deney numunesi sağ ve sol taraftan mesnetlere oturtulmuştur. Yüksek kirişlerde a/d oranı etkisinin incelenmesi amacıyla kırım yaparken iki farklı mesnet açıklığı oluşturulmuştur. Bu amaçla mesnet açıklığı azaltılmıştır. Deney düzeneğinde yük uygulaması kirişin orta noktasından tek bir noktadan uygulanmıştır. Üç noktalı eğilme deneyleri yük kontrollü olarak uygulanmıştır. Tüm eğilme deneylerinde 2 kN/sn yükleme hızı uygulanmıştır. Lifli numuneler de göz önünde bulundurularak tüm numunelerde maksimum yüke ulaştıktan sonra %40 dayanım kaybı olduğunda deneyler sonlandırılmıştır. Üç noktalı eğilme deneylerinde orta nokta deplasmanının tespiti için numunenin orta noktasına LVDT yerleştirilmiştir. En yüksek deplasman orta noktada beklendiği için LVDT numunenin orta noktasına yerleştirilmiştir.

ARAŞTIRMA BULGULARI

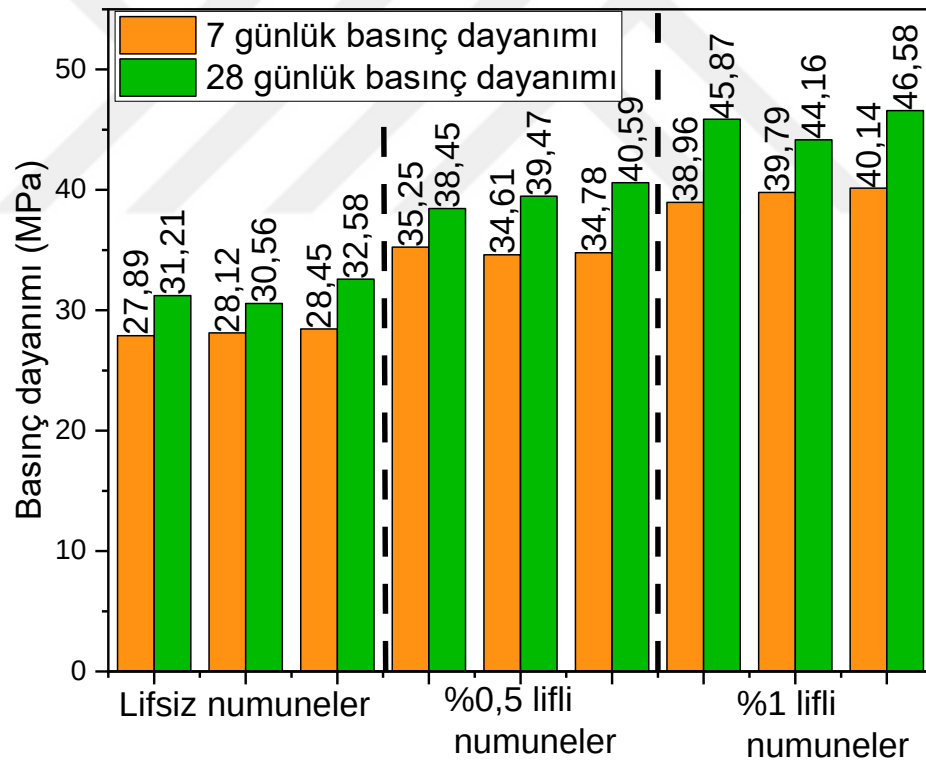
Bu bölümde deneysel çalışma sonucunda elde edilen bulgular değerlendirilmiştir. Öncelikle betonarme kirişlerin beton dökümü sırasında alınan numunelerin mekanik özellikleri değerlendirilmiştir. 7 ve 28 günlük basınç dayanımı, 7 ve 28 günlük eğilme dayanımı ve 7 günlük yarmada çekme dayanımı sonuçları öncelikle ele alınmıştır. Daha sonra betonarme yüksek kirişlerin deney sonuçları ele alınmıştır. Yük-deplasman eğrileri, enerji sönümleme kapasiteleri, göçme modları, beton ve donatıdaki gerinim değerleri, maksimum yük taşıma kapasiteleri, akma ve ilk çatlak yük değerleri ve bu değerlere karşılık gelen deplasman değerleri yorumlanmıştır.

Basınç, Eğilme ve Yarmada Çekme Dayanımı Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Tablo 13 ve **Şekil 41**'de 7 ve 28 günlük basınç dayanımı sonuçları gösterilmiştir. Geopolimer beton karışımından alınan numunelere gereken basınç deneyleri yapıldı. Yapılan 7 günlük basınç deneyleri sonucunda, deneyde kullanılan çelik lif katkısı ile betonun mekanik özelliklerinde artış gözlemlenmiştir. Çelik lif kullanılmayan numunelerde ortalama basınç dayanımı 28,15 MPa olarak kaydedilirken %0,5 çelik lif katkısı kullanılan numunelerdeki bu değer 34,88 MPa, %1 çelik lif katkısı kullanılan numunelerde ise 39,63 MPa olarak kaydedilmiştir. Kaydedilen bu değerler değerlendirildiğinde, çelik lif kullanıldığında basınç dayanımında yaşanan artışlar sırasıyla yaklaşık %24 ve %41 oranındadır. Burada geopolimer betonda çelik lif kullanımının basınç dayanımına etkisinin gözle görülür bir artış sağladığı görülmektedir. Yapılan 28 günlük basınç dayanımı sonuçları bakıldığında, çelik lif katkısı bulunmayan numunelerde ortalama basınç dayanımı 31,45 MPa olarak kaydedilmiştir. %0,5 çelik lif katkılı numunelerde bu değer ortalama 39,50 MPa ve %1 çelik lif katkılı numunelerde ise 45,54 MPa olarak kaydedilmiştir. Elde edilen bu sonuçlar, lif katkısı bulunmayan geopolimer betona kıyasla dayanım artışı sırasıyla yaklaşık %26 ve %45 oranındadır. Kaydedilen bu artış, 28 günlük yaş dayanımında beton matrisinde gelişen içyapının çelik lif katkısıyla birlikte daha yüksek dayanım elde edildiği gözlemlenmiştir.

Tablo 13. 7 ve 28 Günlük Basınç Dayanımı Sonuçları (MPa)

Numune	7 günlük basınç dayanımı	Ortalama	28 günlük basınç dayanımı	Ortalama
Lifsiz Numuneler				
1. NUMUNE	27,89		31,21	
2. NUMUNE	28,12	28,14	30,56	31,45
3. NUMUNE	28,45		32,58	
%0,5 Lifli Numuneler				
1. NUMUNE	35,25		38,45	
2. NUMUNE	34,61	34,88	39,47	39,50
3. NUMUNE	34,78		40,59	
%1 Lifli Numuneler				
1. NUMUNE	38,96		45,87	
2. NUMUNE	39,79	39,63	44,16	45,53
3. NUMUNE	40,14		46,58	

**Şekil 44.** 7 ve 28 günlük basınç dayanımlarının karşılaştırılması

Karışımındaki lif oranının artması 7 günlük basınç dayanımını artırmıştır. Gözlenen artış, liflerin çatlak köprüleme etkisinin, yüksek alkali aktivasyonla hızlanan jel oluşumu (N–A–S–H/C–(A)–S–H türevi fazların erken yoğunlaşması) içinde daha etkin çalışmasıyla ilişkilidir. Ayrıca karışımındaki kuvars ve mermer tozunun dolgu etkisi, erken yaş poroziteyi sınırlandırarak liflerin etkin çekme özelliğini kolaylaştırmakta; bağlayıcı/aktivatör oranının 0,64 düzeyinde

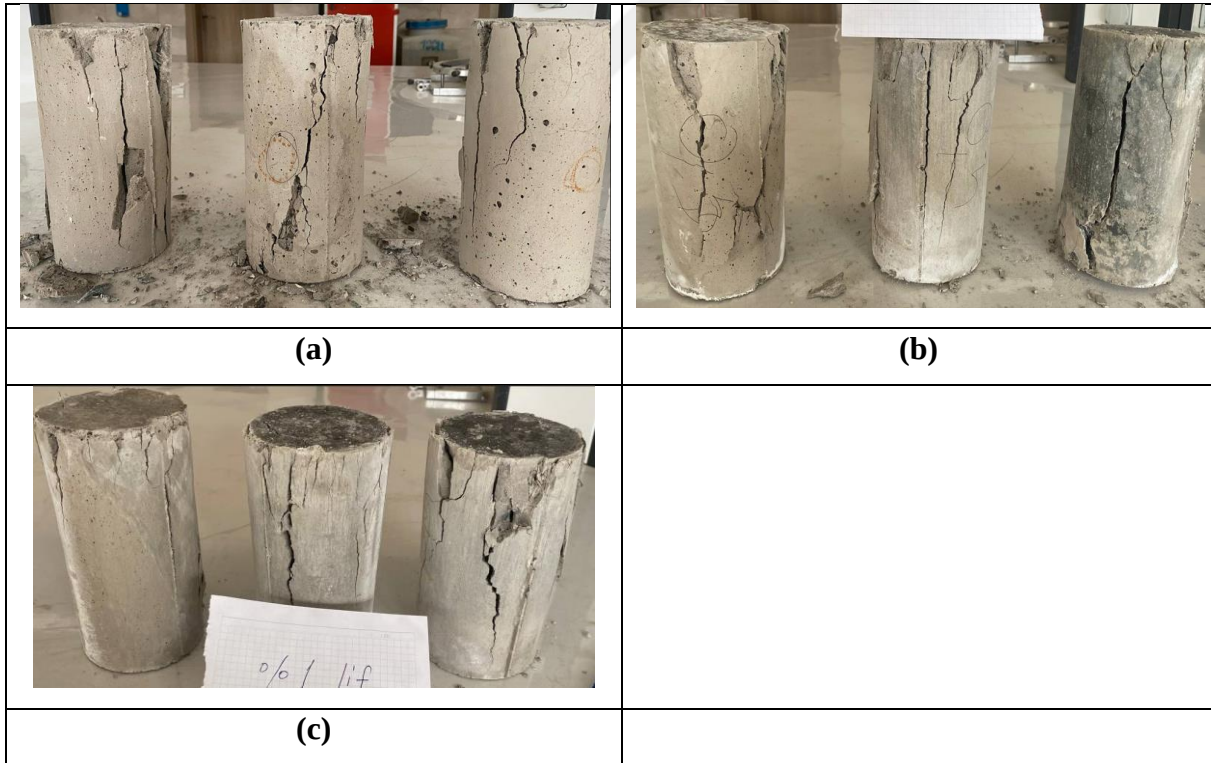
tutulması ise ilk 7 günde yeterli jel sürekliliği sağlayarak lif uçlarında gerilme yoğunlaşmalarını sönmölemektedir. Sonuç olarak, lif oranının yükseltilmesi, bu kimyasal (yüksek alkalinite, uygun B/A) ve fiziksel (iyileştirilmiş tane dizilimi) koşullar altında mekanik olarak daha bütöncöl ve sünek bir mikro yapı üretetek 7 gñnlük basınç dayanımını artırmıştır.

Üç karışım türünde de 28 gñnlük basınç dayanımı 7 gñnlük basınç dayanımından daha yüksektir. Numuneler de zamanla birlikte basınç dayanımlarında artış da gözlemlenmiştir. Lifsiz numunelerde, ortalama basınç dayanımı 7 gñnde 28,14 MPa'dan 28 gñnde 31,45 MPa'a yükselmiş. Bu yaklaşık %11,8'lik artış, 7–28 gñn aralığında geopolimer jel ağının (N–A–S–H/C–(A)–S–H türevleri) gelişmeye devam etmesi, boşlukların dolması ve ITZ'nin (ara yüzey bölgesi) yoğunlaşmasından kaynaklanmaktadır. Matrisin sürekliliği arttıkça gerilme yoğunlaşmaları azalmış ve gevrek kırılma eğilimi sınırlamıştır. %0,5 lifli numunelerde ise ortalama değerk 34,88 MPa'dan 39,50 MPa'a çıkarak yaklaşık olarak %13,2 artmıştır. Liflerin köprüleme ve yük transferi etkisi zaten 7 gñnde görölmüştür; ancak 28 gñne doğru matrisin daha da yoğunlaşmasıyla lif–matris aderansı güçlenmiş olup, çekip çıkarma direnci ve sürtünme/kimyasal kenetlenme artmıştır. Sonuçta mikro çatlak uçlarında yerel gerilmeler daha iyi sönmölenmiş ve lif katkısı, lifsiz numunelere göre daha yüksek artış oranı göstermiştir. %1 lifli numuneler arasında ise 39,63 MPa'dan 45,53 MPa'a yükselerek yaklaşık olarak %14,9 ile en yüksek artış gözlemlenmiştir. Lif hacmi arttıkça etkin ara yüzey alanı ve aktif köprü sayısı arttığında; 7–28 gñn arasında devam eden jel oluşumu ve gözeneklerin incelmesi, lif uçlarındaki gerilme yığılmalarını daha etkili biçimde dağılmasına neden olmuştur. Böylece hem mutlak artış ($\approx +5,90$ MPa) hem de görelil artış lif oranıyla birlikte artmış; bu, lifli sistemlerde kür ilerledikçe mekanizmanın kümülatif çalıştığını da göstermektedir. 7 gñnden 28 gñne geçişte tüm gruplar basınç artışı gösterse de artışın büyüklüğü lifle birlikte sistematik olarak artmaktadır ($\approx \%11,8 < \approx \%13,2 < \approx \%14,9$). Bu durumun, (i) 7–28 gñn aralığında matrisin kimyasal/yeniden düzenlenme ile yoğunlaşması, (ii) lif–matris ara yüzeyinin sertleşip kenetlenmesinin güçlenmesi ve (iii) liflerin çatlak köprüleme etkinliğinin ortamın daha rijit ve süreksiz hale gelmesiyle yükselmesine dayanmaktadır.

Literatürde çelik lifin geopolimer betonda kullanılmasının basınç dayanımını iyileştirdiğı yönündeki çalışmalara da rastlanılmaktadır. Liu *et al.* (2020) ultra yüksek performanslı geopolimer betonda kullanılmasının hem basınç dayanımı hem de kırılma enerjisini iyileştirdiğini vurgulamışlardır. Zhen *et al.* (2024) de geopolimer betonda %1 oranında çelik lif kullanılmasının basınç dayanımı %10 ile %36 arasında arttırdığını belirtmişlerdir. Aisheh *et al.* (2022) ve da Silva *et al.* (2022) da geopolimer betonda çelik lif kullanılmasının basınç dayanımını iyileştirdiğini vurgulamışlardır. Hatta Zheng *et al.* (2023)

geopolimer betonda %1 oranında çelik lif kullanılması basınç dayanımını %52 oranına kadar arttırdığını belirtmiştir. Laxmi *et al.* (2023), Hamcumpai *et al.* (2024) ve Zahid *et al.* (2024) de çelik lif kullanılması basınç dayanımı üzerinde iyileştirici etkisinin olduğunu deneysel çalışmalar sonrasında vurgulamışlardır. Sukontasukkul *et al.* (2023) kendiliğinden yerleşen betonda %0,5 ile %1,5 arasında çelik lif kullanılması basınç dayanımını %83'e kadar arttırdığını belirtmişlerdir. Sunulan bu çalışmada da geopolimer betonda çelik lif kullanılması basınç dayanımını artırması ile literatürdeki çalışmalara paralel sonuçlar elde edilmiştir.

Şekil 42'de 7 günlük basınç testi uygulanan silindirik numunelerin resimleri görülmektedir. Geopolimer betonda kullanılan çelik lif katkısının beton içerisindeki mikro çatlak oluşumunu engellediği ve mevcut çatlakların ilerlemesini sınırlandırarak yük taşıma kapasitesini artırmaktadır. Ayrıca liflerin, gerilme birikimini homojen bir şekilde dağıtarak betonun gevrek kırılma davranışını geciktirdiği artırdığı anlaşılmaktadır. Elde edilen bulgular, çelik lif katkısının geopolimer betonun basınç dayanımı açısından artış sağladığı görülmektedir. 7 günlük ve 28 günlük dayanımlar karşılaştırıldığında çelik lif katkısı erken yaşlarda olduğu gibi ileri yaşlarda da geopolimer betonun dayanımını desteklemektedir.



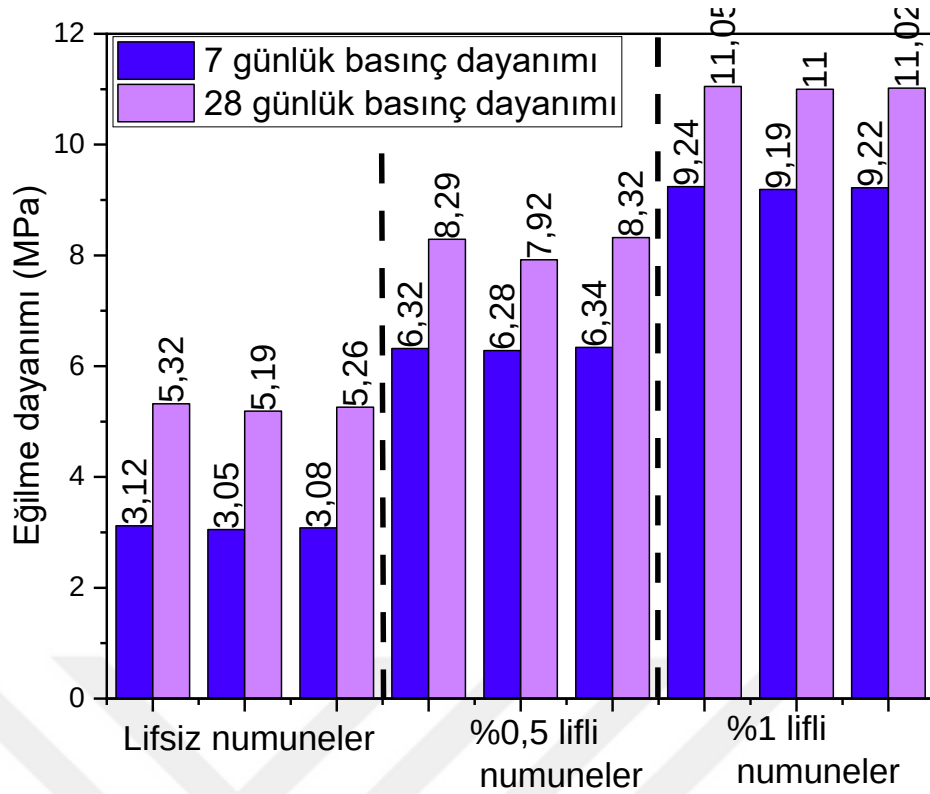
Şekil 45. 7 günlük basınç testi uygulanan silindirik numunelerin resimleri (a) %0 (b) %0,5 lifli (c) %1 lifli

Tablo 14 ve **Şekil 43'**de 7 ve 28 günlük eğilme dayanımı sonuçları gösterilmiştir. Yapılan 7 günlük eğilme dayanımı deneyleri sonuçları çelik lif katkısının geopolimer betonun

mekanik davranışında olumlu etki ettiği gözlemlenmiştir. Lif katkısı bulunmayan numunelerde ortalama eğilme dayanımı 3,08 MPa seviyesinde sabit kalırken, %0,5 çelik lif katkısı bulunan numunelerde bu değer 6,31 MPa ve %1 çelik lif katkısı bulunan numunelerde 11,02 MPa olarak kaydedilmiştir. Bu durum, eğilme dayanımını sırasıyla yaklaşık iki kat ve üç buçuk katlık bir artış sağladığı görülmektedir. Yapılan 28 günlük eğilme dayanımı deneylerinin sonucuna bakıldığında, çelik lif katkısı bulunmayan numunelerde ortalama eğilme dayanımı 5,26 MPa, %0,5 çelik lif katkısı bulunan numunelerde eğilme dayanımı 8,11 MPa ve %1 oranında çelik lif katkı bulunan numunelerde 11,03 MPa olarak kaydedilmiştir. Bu sonuçlar değerlendirildiğine sırasıyla yaklaşık %54 ve %110 oranlarında bir artış olduğu gözlemlenmiştir.

Tablo 14. 7 ve 28 Günlük Eğilme Dayanımı Sonuçları (MPa)

Eğilme Dayanımı (MPa)	7 Günlük	Ortalama	28 Günlük	Ortalama
Lifsiz Numuneler		MPa		
1. NUMUNE	3,12		5,32	
2. NUMUNE	3,05	3,08	5,19	5,26
3. NUMUNE	3,08		5,26	
%0,5 Lifli Numuneler				
1. NUMUNE	6,32		8,29	
2. NUMUNE	6,28	6,31	7,92	8,18
3. NUMUNE	6,34		8,32	
%1 Lifli Numuneler				
1. NUMUNE	9,24		11,05	
2. NUMUNE	9,19	9,22	11,00	11,02
3. NUMUNE	9,22		11,02	



Şekil 46. 7 ve 28 günlük eğilme dayanımlarının karşılaştırılması

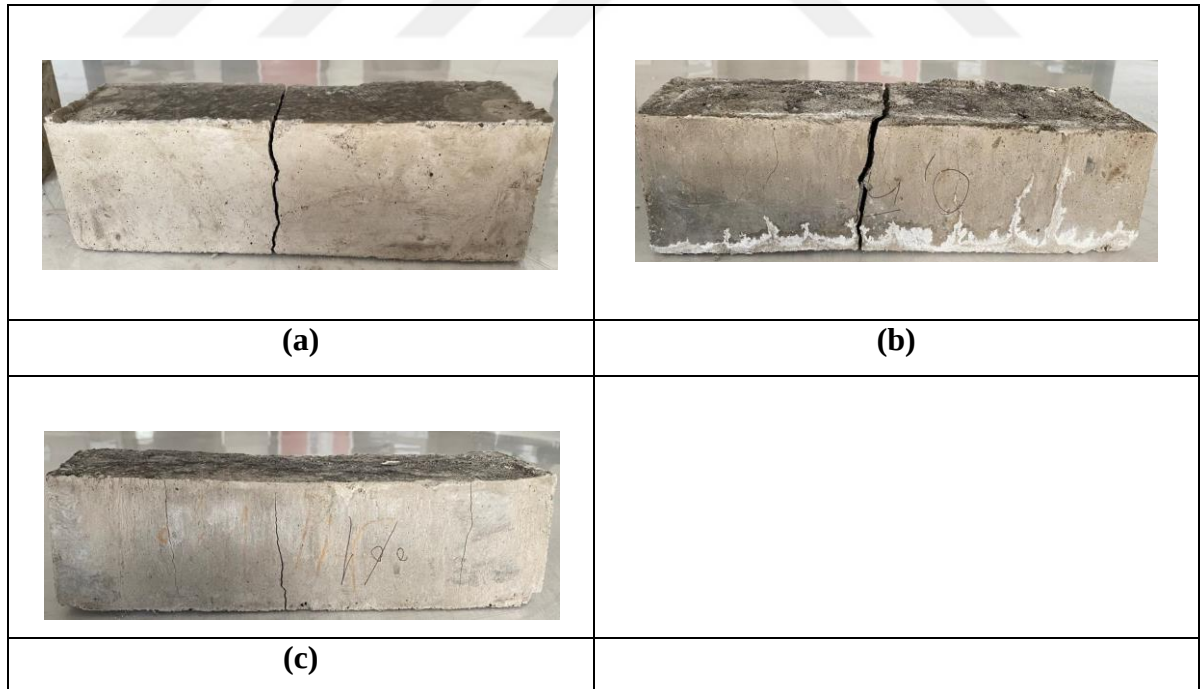
%0,5 lif kullanımı lifsiz numunelere kıyasla eğilme dayanımını yaklaşık %104,9 artırmıştır. Lif oranının %1'e çıkarılması ise lifsiz numunelere göre yaklaşık %199,4 artış sağlamıştır. Ayrıca %0,5 lifli numunelerden %1 lifli numunelere geçiş, eğilme dayanımında yaklaşık %46,1 ilave artışa neden olmuştur. Bu artış, çelik liflerin matris içinde çekme ve eğilme yükleri altında çatlak köprüleme etkisi yaparak gerilmeleri geniş bir alana yayması, erken yaşta oluşabilecek mikro çatlakların ilerlemesini sınırlaması ve matrisin gevrek davranışını sünek bir hale dönüştürmesi ile açıklanabilir. Lif oranı arttıkça matris içinde etkin lif-matris ara yüzey alanı ve aktif köprü sayısı artar, bu da çekme gerilmelerine karşı daha yüksek dirence neden olmuştur.

Tablo 13'te verilen ortalama eğilme dayanımı değerleri incelendiğinde, tüm gruplarda 7 günden 28 güne geçişte belirgin bir artış gözlemlendiği görülmektedir. Lifsiz numunelerde dayanım 3,08 MPa'dan 5,26 MPa'a yükselerek yaklaşık %70,8'lik bir artış sağlamıştır. Bu yüksek orandaki artış, lif katkısının bulunmadığı numunelerde matrisin mikro yapısal yoğunlaşmasının ve ITZ bölgesinin (ara yüzey bölgesi) güçlenmesinin kırılma davranışına doğrudan yansısıyla açıklanabilir. %0,5 lifli numunelerde dayanım 6,31 MPa'dan 8,18 MPa'a yükselmiş (%29,6 artış) olup, erken yaşta lif katkısının sağladığı yüksek başlangıç dayanımı nedeniyle kür süresince göreceli artış oranı lifsiz numunelere kıyasla daha sınırlı kalmıştır. %1 lifli numunelerde ise 9,22 MPa'dan 11,02 MPa'a ulaşarak %19,5'lik artış elde edilmiştir; bu grupta liflerin erken yaşta sağladığı yüksek performans nedeniyle matrisin

ilerleyen kür süresindeki katkısı göreceli olarak daha düşük olsa da, mutlak dayanım seviyesi tüm gruplar içinde en yüksek düzeyde gerçekleşmiştir. Bu durum, liflerin erken yaşta eğilme dayanımını önemli ölçüde artırması, kür süresince matris–lif ara yüzey aderansının güçlenmesi ve çatlak köprüleme etkisinin korunması ile açıklanabilir. Dolayısıyla, lif oranı arttıkça 7→28 gün arasındaki göreceli artış azalırken, mutlak dayanım düzeyi sürekli olarak artmıştır; bu da lif katkısının erken yaştan itibaren kırılma direncini yüksek seviyeye taşıyarak uzun vadede performansın korunmasını sağladığını göstermektedir.

Literatürde de çelik lif kullanılması geopolymer betonun eğilme dayanımı üzerinde olumlu bir etkisinin olduğunu vurgulayan çalışmalara rastlanılmıştır. Farhan *et al.* (2022) geopolymer betonda çelik lif kullanılması eğilme dayanımını anlamlı bir şekilde iyileştirdiğini belirtmişlerdir. Zhao *et al.* (2022) %1,5 oranında çelik lif kullanılması eğilme dayanımını %41 oranında arttırdığını belirtmişlerdir. Laxmi *et al.* (2023) ve Aisheh *et al.* (2022) de geopolymer betonda çelik lif kullanılması eğilme dayanımını arttırdığını vurgulamışlardır. Literatürde ulaşılan çalışmaların sonuçlarına paralel olarak bu çalışmada da çelik lif hacminin eğilme dayanımı üzerindeki etkisi benzer olmuştur.

Şekil 44'de 7 günlük eğilme testi uygulanan silindirik numunelerin resimleri görülmektedir.



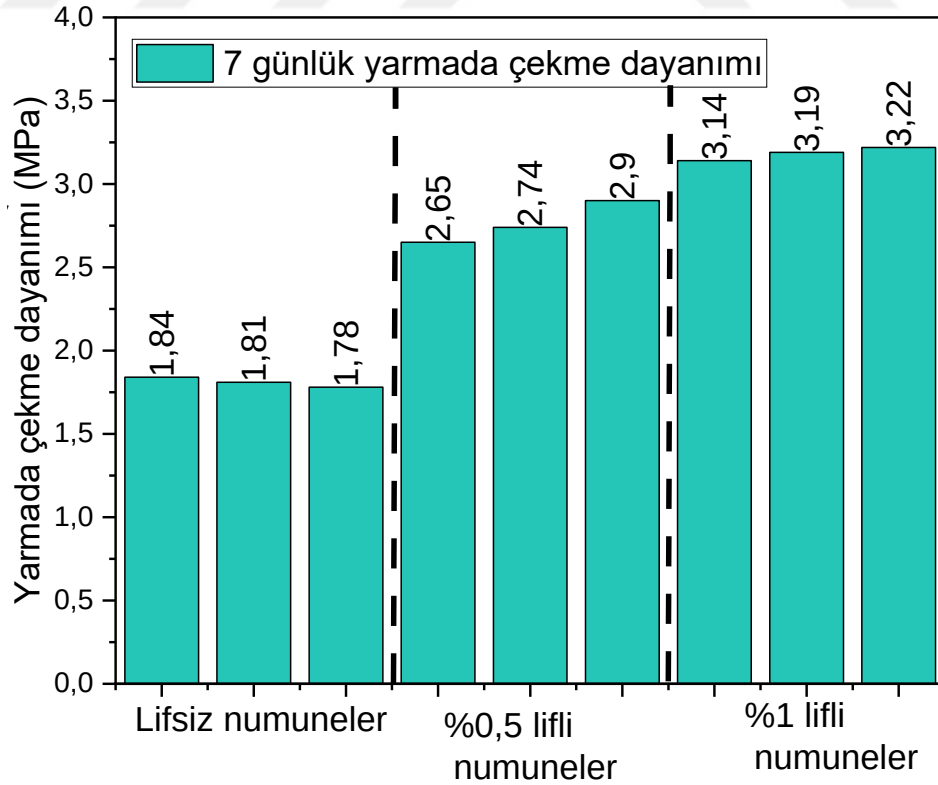
Şekil 47. 7 günlük basınç testi uygulanan silindirik numunelerin resimleri (a) %0 (b) %0,5 lifli (c) %1 lifli

Tablo 15 ve **Şekil 45'**de 7 ve 28 günlük eğilme dayanımı sonuçları gösterilmiştir. 7 günlük yarmada çekme dayanımı sonuçlarına bakıldığında, çelik lif katkısının çekme dayanımı

üzerinde bir artış sağladığı gözlemlenmiştir. Çelik lif katkısı bulunmayan numunelerde ortalama yarmada çekme dayanımı 1,81 MPa, %0,5 çelik lif katkılı numunelerde 2,76 MPa ve %1 çelik lif katkılı numunelerde 3,18 MPa olarak kaydedilmiştir. Bu durum, çelik lif katkısının sırasıyla %52 ve %75 oranlarında bir artış sağladığı görülmektedir.

Tablo 15. 7 Günlük Yarmada Çekme Dayanımı Sonuçları (MPa)

Yarmada Çekme Dayanımı (MPa)	7 Günlük	Ortalama
Lifsiz Numuneler	MPa	
1. NUMUNE	1,84	1,81
2. NUMUNE	1,81	
3. NUMUNE	1,78	
%0,5 Lifli Numuneler		
1. NUMUNE	2,65	2,76
2. NUMUNE	2,74	
3. NUMUNE	2,90	
%1 Lifli Numuneler		
1. NUMUNE	3,14	3,18
2. NUMUNE	3,19	
3. NUMUNE	3,22	



Şekil 48. 7 günlük yarmada dayanımlarının karşılaştırılması

Çelik liflerin, çatlak oluşumunu geciktirmesi ve oluşan çatlakların ilerlemesini engellemesi çekmeye karşı direnç sağladığı anlaşılmaktadır. Ayrıca liflerin çekme altında betonun gevrek davranışını azaltarak betonun sünekliğini artırmaktadır. Bu verilere bakıldığında geopolimer betonun çatlama direncinin çelik lif katkısıyla önemli ölçüde iyileştirilebileceği görülmektedir.

Çelik lif katkısının geopolimer betonun erken yaş çekme performansını önemli ölçüde artırdığı görülmektedir. Lifsiz karışımda 1,81 MPa olan ortalama dayanım, %0,5 lif ilavesiyle 2,76 MPa'a (%52,5 artış), %1 lif ilavesiyle ise 3,18 MPa'a (%75,7 artış) yükselmiştir. Karışımda 850 kg/m³ yüksek fırın cürufu ve 25 kg/m³ metakaolin ile sağlanan yüksek puzolanik aktivite, 400 kg/m³ NaOH ve 160 kg/m³ Na₂SiO₃ içeren yüksek alkalinite seviyesindeki aktivatör sistemiyle birleşerek erken yaşta yoğun N-A-S-H ve C-(A)-S-H jel oluşumunu teşvik etmiştir. Bu yoğun matris içerisinde liflerin varlığı, çekme gerilmelerinin dağılımını optimize ederek mikro çatlakların başlama ve ilerleme olasılığını azaltmış, lif-matris ara yüzeyinde gelişen mekanik kenetlenme ve sürtünme etkileri çekme yükleri altında köprüleme kapasitesini artırmıştır. Lif oranının %0,5'ten %1'e çıkarılması, matris içindeki etkin lif-matris ara yüzey alanını genişleterek yük transfer yollarını çoğaltmış, böylece kırılma enerjisini ve sünekliği artırmıştır. Ayrıca karışımdaki kuvars (200 kg/m³) ve mermer tozu (70 kg/m³) dolgu etkisiyle matrisin gözenek yapısını optimize etmiş, liflerin çekme yükleri altında daha verimli çalışmasına katkıda bulunmuştur. Bu bulgular, lif katkısının yalnızca matrisin gevrek davranışını azaltmakla kalmayıp, uygun alkali aktivasyon ve tasarım ile birlikte erken yaş yarmada çekme dayanımında lif oranına bağlı olarak sürekli ve belirgin bir iyileşme sağladığını ortaya koymaktadır.

Aisheh *et al.* (2022) yüksek performanslı geopolimer betonda çelik lif kullanılmasının numunelerin yarmada çekme dayanımını arttırdığını vurgulamıştır. Benzer şekilde Laxmi *et al.* (2023) geopolimer betonda %1 oranında çelik lif kullanılmasının yarmada çekme dayanımını 5,23 MPa'ya kadar arttırdığını belirtmişlerdir. Bu çalışmada da %1 çelik lif eklenmesi ile 3,22 MPa'ya kadar çıkmıştır. Mohamed *et al.* (2023) da geopolimer betonda çelik lif kullanılmasının yarmada çekme dayanımı üzerinde iyileştirici bir etkisinin olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca Bellum (2022) de geopolimer betonda çelik lif kullanılmasının yarmada çekme dayanımını %12 ile %45 aralığında arttırdığını belirtmişlerdir. Zheng *et al.* (2023) ise çelik lifli numunelerin 28 günlük yarmada çekme dayanımının %80'ini 7 günlük süre içerisinde kazandığını belirtmişlerdir. Bu çalışmada da numunelerin 7 günlük yarmada çekme dayanımları 28 günlük yarmada çekme dayanımlarına oldukça yakındır. Yani sunulan çalışmadaki sonuçlar literatürde ulaşılan sonuçlarla paralellik göstermektedir. Wang *et al.* (2020), Zhang *et al.*

(2021), Sukontasukkul *et al.* (2023) ve Zhen *et al.* (2025) de geopolimer betonda elik lif kullanılması nın yarmada çekme dayanımını arttırdığını vurgulamışlardır.

Betonarme Yüksek Kirişlerin Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Bu bölümde a/d oranını dikkate alınarak üretilen kirişler tek yönlü artan yük etkisi altındaki davranışları ele alınmıştır. Yapılan deneysel çalışmada artan yüke maruz bırakılan kirişlerin ilk çatlak yükü ve çatlama anındaki yer değiştirme değeri, donatının ilk akma anına denk gelen yük ve bu değere karşılık gelen yer değiştirme değeri, kirişin taşıdığı maksimum yük ve bu değere karşılık gelen yer değiştirme değeri, kirişin göçme yükü ve bu değere karşılık gelen yer değiştirme değeri ölçölerek kayıt altına alınmıştır. Kayıt altına alınan bu sonuçlar **Tablo 16**‘ da verilmiştir.



Tablo 16. Geopolimer Yüksek Kirişlerin Deney Sonuçları

	f_c (MPa)	P_{cr} (kN)	Δ_{cr} (mm)	P_y (kN)	Δ_y (mm)	P_{max} (kN)	$P_{max} / \sqrt{f_c b \cdot d}$	Δ_{max} (mm)	P_u (kN)	Δ_u (mm)	E (kN.mm)
K1	28,14	116,76	1,71	184,59	2,68	213,07	0,905	4,87	170,00	9,82	1620,11
K2	28,14	80,13	1,29	128,40	2,03	147,74	0,627	3,84	118,93	7,58	867,01
K3	34,88	113,10	2,08	179,58	2,89	189,43	0,722	3,39	151,54	6,62	834,65
K4	39,63	95,23	1,02	147,76	1,86	158,72	0,568	2,49	124,88	7,35	932,13
K5	34,88	105,32	0,80	162,15	1,63	175,92	0,671	2,88	140,73	6,87	997,73
K6	39,63	65,25	3,17	131,89	5,05	133,66	0,478	6,38	106,92	13,42	1281,12
K7	28,14	104,29	4,18	171,89	5,71	173,81	0,738	6,13	139,05	8,89	815,73
K8	28,14	83,16	0,92	131,02	1,92	137,02	0,582	2,16	109,61	7,43	850,21
K9	34,88	56,36	1,07	89,08	1,61	102,82	0,392	2,57	82,11	6,14	489,08
K10	39,63	78,55	1,06	124,82	2,01	130,91	0,468	3,10	104,64	7,81	826,89
K11	34,88	46,42	0,77	71,32	1,51	77,59	0,296	2,71	61,92	6,44	411,55
K12	39,63	86,53	1,29	141,13	2,66	144,22	0,516	3,74	115,73	9,43	1099,93

P_{cr} : Çatlama yükü, Δ_{cr} : Çatlama yükündeki yer değiştirme, P_y : Donatı ilk akma yükü, Δ_y : Donatı ilk akma yükündeki yer değiştirme, P_{max} : Kirişin taşıdığı maksimum yük, Δ_{max} : Kirişin taşıdığı maksimum yükteki yer değiştirme, P_u : Kiriş nihai dayanımı, Δ_u : Nihai dayanımdaki yer değiştirme, E : Enerji sönümlleme kapasitesi (Deney numunelerinin enerji sönümlleme kapasiteleri yük-deplasman eğrileri altında kalan alandan hesaplanmıştır.)

Yapılan çalışmadaki tüm kirişlerde kesme göçmesi meydana gelmiştir. Deneysel sonuçlar genel olarak değerlendirildiğinde, kirişlerin maksimum yük taşıma kapasiteleri (P_{max}) açısından boyuna donatı, enine donatı ve çelik lif katkısının ayrı ayrı ve birlikte kullanımı büyük oranlarda etki göstermiştir. a/d oranının aynı olduğu kirişler karşılaştırıldığında, boyuna donatı oranının fazla olduğu kirişlerin P_{max} değerlerinin boyuna donatı oranı daha az olan kirişlere göre önemli oranda daha yüksek olduğu görülmektedir. Enine donatı kullanımı ise P_{max} 'ta belirli bir artış sağlamaktadır. Çelik lif katkısı ise P_{max} değerini artırarak özellikle çatlak yayılımını geciktirmiş ve yük taşıma kapasitesinin korunmasına katkı sağlamıştır. Kirişlerde çelik lif katkısı az olan kirişlere kıyasla, çelik lif oranı fazla olan kirişlerde P_{max} değerinin daha fazla olduğu görülmektedir. Diğer bir parametre olan a/d oranına bakıldığında zaman artan a/d oranı kirişlerin P_{max} değerlerini düşürme eğilimindedir. Ancak, yeterli boyuna donatı oranı ve çelik lif katkısı ortaya çıkan bu olumsuzluğu önemli ölçüde sınırlandırmakta ve taşıma kapasitesinin korunmaktadır. Elde edilen bu sonuçlar, çelik lif oranı ve yeterli donatı düzeninin birlikte kullanılmasının kirişlerin eğilme performansını güçlendirdiğini açıkça ortaya koymaktadır. Deney sonuçları genel olarak, a/d oranı arttıkça kirişlerde yük taşıma kapasitesinin düştüğünü göstermektedir. Bu azalma eğilimi, enine donatısı ve çelik lif katkısı bulunmayan kirişlerde daha belirgin şekilde ortaya çıkmaktadır. Yeterli donatı düzeni ve çelik lif katkısı bulunmayan kirişlerde kesme kırılması riski artarak taşıma kapasitesinde kayıplar gözlenmiştir. Bununla birlikte, bazı kombinasyonlarda çelik lif katkısının, büyük a/d oranındaki kirişlerdeki olumsuz etkiyi sınırlandırdığı, çatlak yayılımını kontrol ederek kirişin yük taşıma kapasitesinin korunmasına katkıda bulunduğu gözlemlenmiştir. Elde edilen sonuçlar, çelik lif katkısının özellikle donatı yetersizliğinden kaynaklı dayanım kayıplarını sınırlandırmada önemli bir yere sahip olabileceği görülmektedir.

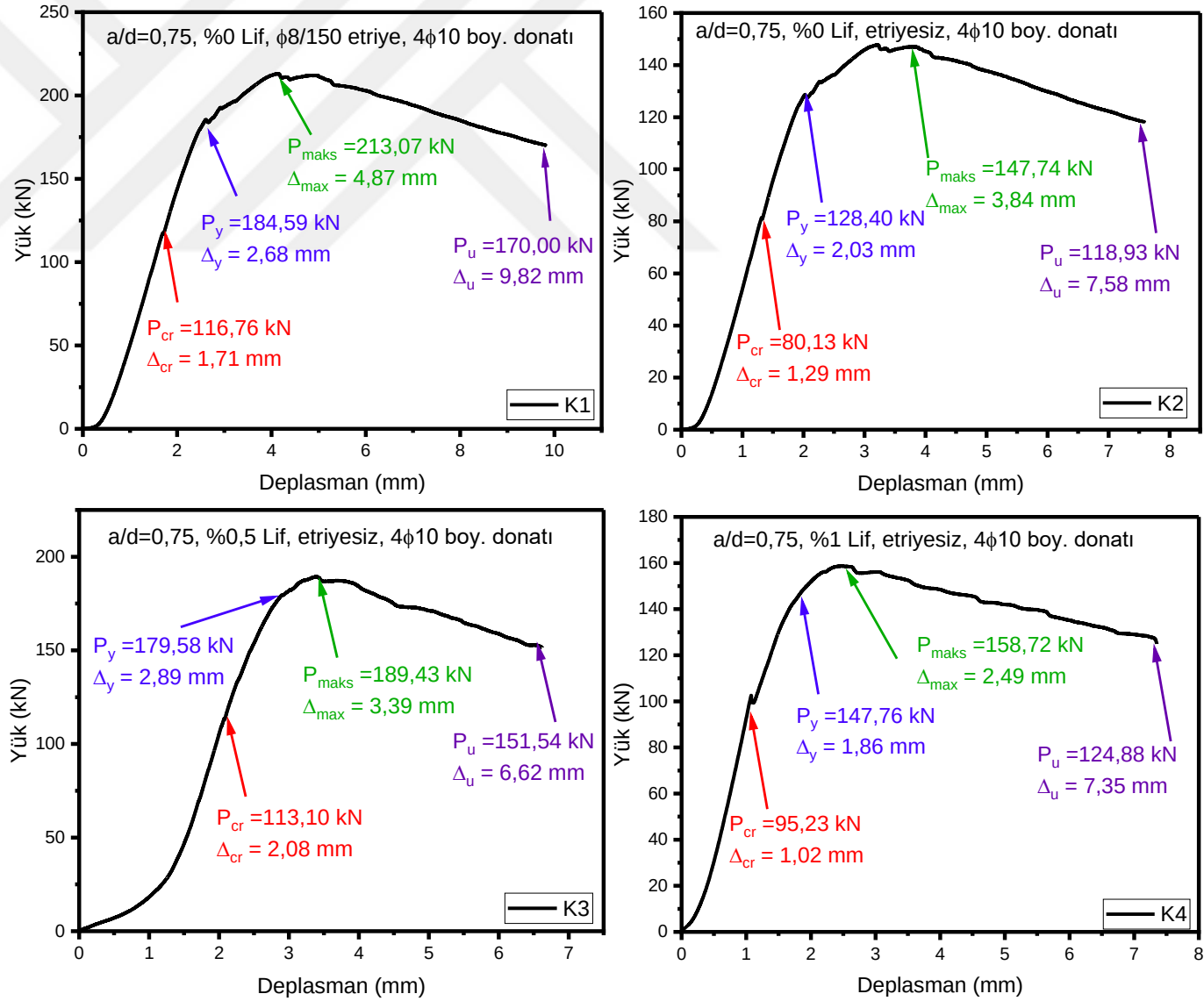
Tablo 16'daki sonuçlar genel olarak değerlendirildiğinde aşağıdaki sonuçlara varılmıştır. (i) Enine donatının temel etkisi ($a/d=0,75$): Etriye varlığı kesme çatlaklarının ilerlemesini sınırlandırarak taşıma kapasitesini ve sünekliği belirgin biçimde artırmıştır. Aynı boyuna donatıya sahip ve lifsiz iki kirişten K1 (5Ø8/200 etriyeli) K2'ye (etriyesiz) göre P_{max} 'ta $\approx\%44$, P_u 'da $\approx\%43$ ve enerji sönümlemede $\approx\%87$ daha yüksek performans göstermiştir; Δ_u 'nun da (9,82 mm $\rightarrow$ 7,58 mm) artması, etriyenin sünekliği güçlendirdiğini göstermektedir. Bu tablo,

derin kirişlerde baskın kesme/kemerleşme (*arching*) mekanizmasında etriyenin yerel gerilme yığılmalarını dağıtıp çatlak açıklığını kontrol ederek hem kapasiteyi hem deformasyon kabiliyetini yükselttiğini gösterir. (ii) Lif katkısının koşula bağlı etkisi ($a/d=0,75$): Etriye bulunmadığında lifler kesme çatlaklarını köprüleyerek kapasiteyi artırmış; K3 (%0,5 lif) ve K4 (%1 lif) etriyesiz lifsiz K2'ye göre P_{max} 'ı sırasıyla $\approx\%28$ ve $\approx\%7$ artırmıştır. Ancak bu artış etriyenin sağladığı dayanıma ulaşmamış; lif tek başına etriyenin yerini tam ikame etmemiştir. Ayrıca lif oranı %0,5'ten %1'e çıkarıldığında P_{max} 'ın K3→K4'de azaldığı (189,43→158,72 kN) ve Δ_u 'nun sınırlı kaldığı görülmektedir. Bu, yüksek lif hacminde işlenebilirlik/yerleşme ve lif topaklanması (*balling*) kaynaklı mikro süreksizliklerin kemerleşme taşıyıcılığını zayıflatabildiğine işaret eder. Öte yandan daha düşük boyuna donatıyla (%1 lif + 2Ø10; K6) Δ_u 'nun artması (7,35→13,42 mm; $\approx\%83$) ve enerji sönümleme kapasitesinin artması ($\approx\%37$) sünekliğin lif–matris sürtünme/çekip-çıkarma (*pull-out*) mekanizmasıyla güçlenebildiğini, ancak P_{max} 'ın aynı anda düşebildiğini gösterir; yani dayanım–süneklik arasında konfigürasyona duyarlı bir değiş-tokuş vardır. (iii) a/d oranının artırılmasının etkisi (0,75→1,50): Kemerleşme etkisinin zayıflamasıyla kapasite genel olarak düşmüştür. Etriye varken K1→K7'de $P_{max} \approx\%18$ azalır; etriyesiz lifsiz K2→K8'de azalma $\approx\%7$ 'dir. Lif katkısı, $a/d=1,50$ 'de etriyesiz 4Ø10 kirişlerde P_{max} 'ı artırmak bir yana, K8'e göre K9'da $\approx\%25$ düşürmüş, K10'da bu fark $\approx\%5$ 'e indirmiştir. Bu, daha kirişsel (*beam-like*) davranış bölgesinde ($a/d \uparrow$) lif köprülemesinin kesmeye hakim olan çatlak geometrisi/gerilme durumunda daha sınırlı kaldığını gösterir. Ancak boyuna donatı azaltıldığında (%1 lif + 2Ø10; K12), P_{max} ve enerji sönümleme kapasitesi K11'e göre belirgin bir şekilde yükselmiştir (77,59→144,22 kN; 411,55→1099,93 kN). Bu da yüksek lif hacminin, daha düşük boyuna donatıyla birlikte devreye giren çekip-çıkarma enerjisi sayesinde enerji sönümleme ve sünekliği artırabildiğini göstermektedir. (iv) Boyuna donatı miktarı: %0,5 lifli kirişlerde boyuna donatının 4Ø10'dan 2Ø10'a düşürülmesi P_{max} 'ı azaltmıştır (K3→K5; $\approx\%7$). Bu, boyuna donatının kemerleşme sıkıştırma yayı ile birlikte taşıma kapasitesinde kritik olduğunu göstermektedir. Buna karşın %1 lif + 2Ø10 kombinasyonu (K6, K12) Δ_u ve enerji sönümleme kapasitesi açısından avantaj sağlamıştır. Dolayısıyla hedef performans (kapasite mi/süneklik mi?) önce tanımlanmalı; etriye, lif hacmi ve boyuna donatı birlikte ayarlanmalıdır.

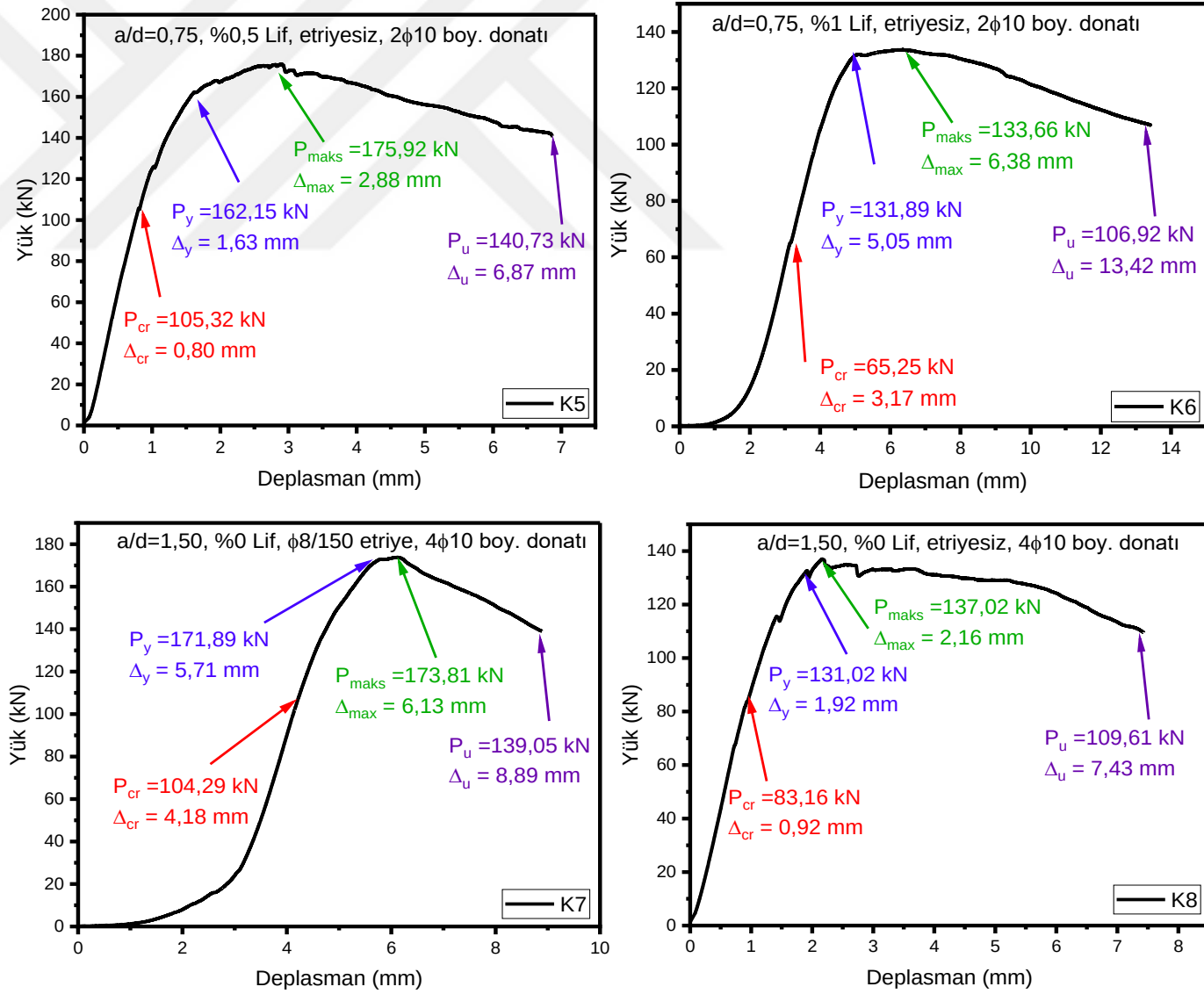
Yük Deplasman Eğrilerinin Karşılaştırılması

Betonarme yüksek kirişlerin yük-deplasman eğrileri **Şekil 46**'da gösterilmiştir. Şekildeki grafiklere bakıldığında yüksek kirişlerin yük-deplasman eğrileri literatürdeki klasik yük-deplasman eğrileri ile benzerlik göstermektedir (Tuchscherer, and Quesada (2015); Moradi and Esfahani (2017); Wu *et al.* (2018); Deng *et al.* (2018); Albidah (2023)). Yüksek

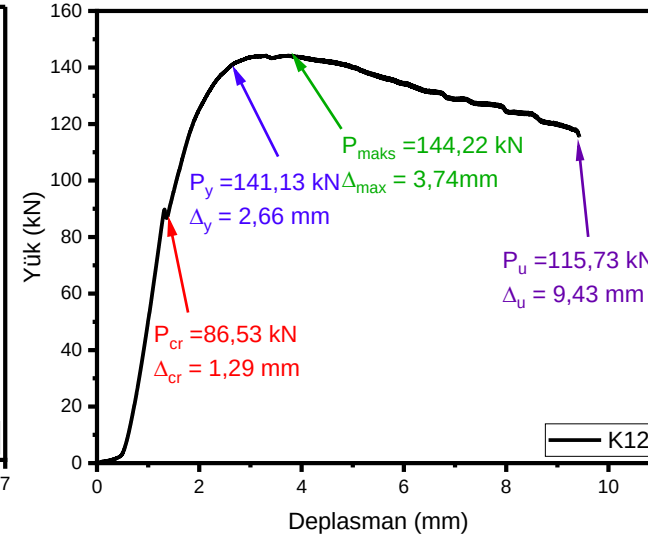
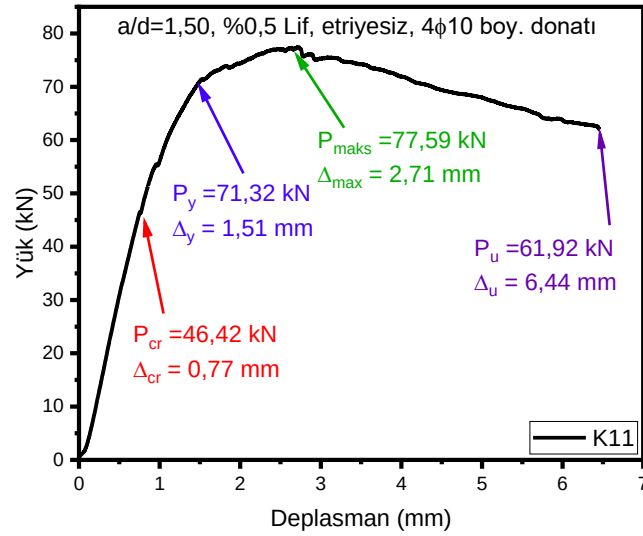
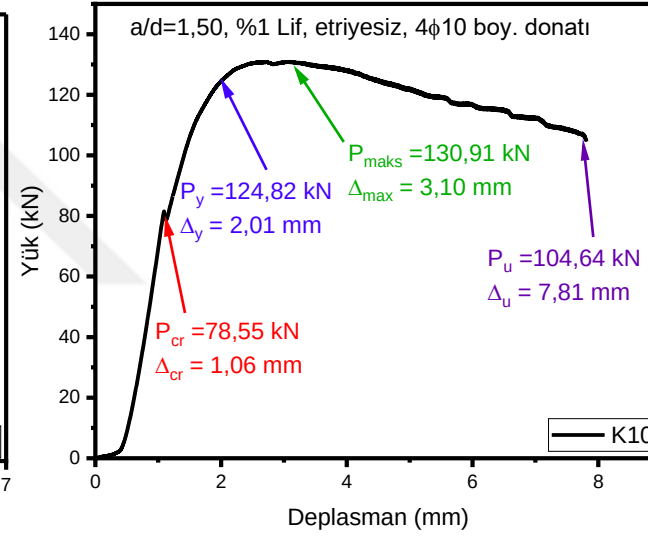
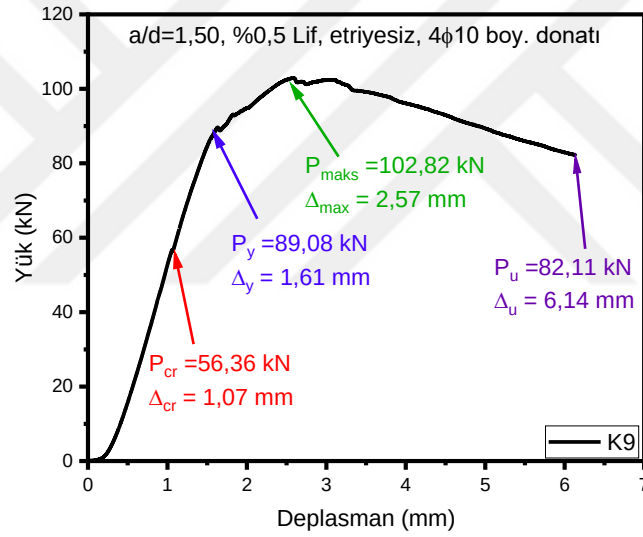
kirişlerin çoğunluğunda yük- deplasman eğrilerindeki belirli noktalar oldukça net bir şekilde okunmaktadır. Şekildeki grafiklerden okunmayan noktalar P_{max} değeri üzerinden belirli oranlarla hesaplanmıştır. Klasik yük-deplasman eğrileri ilk başta artarak uygulanan yük etkisiyle lineer olarak veya lineere oldukça yakın bir biçimde ilerlemektedir. Grafikte bu lineerliğin ilk olarak bozulduğu kısım, ilk çatlağın oluştuğu yük değeri anlamına gelmektedir. Daha sonra grafikte görülen atma kısmından donatının ilk akma noktasına ulaştığı anlaşılmaktadır. Artarak uygulanan yük etkisi ile yüksek kirişler maksimum yük taşıma kapasitelerine ulaşmış ve yük-deplasman eğrilerinde tepe noktaları oluşmuştur. Maksimum yük taşıma kapasitesine ulaşılmasının ardından yüksek kirişlerin yük taşıma kapasiteleri azalmasına rağmen yer değiştirme değerleri artarak devam etmiştir. Bu davranışın bir sonucu olarak kirişler nihai dayanıma ulaşmışlardır ve bu da göçme moduna ulaştıkları anlamına gelir. Yüksek kirişlerin göçme anındaki yük değeri ise (P_u) ile gösterilmektedir ve şekillerde verilen grafiklerin bitiş noktalarından okunmaktadır.



Şekil 49. Yüksek kiriş numunelerinin yük-deplasman eğrileri



Şekil 50. Yüksek kiriş numunelerinin yük-deplasman eğrileri (devamı)



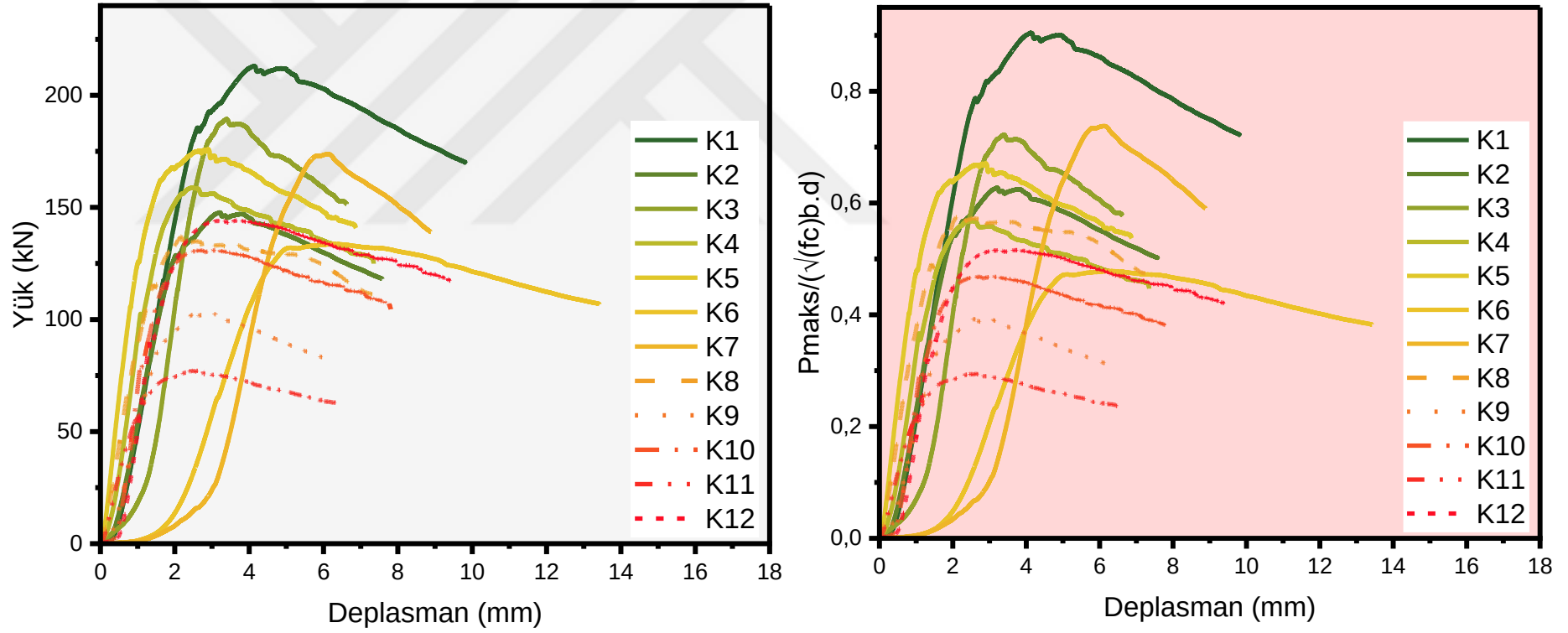
Şekil 51. Yüksek kiriş numunelerinin yük-deplasman eğrileri (devamı)

Şekillerden K1 yüksek kirişinin grafiğine baktığımızda bu kirişe ait yük-deplasman eğrisi incelendiğinde, eğrinin başlangıçta uygulanan yüklerle birlikte lineer bir şekilde ilerlediği görülmektedir. Bu doğrusal davranış, betonarme elemanlarda ilk çatlak oluşumuna kadar beklenen klasik bir tepkidir. K1 kirişinde bu lineerliğin ilk bozulduğu nokta, betonun çekme dayanımını aştığı ve ilk çatlak oluştuğu anı temsil etmektedir. Bu noktada, çatlama yükü (P_{cr}) grafikten bakılarak 116,76 kN olarak belirlenmiş olup, bu yüke karşılık gelen yer değiştirme (Δ_{cr}) ise 1,71 mm'dir. İlk çatlama sonrası eğri, donatının akma sınırına kadar lineer bir şekilde devam etmektedir. Donatının ilk akma yaptığı noktada yük değeri (P_y) 184,59 kN olarak grafikten net bir şekilde okunmaktadır ve bu yüke karşılık gelen deplasman (Δ_y) ise 2,68 mm olarak okunmuştur. Bu nokta, kirişin plastik davranışa geçtiği, elastik sınırın aşıldığı kritik bir bölgedir. Yük artışı devam ettikçe kiriş, maksimum taşıma kapasitesi olan tepe noktasına ulaşmıştır. K1 kirişinde bu tepe noktası (P_{max}) 213,07 kN olarak tespit edilmiştir ve bu noktadaki deplasman değeri (Δ_{max}) 4,87 mm'dir. Bu aşama, yapının en fazla yükü taşıyabildiği ve taşıma gücünün sınırına ulaştığı noktayı göstermektedir. Tepe noktasından sonra yük taşıma kapasitesi azalmaya başlamış, ancak deplasman değerleri artmaya devam etmiştir. Bu durum, yapının plastik deformasyonlara uğradığını ve sünek davranış sergilediğini göstermektedir. Nihayetinde kiriş, göçme moduna ulaşarak nihai yük değerine (P_u) 170,00 kN, karşılık gelen yer değiştirme değerine (Δ_u) ise 9,82 mm'ye ulaşmıştır. Bu değerler, K1 kirişinin artık taşıma kapasitesinin kalmadığını ve göçme halinin gerçekleştiğini göstermektedir. Genel olarak K1 kirişinin yük-deplasman eğrisi, literatürdeki klasik yük-deplasman eğrileriyle benzerlik göstermektedir. Tüm karakteristik noktalar – ilk çatlak, donatı akması, maksimum yük, ve nihai göçme–grafik üzerinden net şekilde okunabilmekte ve yapısal davranışın evreleri açıkça görülmektedir.

K4, K7, K10, K12 yüksek kirişleri dışındaki kirişlerine ait grafiklere baktığımız zaman K1'e benzer şekilde yük-deplasman eğrisi literatürdeki klasik yük-deplasman eğrileriyle benzerlik göstermektedir. Tüm karakteristik noktalar – ilk çatlak, donatı akması, maksimum yük ve nihai göçme–grafik üzerinden net şekilde okunabilmekte ve yapısal davranışın evreleri açıkça görülmektedir. Bu yüksek kirişlerine baktığımızda ise diğer kiriş yük-deplasman eğrilerinden farklı olarak bazı karakteristik noktalar grafiklerden tam olarak okunmamaktadır. K4 yüksek kirişinin grafiğine bakıldığında ilk çatlak noktasına denk gelen yük (P_{cr}) grafik üzerinden tam olarak okunamadığından P_{cr} değeri P_{max} üzerinden hesaplanmıştır ve P_{max} değerinin %60'ı olarak belirlenmiştir. Hesaplama kullanılan %60 oranını belirlerken literatür baz alınmıştır. Bu değer 95,23 kN olarak hesaplanmıştır. K7 yüksek kirişine ait grafikte P_{cr} değeri grafik üzerinden okunamadığından P_{cr} yük değeri 104,29 kN ve P_y yük değeri 171,89 kN olarak hesaplanmıştır. K10 kirişinde aynı yöntemle P_{cr} değeri 78,55 kN ve K12 kirişinde P_{cr} değeri 86,53 kN olarak hesaplanmıştır.

Tüm numunelerin yük-deplasman ve normalleştirilmiş yük-deplasman eğrileri Şekil 47’de sunulmuştur. Normalleştirilmiş yük $\frac{P}{\sqrt{f_c} b \cdot d}$ formülü kullanılarak hesaplanmıştır.

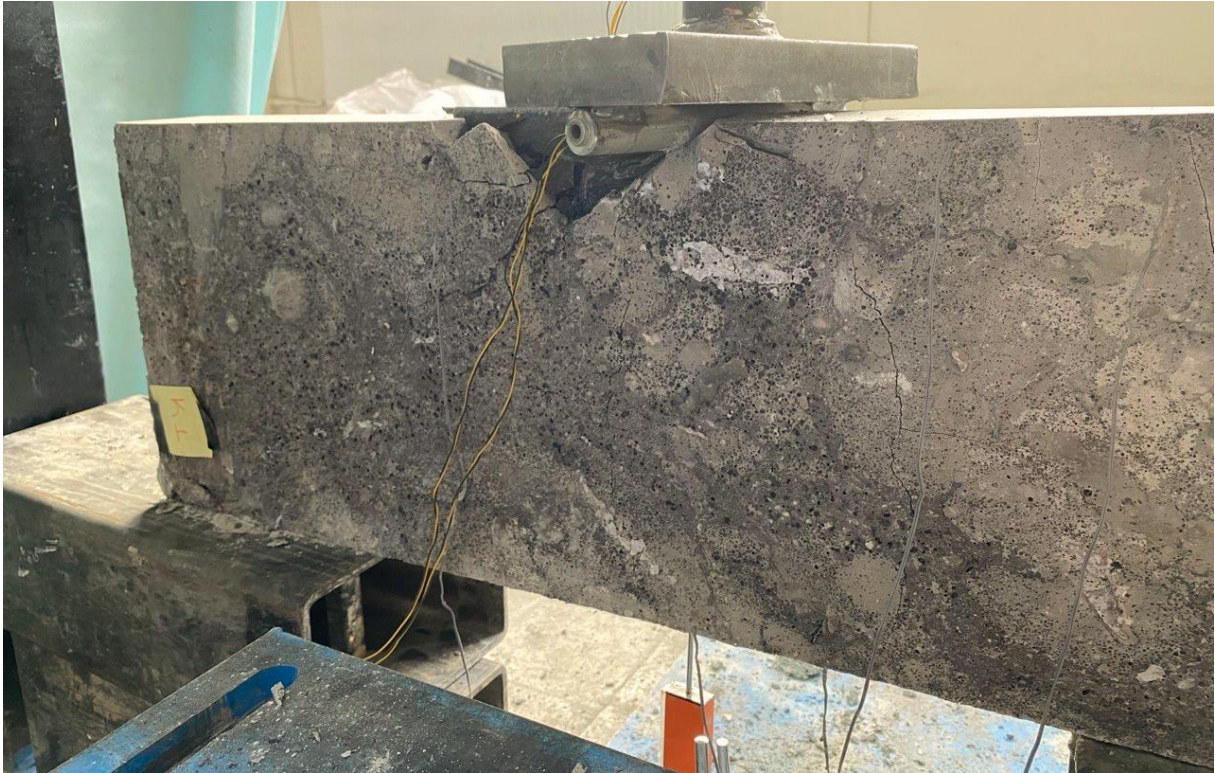
Tüm kirişlerin yük-deplasman eğrilerinde, üç evreli tipik bir davranışı net biçimde gözlemlenmiştir: (i) çatlama öncesi doğrusal (veya yüksek rijitlikli) bölüm, (ii) çatlama sonrası akmaya kadar azalan teğet rijitlikle yükselen bölüm, (iii) tepe yük (P_{max}) sonrası yumuşama ve nihai kapasiteye (P_u) kadar süren artık taşıma. Tüm numunelerde $P_u/P_{max} \approx 0,80$ civarında olup, tepe yükten nihai yüke $\sim\%20$ düşüş görülmektedir. Bu, pik sonrası taşıma kapasitesinin korunabildiğini ve nihai taşımanın yalnızca malzeme değil, donatı katkısıyla da ilgili olduğunu göstermektedir. $a/d=0,75$ ’te etriye varlığı (K1) eğriyi hem yukarı (P_{max} ve P_u artışı) hem de sağa (Δ_u artışı) taşımaktadır: K1’in enerji yutma kapasitesi $E=1620 \text{ kN}\cdot\text{mm}$, etriyesiz lifsiz eşleniği K2’de ise $E=867 \text{ kN}\cdot\text{mm}$ ’dir. Bu fark, kesme çatlaklarının açıklığını sınırlandıran etriyelerin yayılma dengesini kırıp sünekliği artırmasından kaynaklanmaktadır. İlk rijitlik ve akma sonrası eğim de belirgin biçimde yüksektir (ör. K1’de akma rijitliği $\approx 69 \text{ kN/mm}$). $a/d=1,50$ ’de etriye (K7) tepe yükü artırsa da (K7: 173,8 kN; K8: 137,0 kN) eğri biçimi daha kirişsel davranışa kaydığı için çatlak dağılımı ve akma deplasmanı yüksektir (K7’de $\Delta_y=5,71 \text{ mm}$). Bu durum süneklik oranını ($\mu=\Delta_u/\Delta_y$) düşürmüştür (K7: $\mu\approx 1,56$), yani etriye tepe yükü desteklerken a/d büyüdüğünde eğri solda daha “yayvan” bir şekil almaktadır. $a/d=0,75$, etriyesiz 4Ø10: Lifsiz K2’ye göre $\%0,5$ lif (K3) P_{cr} , P_y ve P_{max} ’ı yükselterek eğriyi yukarı taşımıştır. Ancak Δ_{max} ve Δ_u sınırlı kaldığı için enerji yutma kapasitesi beklendiği kadar yüksek değildir (K3: $E=835 \text{ kN}\cdot\text{mm}$, K2: $867 \text{ kN}\cdot\text{mm}$). $\%1$ lif (K4) ise P_{max} ’ı K3’e göre biraz düşürse de enerjiyi yutma kapasitesini arttırmıştır ($E=932 \text{ kN}\cdot\text{mm}$) ve Δ_u ’yu da arttırmıştır. Bu, lif çekip-çıkarma/*pull-out* mekanizmasının pik sonrası alanı genişlettiğini gösterir. Lif dozajı arttıkça eğrinin post-peak kısmında daha “uzun kuyruk” gözlenmesi, köprüleme sayesinde çatlak ilerlemesinin gecikmesiyle de tutarlı bir davranış sergilemiştir. Boyuna donatı oranının azaltıldığında (2Ø10) lif etkisi daha da belirginleşmiştir. K6 ($\%1$ lif) çok düşük ilk/akma rijitliklerine (Δ_{cr} ve Δ_y büyük) rağmen $\Delta_u=13,42 \text{ mm}$ ve $E=1281 \text{ kN}\cdot\text{mm}$ ile “uzayan kuyruk” davranışı sergilemiştir. Pik yük görece düşük olsa da, alan (yani enerji sönümleme kapasitesi) büyüktür. Bu, lifli sistemlerde rijitliğe rağmen enerji sönümleme kapasitesinin ciddi biçimde artabildiğini göstermektedir. a/d oranı arttığında kemerleşme (*arching*) etkisi zayıflar ve eğriler daha kirişsel bir karaktere bürünmüştür. P_{max} genel olarak azalır, Δ_y büyüme eğilimindedir ve başlangıç bölümü (özellikle etriyeli K7 gibi) daha düşük teğet rijitlik gösterir. Buna karşın lif, bazı konfigürasyonlarda *post-peak* bölgeyi uzatıp enerji yutma kapasitesini arttırmıştır. K12 ($\%1$ lif, 2Ø10) için $E=1100 \text{ kN}\cdot\text{mm}$ ve $\Delta_u=9,43 \text{ mm}$, lifsiz/az lifli eşleniklerine göre anlamlı bir artıştır.



Şekil 52. Tüm numunelerin (a) yük-deplasman eğrileri (b) normalize edilmiş yük-deplasman eğrileri

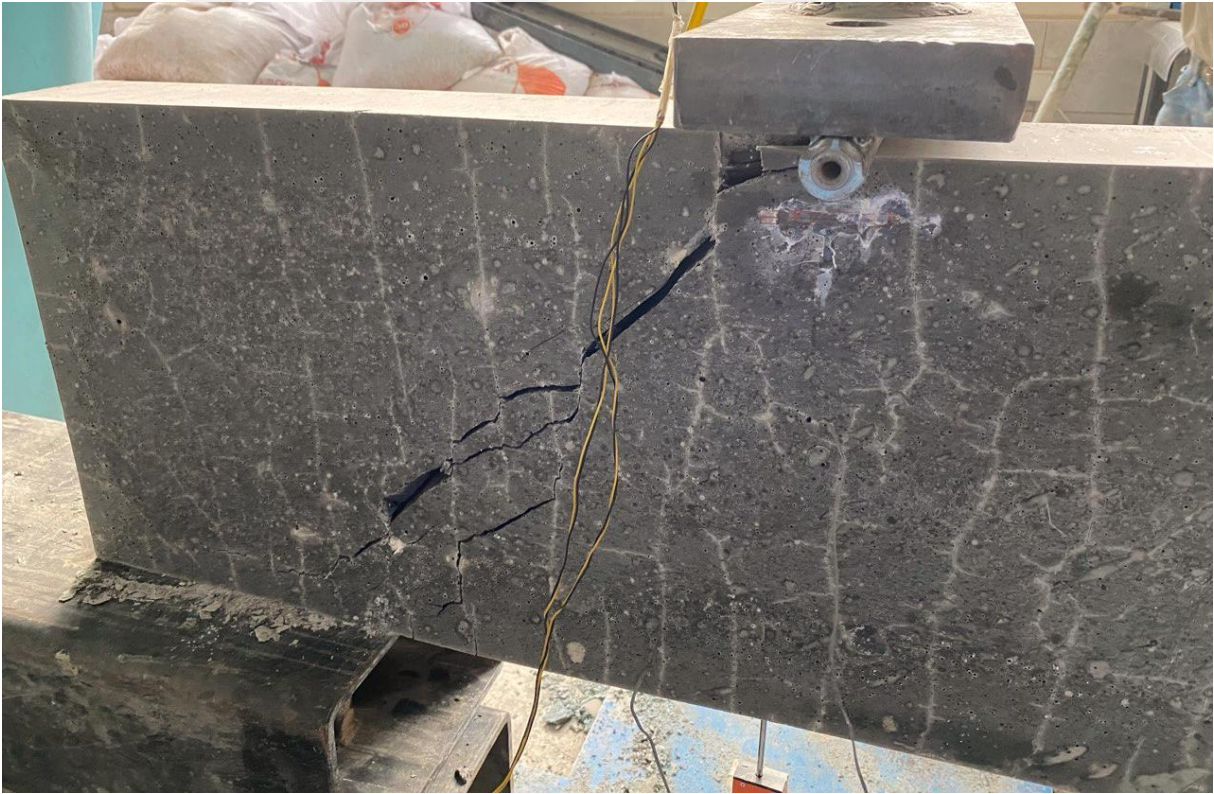
Göçme Modu ve Çatlak Dağılımı

Bu bölümde kesme kuvvetine maruz kalan betonarme derin kirişlerin deneyden sonraki çatlak dağılımları değerlendirilmiştir. Yapılan tez çalışmasında test edilen yüksek kirişlere ait görsellerde kırılma sonrası gözlemlenen çatlak biçimleri, kirişlerin göçme davranışını ortaya koymak açısından önemli bilgiler vermektedir. İncelenen tüm yüksek kirişlerin göçme modu kesme göçmesidir. K1 yüksek kirişinde oluşan ilk çatlak $P_{cr}=116,56$ kN yükünde meydana gelmiştir. Bu yüke karşılık gelen yer değiştirme değeri (Δ_{cr}) ise 1,71 mm'dir. **Şekil 48'e** baktığımızda oluşan ilk çatlak kirişin sol kısmında yükleme noktasından başlayarak eğimli bir şekilde kirişin alt kısmına doğru ilerlemektedir. Oluşan çatlak genişliği oldukça az ve çatlak boyu kısa kalıp, kirişin alt kısmına kadar ilerleyemeden orta bölgede son bulmuştur. Oluşan ikinci çatlığa bakıldığında yaklaşık olarak $P=164,92$ kN yük değerinde meydana gelmiştir. Bu değere karşılık gelen yer değiştirme yaklaşık değeri 2,26 mm'dir. Oluşan ikinci çatlak ilk çatlığın yaklaşık olarak 3-4 cm üst kısmında meydana gelmiştir. Oluşan ilk çatlığa göre ikinci çatlığın genişliği daha az ve çatlak boyu daha kısadır. Yüksek kirişe ait görsele bakıldığında oluşan çatlakların genel olarak sınırlı bir yayılım gösterdiği, çatlak genişliklerinin oldukça küçük kaldığı ve çatlak miktarının da az olduğu görülmektedir. Yüksek kiriş göçme moduna $P_u=170,00$ kN yük değerinde ulaşmıştır. Göçme modundaki yer değiştirme miktarı (Δ_u) 9,82 mm'dir. Kiriş göçme moduna ulaştığı anda kirişin üst kısmında (yükleme kısmında) hasar meydana gelmiştir.



Şekil 53. K1 yüksek kirişi

K2 yüksek kirişinde oluşan ilk çatlak $P_{cr}=80,13$ kN yükünde meydana gelmiştir. Bu yüke karşılık gelen yer değiştirme değeri (Δ_{cr}) ise 1,29 mm'dir. **Şekil 49'**a baktığımızda oluşan ilk çatlak kirişin yükleme noktasından başlayarak sol kısmından eğimli bir şekilde mesnete doğru ilerlemektedir. Çatlak genişliği yükleme kısmında daha genişken alt kısımlara doğru bu genişlik azalmaktadır. Oluşan çatlak genişliği yaklaşık olarak 1cm'e ulaşır ve çatlak boyu ise mesnete kadar uzanmaktadır. Oluşan ikinci çatlığa bakıldığında yaklaşık $P=113,94$ kN yük değerinde meydana gelmiştir. Bu değere karşılık gelen yer değiştirme yaklaşık değeri 1,75 mm'dir. Oluşan ikinci çatlak ilk çatlığa paralel olarak yaklaşık 4-5 cm alt kısmında meydana gelmiştir. Oluşan ilk çatlığa göre ikinci çatlak genişliği daha az ve çatlak boyu oldukça kısadır. Yüksek kirişe ait görsele bakıldığında genel olarak az sayıda çatlak oluştuğu görülmektedir. Oluşan çatlak genişlikleri K1 kirişine kıyasla daha geniş ve çatlak boyları daha uzundur. Yüksek kiriş göçme moduna $P_u=118,93$ kN yük değerinde ulaşmıştır. Göçme modundaki yer değiştirme miktarı (Δ_u) 7,58 mm'dir. Kiriş göçme moduna ulaştığı anda hasar sadece çatlaklar üzerinde meydana gelmiştir.



Şekil 54. K2 yüksek kirişi

K3 yüksek kirişinde oluşan ilk çatlak $P_{cr}=113,10$ kN yükünde meydana gelmiştir. Bu yüke karşılık gelen yer değiştirme değeri (Δ_{cr}) ise 2,08 mm'dir. **Şekil 50'**e baktığımızda oluşan ilk çatlak kirişin yükleme noktasından başlayarak sağ kısmından eğimli bir şekilde mesnete doğru ilerlemektedir. Oluşan ilk çatlak oldukça ince olmakla birlikte kirişin alt mesnet kısmında son bulmuştur. Oluşan ince çatlak hemen ardından oluşan ikinci çatlığa bakıldığında yaklaşık

$P=151,27$ kN yük değerinde meydana gelmiştir. Bu değere karşılık gelen yer değiştirme yaklaşık değeri $2,47$ mm'dir. Oluşan ikinci çatlak yükleme noktasından başlayarak kirişin sol kısmından eğimli bir şekilde mesnete doğru ilerleyip kiriş alt kısmında son bulmuştur. Oluşan ikinci çatlak oluşan ilk çatlığa göre oldukça geniş ve çatlak boyu daha uzundur. Yüksek kirişe ait görsele bakıldığında genel olarak az sayıda çatlak oluştuğu görülmektedir. Oluşan çatlak genişliklerine bakıldığında K1 kirişine kıyasla daha geniş ve çatlak boyları daha uzundur. K2 kirişindeki çatlaklarla benzerlik göstermektedir. Yüksek kiriş göçme moduna $P_u=151,54$ kN yük değerinde ulaşmıştır. Göçme modundaki yer değiştirme miktarı (Δ_u) $6,62$ mm'dir. Kiriş göçme moduna ulaştığı anda hasar sadece çatlaklar üzerinde meydana gelmiştir.



Şekil 55. K3 yüksek kirişi

K4 yüksek kirişinde oluşan ilk çatlak $P_{cr}=95,23$ kN yükünde meydana gelmiştir. Bu yüke karşılık gelen yer değiştirme değeri (Δ_{cr}) ise $1,02$ mm'dir. **Şekil 51**'e baktığımızda oluşan ilk çatlak kirişin yükleme noktasının 3-4 cm kadar solundan başlayıp diğer çatlaklara kıyasla daha yatay bir şekilde ilerlemiştir. Oluşan ilk çatlak boyu oldukça kısadır. Oluşan ikinci çatlaklar yükleme noktasından başlayarak kirişin sağ ve sol kısmından eğimli bir şekilde kiriş alt kısmına doğru ilerlemişlerdir. Kiriş sol tarafında oluşan ikinci çatlak genişliği ilk çatlığa göre daha geniş ve uzundur. İkinci çatlak ilk çatlığa paralel çatlak boyu 6-7 cm kadar aşağısındadır. Sağ tarafta oluşan ikinci çatlak sol taraftakine kıyasla genişliği daha azdır ve benzer şekilde ilerleyiş göstermiştir. İkinci çatlaklar yaklaşık $P=151,27$ kN yük değerinde meydana gelmiştir. Bu değere karşılık gelen yer değiştirme yaklaşık değeri $1,46$ mm'dir. Daha sonra kiriş sol tarafında ilk çatlak boyu 2-3 cm aşağısında, ikinci çatlak boyu 3-4 cm üstünde üçüncü çatlak meydana gelmiştir. Üçüncü çatlak sol ikinci çatlakla benzer şekilde olup yükleme noktasından başlayarak sol mesnete doğru ilerleyerek kiriş alt kısmında son bulmuştur. Kirişin hemen yükleme noktasının alt kısmında dördüncü çatlaklar oluşmuştur. Oluşan çatlaklar diğer

çatlaklara kıyasla daha dik, kısa ve genişlikleri azdır. Son olarak beşinci çatlak sağ ikinci çatlağa paralel olarak 3-4 cm üstünde oluşmuş ve oluşan çatlak ilk çatlak gibi kısa kalmıştır. Yüksek kirişe ait görsele bakıldığında K1, K2 ve K3 kirişine göre çatlak sayısının daha fazla olduğu görülmektedir. Yüksek kiriş göçme moduna $P_u=124,88$ kN yük değerinde ulaşmıştır. Göçme modundaki yer değiştirme miktarı (Δ_u) 7,25 mm'dir. Kiriş göçme moduna ulaştığı anda hasar sadece çatlaklar üzerinde meydana gelmiştir.



Şekil 56. K4 yüksek kirişi

K5 yüksek kirişinde oluşan ilk çatlak $P_{cr}=105,32$ kN yükünde meydana gelmiştir. Bu yüke karşılık gelen yer değiştirme değeri (Δ_{cr}) ise 0,80 mm'dir. **Şekil 52'**e baktığımızda oluşan ilk çatlak kirişin yükleme noktasından başlayarak sağ kısmından eğimli bir şekilde mesnete doğru ilerlemektedir. Oluşan ilk çatlak ilerleyişi kirişin orta kısımlarında sonlanmıştır. Oluşan ikinci çatlağa bakıldığında yaklaşık $P=140,62$ kN yük değerinde meydana gelmiştir. Bu değere karşılık gelen yer değiştirme yaklaşık değeri 1,22 mm'dir. Oluşan ikinci çatlak yükleme noktasından başlayarak kirişin sol kısmından eğimli bir şekilde mesnete doğru ilerleyip kiriş alt kısmında son bulmuştur. Oluşan ikinci çatlak oluşan ilk çatlağa göre geniş ve çatlak boyu daha uzundur. Son olarak üçüncü çatlak ilk çatlağa paralel olarak 2-3 cm aşağısında oluşmuştur. Boyu ilk iki çatlağa göre daha kısadır. Yüksek kirişe ait görsele bakıldığında genel olarak az sayıda çatlak oluştuğu görülmektedir. Yüksek kiriş göçme moduna $P_u=140,73$ kN yük değerinde ulaşmıştır. Göçme modundaki yer değiştirme miktarı (Δ_u) 6,87 mm'dir. Kiriş göçme moduna ulaştığı anda hasar çatlaklar üzerinde ve yükleme noktasında meydana gelmiştir.



Şekil 57. K5 yüksek kirişi

K6 yüksek kirişinde oluşan ilk çatlak $P_{cr}=65,25$ kN yükünde meydana gelmiştir. Bu yüke karşılık gelen yer değiştirme değeri (Δ_{cr}) ise 3,17 mm'dir. **Şekil 53**'e baktığımızda oluşan ilk çatlak kirişin yükleme noktasından başlayarak sol kısmından eğimli bir şekilde mesnete doğru ilerlemektedir. Oluşan çatlak genişliği 1-2 cm aralığındadır. Oluşan ikinci çatlığa bakıldığında yaklaşık $P=97,96$ kN yük değerinde meydana gelmiştir. Bu değere karşılık gelen yer değiştirme yaklaşık değeri 3,83 mm'dir. Oluşan ikinci çatlak ilk çatlığa paralel olarak 4-5 cm üstünde meydana gelmiştir. Oluşan ikinci çatlak oluşan ilk çatlakla benzer genişliğe sahip fakat çatlak boyu daha kısadır. Oluşan üçüncü çatlak ikinci çatlığa paralel olarak 2-3 cm üstünde oluşmuştur. Boyu ilk iki çatlığa göre daha kısa ve genişliği de daha azdır. Son olarak kirişin sağ kısmında ise beşinci ve altıncı çatlaklar meydana gelmiştir. Bu çatlaklar kirişin alt noktasına kadar ilerlemiş ince çatlaklardır. Yüksek kirişe ait görsele bakıldığında genel olarak çok sayıda çatlak olduğu görülmektedir. Yüksek kiriş göçme moduna $P_u=106,92$ kN yük değerinde ulaşmıştır. Göçme modundaki yer değiştirme miktarı (Δ_u) 13,42 mm'dir. Kiriş göçme moduna ulaştığı anda hasar çatlaklar üzerinde ve kiriş üst kısmında meydana gelmiştir.



Şekil 58. K6 yüksek kirişi

K7 yüksek kirişinde oluşan ilk çatlak $P_{cr}=104,29$ kN yükünde meydana gelmiştir. Bu yüke karşılık gelen yer değiştirme değeri (Δ_{cr}) ise 4,18 mm'dir. **Şekil 54'**e baktığımızda çatlaklar kılcal olarak oluşmuş ve çok fazla ilerleyememiştir. Genel olarak bakıldığında az sayıda belirsiz çatlakların oluştuğu görülmektedir. Yüksek kiriş göçme moduna $P_u=139,05$ kN yük değerinde ulaşmıştır. Göçme modundaki yer değiştirme miktarı (Δ_u) 8,89 mm'dir. Kiriş göçme moduna ulaştığı anda kiriş yükleme bölgesinde oldukça az hasar meydana gelmiştir.



Şekil 59. K7 yüksek kirişi

K8 yüksek kirişinde oluşan ilk çatlak $P_{cr}=83,16$ yükünde meydana gelmiştir. Bu yüke karşılık gelen yer değiştirme değeri (Δ_{cr}) ise 0,92 mm'dir. **Şekil 55**'e baktığımızda oluşan ilk çatlak kirişin yükleme noktasından başlayarak sol kısmından eğimli bir şekilde mesnete doğru ilerlemektedir, çatlak kirişin alt kısmına ulaşmadan son bulmuştur. Oluşan çatlak genişliği 1-2 cm aralığındadır. Oluşan ikinci çatlığa bakıldığında yaklaşık $P=110,10$ kN yük değerinde meydana gelmiştir. Bu değere karşılık gelen yer değiştirme yaklaşık değeri 1,32 mm'dir. Oluşan ikinci çatlak ilk çatlığa paralel olarak 4-5 cm üstünde meydana gelmiştir. Oluşan ikinci çatlak kirişin sağ tarafında oluşmuştur. Çatlak genişliği oldukça dardır ve çatlak kirişin alt kısmına ulaşmadan son bulmuştur. Yüksek kirişe ait görsele bakıldığında genel olarak az sayıda çatlak olduğu görülmektedir. Yüksek kiriş göçme moduna $P_u=109,61$ kN yük değerinde ulaşmıştır. Göçme modundaki yer değiştirme miktarı (Δ_u) 7,43 mm'dir. Kiriş göçme moduna ulaştığı anda hasar çatlaklar üzerinde ve yükleme noktasında meydana gelmiştir.



Şekil 60. K8 yüksek kirişi

K9 yüksek kirişinde oluşan ilk çatlak $P_{cr}=56,36$ kN yükünde meydana gelmiştir. Bu yüke karşılık gelen yer değiştirme değeri (Δ_{cr}) ise 1,07 mm'dir. **Şekil 56**'ya baktığımızda oluşan ilk çatlak kirişin yükleme noktasından başlayarak sol kısmından daha dalgalı bir şekilde mesnete doğru ilerlemiştir. Oluşan çatlak genişliği kiriş orta kısmında daha fazladır (yaklaşık 2 cm) ve alt kısma doğru daralmaktadır. Oluşan ikinci çatlığa bakıldığında yaklaşık $P=79,60$ kN yük değerinde meydana gelmiştir. Bu değere karşılık gelen yer değiştirme yaklaşık değeri 1,41 mm'dir. Oluşan ikinci çatlak kirişin sağ tarafında yükleme noktasından eğimli bir şekilde mesnete doğru ilerlemiştir. Oluşan ikinci çatlak ilk çatlaktan daha az genişliğe sahiptir ve kirişin

alt kısmına daha lineer bir şekilde ilerlemiştir. Oluşan üçüncü çatlak yükleme noktasının 5-6 cm yanından başlayarak ilk çatlağın 4-5 cm üstünde ve ilk çatlağa paralel bir şekilde oluşmuştur. Boyu ilk iki çatlağa göre daha kısa ama genişliği iki çatlakla benzerdir. Son olarak kirişin hemen yükleme noktası altında oldukça küçük çatlaklar meydana gelmiştir. Bu çatlaklar kirişin alt noktasına kadar ilerleyememiştir. Yüksek kirişe ait görsele bakıldığında genel olarak çok sayıda çatlak olduğu görülmektedir. Yüksek kiriş göçme moduna $P_u=82,11$ kN yük değerinde ulaşmıştır. Göçme modundaki yer değiştirme miktarı (Δ_u) 6,14 mm'dir. Kiriş göçme moduna ulaştığı anda hasar çatlaklar üzerinde ve kiriş üst kısmında meydana gelmiştir.



Şekil 61. K9 yüksek kirişi

K10 yüksek kirişinde oluşan ilk çatlak $P_{cr}=78,55$ kN yükünde meydana gelmiştir. Bu yüke karşılık gelen yer değiştirme değeri (Δ_{cr}) ise 1,06 mm'dir. **Şekil 57'**e baktığımızda oluşan ilk çatlak kirişin yükleme noktasından başlayarak sol kısmından eğimli bir şekilde mesnete doğru ilerlemektedir. Oluşan çatlak genişliği 1 cm civarındadır. Oluşan ikinci çatlağa bakıldığında yaklaşık $P=104,73$ kN yük değerinde meydana gelmiştir. Bu değere karşılık gelen yer değiştirme yaklaşık değeri 1,48 mm'dir. Oluşan ikinci çatlak kirişin sağ tarafında yükleme noktasından başlayıp mesnete doğru ilerlemiştir. Oluşan ikinci çatlak oluşan ilk çatlakla benzer genişliğe ve boya sahiptir. Kirişte artan yükle birlikte oluşan diğer çatlaklara baktığımızda oluşan ilk iki çatlakla benzer yapıda çatlaklardır. Yüksek kirişe ait görsele bakıldığında genel olarak çok sayıda çatlak olduğu görülmektedir. Yüksek kiriş göçme moduna $P_u=104,64$ kN yük değerinde ulaşmıştır. Göçme modundaki yer değiştirme miktarı (Δ_u) 7,81 mm'dir. Kiriş göçme moduna ulaştığı anda hasar çatlaklar üzerinde ve kiriş üst kısmında meydana gelmiştir.



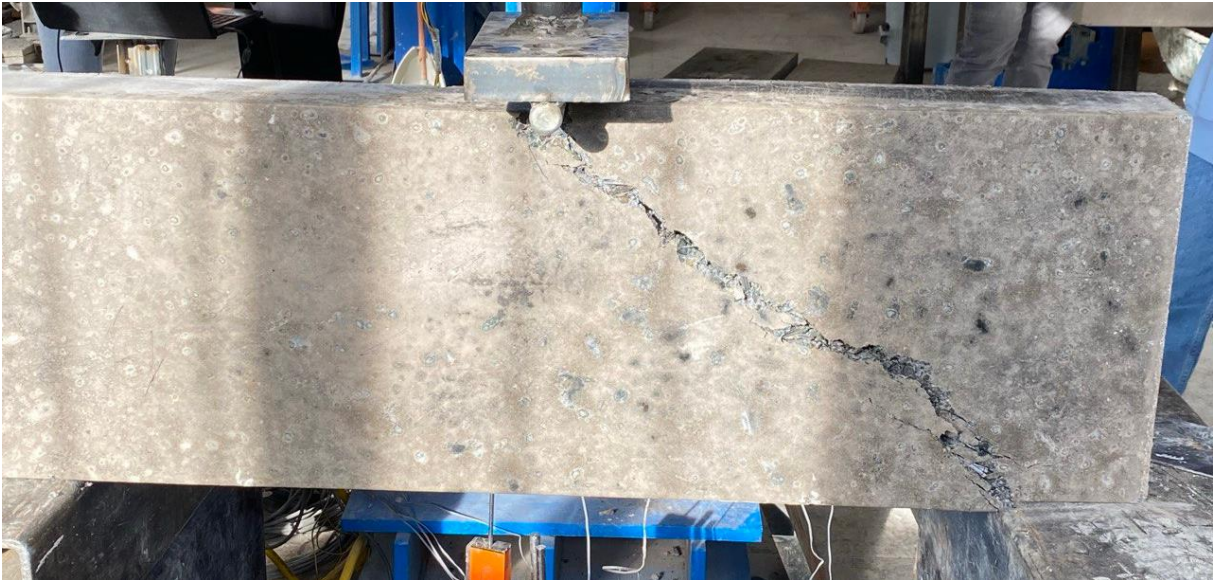
Şekil 62. K10 yüksek kirişi

K11 yüksek kirişinde oluşan ilk çatlak $P_{cr}=46,42$ kN yükünde meydana gelmiştir. Bu yüke karşılık gelen yer değiştirme değeri (Δ_{cr}) ise 0,77 mm'dir. **Şekil 58'**e baktığımızda oluşan ilk çatlak kirişin yükleme noktasından başlayarak kiriş sol kısmından eğimli bir şekilde mesnete doğru ilerlemektedir. Oluşan çatlak genişliği 2-3 cm civarında olup, oldukça belirgin bir şekilde meydana gelmiştir. Oluşan ikinci çatlığa bakıldığında yaklaşık $P=62,00$ kN yük değerinde meydana gelmiştir. Bu değere karşılık gelen yer değiştirme yaklaşık değeri 1,15 mm'dir. Oluşan ikinci çatlak ilk çatlığa paralel olarak 3-4 cm altında oluşmuştur. Çatlak yükleme noktasından başlayıp mesnete doğru ilerlerken kiriş ortasında son bulmuştur. Oluşan ikinci çatlak oluşan ilk çatlaktan daha dar ve kısadır. Yüksek kirişe ait görsele bakıldığında genel olarak az sayıda çatlak oluştuğu görülmektedir. Yüksek kiriş göçme moduna $P_u=61,92$ kN yük değerinde ulaşmıştır. Göçme modundaki yer değiştirme miktarı (Δ_u) 6,44 mm'dir. Kiriş göçme moduna ulaştığı anda hasar çatlaklar üzerinde meydana gelmiştir.



Şekil 63. K11 yüksek kirişi

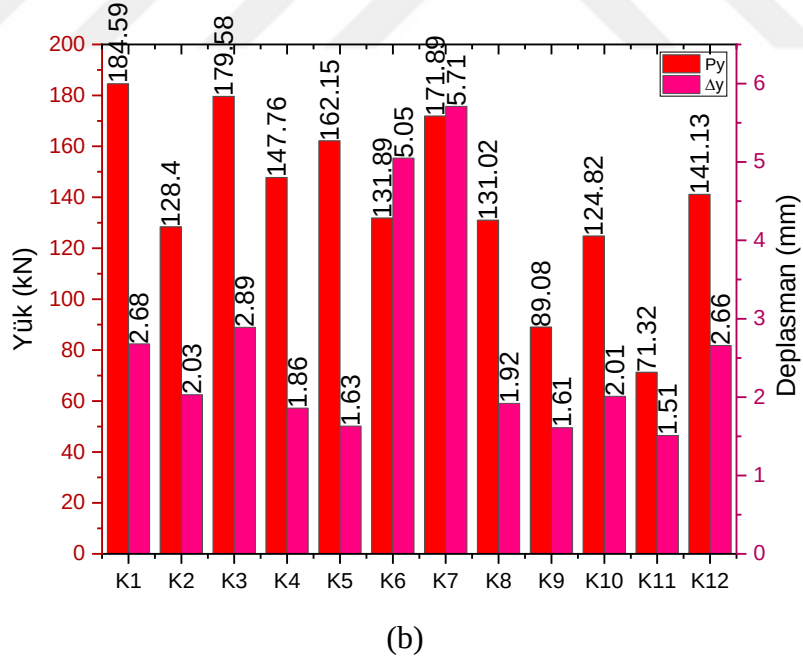
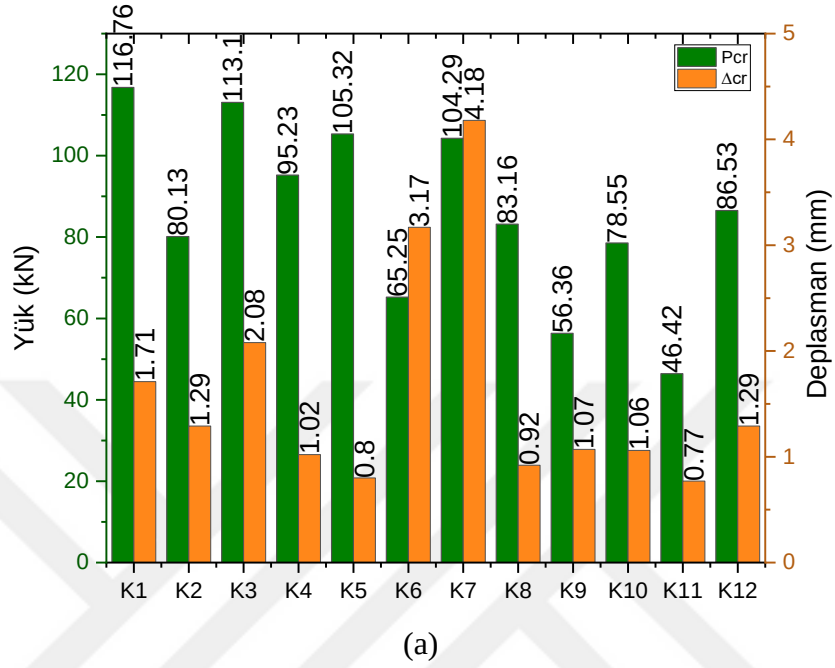
K12 yüksek kirişinde oluşan ilk çatlak $P_{cr}=86,53$ kN yükünde meydana gelmiştir. Bu yüke karşılık gelen yer değiştirme değeri (Δ_{cr}) ise 1,29 mm'dir. **Şekil 59'**a baktığımızda oluşan ilk çatlak kirişin yükleme noktasından başlayarak kiriş sağ kısmından eğimli bir şekilde mesnete doğru ilerlemektedir. K12 kirişinde çatlak oluşumu ve göçme biçimi K11 kirişiyle oldukça benzer bir şekilde ilerlemiştir. Yüksek kirişe ait görsele bakıldığında genel olarak tek ve oldukça geniş bir çatlak olduğu görülmektedir. Yüksek kiriş göçme moduna $P_u=115,73$ kN yük değerinde ulaşmıştır. Göçme modundaki yer değiştirme miktarı (Δ_u) 9,43 mm'dir. Kiriş göçme moduna ulaştığı anda hasar çatlaklar üzerinde meydana gelmiştir.



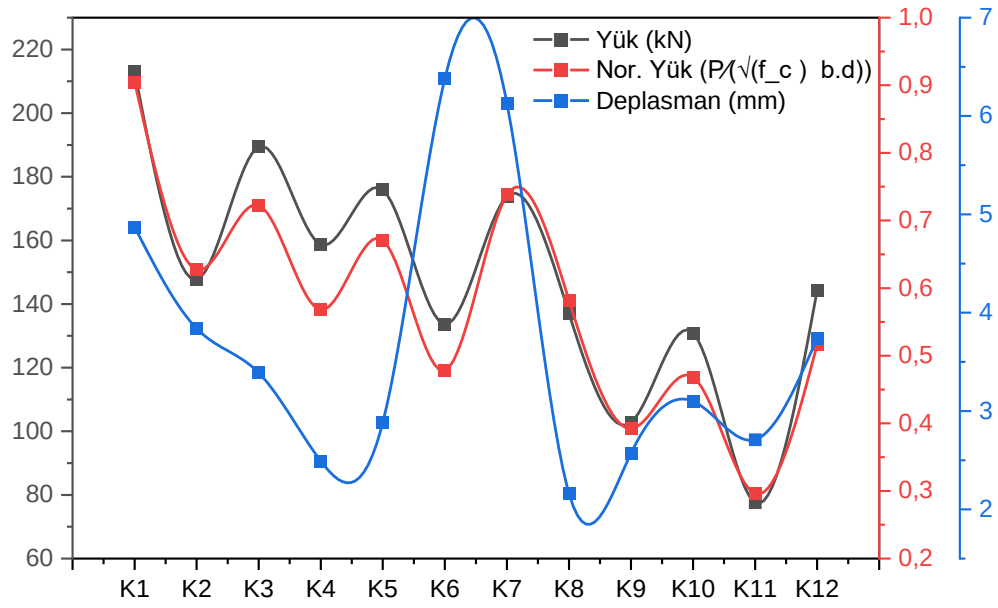
Şekil 64. K12 yüksek kirişi

Kesme Dayanımına Parametrelerin Etkileri

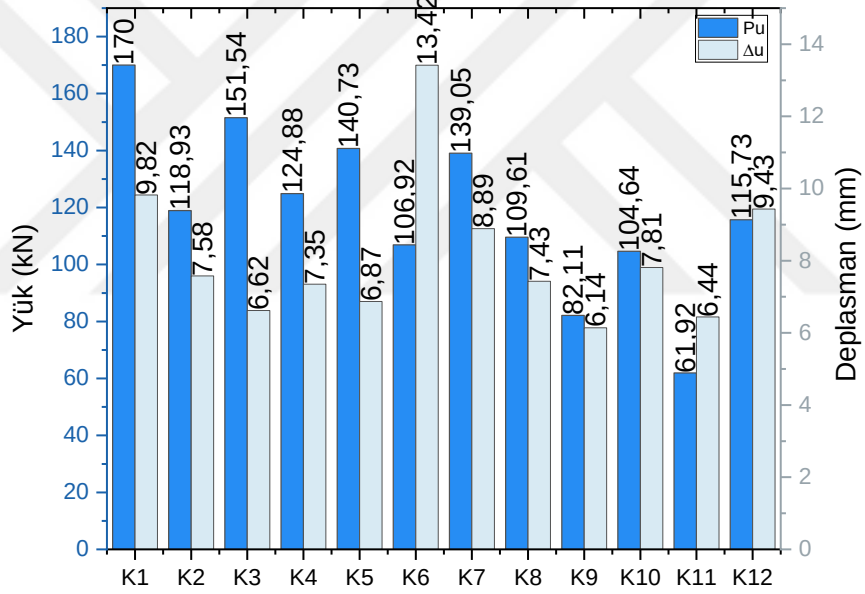
Şekil 60'da betonarme derin kirişlerin kesme performansı parametrelerini göstermektedir. Bu bölümde tez çalışması kapsamında belirlenen parametrelerin (a/d oranı, boyuna donatı oranı ve çelik lif oranı) kesme dayanımı üzerindeki etkisi incelenmiştir.



Şekil 65. Betonarme derin kirişlerin (a) kritik yük (b) akma yükü (c) maksimum yük ve (d) nihai yük dayanımlarının karşılaştırılması



(c)



(d)

Şekil 66. Betonarme derin kirişlerin (a) kritik yük (b) akma yükü (c) maksimum yük ve (d) nihai yük dayanımlarının karşılaştırılması (devamı)

a/d Oranının Kesme Dayanımına Etkisi

a/d oranının kritik yük, akma yükü, maksimum yük ve nihai yük ve bu yüklere karşı gelen deplasman değerleri üzerindeki etkisi **Tablo 17, Tablo 18, Tablo 19 ve Tablo 20**'de gösterilmiştir. Artan a/d oranının kirişlerdeki ilk çatlama yükü üzerindeki etkisi, yapılan deneysel çalışmalar sonucunda değerlendirilmiştir. Genel olarak bakıldığında, a/d oranının artması ile birlikte ilk çatlama yükünde anlamlı bir düşüş meydana geldiği gözlemlenmiştir. Bu düşüş, aynı donatı düzenine, aynı donatı oranına ve aynı lif içeriğine sahip kirişler arasında

yapılan karşılaştırmalarla değerlendirilmiştir. Örneğin, a/d oranı 0,75 olan etriyeli ve lifsiz numunede ilk çatlama 116,76 kN yük seviyesinde gerçekleşmiştir. Buna karşılık, aynı donatı düzenine sahip ancak a/d oranı 1,5 olan etriyeli ve lifsiz numunede ilk çatlama 104,29 kN yük altında meydana gelmiştir. Benzer şekilde, %0,5 çelik lif içeriğine sahip numune çiftlerinde bu yük değerindeki düşüş daha da belirgin hale gelmiş; 113,10 → 56,36 kN ve 105,32 → 46,42 kN gibi ciddi değer düşüşleri sergilemiştir. Bu sonuçlar, artan a/d oranıyla birlikte kirişlerde kesme kuvvetiyle birlikte taşıma kapasitesinde meydana gelen azalmayı ortaya koymaktadır. Çünkü a/d oranı arttıkça, oluşan kesme çatlaklarının eğimi azalır ve çatlaklar daha dik şekilde ilerleyerek daha düşük yük değerlerinde ortaya çıkar. Bununla birlikte, tüm kirişlerde bu düşüşün gerçekleşmediği de görülmektedir. Örneğin, boyuna donatı oranının yarıya indirildiği %1 çelik lif içeriğine sahip kiriş çiftinde fazla bir artış gözlemlenmiştir (65,25 → 86,53 kN). Bu artışları istisnai kabul ederek genel olarak değerlendirildiğinde, a/d oranı ile ilk çatlama yükü arasındaki ilişki, genel bir azalma eğilimi göstermektedir.

Tablo 17. a/d Oranının Kritik Yük Üzerindeki Etkisinin Karşılaştırılması

	P_{cr}^* (MPa)	Δ_{cr} (mm)		P_{cr}^{**} (MPa)	Δ_{cr} (mm)	P_{cr}^* / P_{cr}^{**}
K1	116,76	1,71	K7	104,29	4,18	1,12
K2	80,13	1,29	K8	83,16	0,92	0,96
K3	113,10	2,08	K9	56,36	1,07	2,01
K4	95,23	1,02	K10	78,55	1,06	1,21
K5	105,32	0,80	K11	46,42	0,77	2,27
K6	65,25	3,17	K12	86,53	1,29	0,75

Tablo 18. a/d Oranının Akma Yüğü Üzerindeki Etkisinin Karşılaştırılması

	P_y^* (MPa)	Δ_y (mm)		P_y^{**} (MPa)	Δ_y (mm)	P_y^* / P_y^{**}
K1	184,59	2,68	K7	171,89	5,71	1,07
K2	128,40	2,03	K8	131,02	1,92	0,98
K3	179,58	2,89	K9	89,08	1,61	2,02
K4	147,76	1,86	K10	124,82	2,01	1,18
K5	162,15	1,63	K11	71,32	1,51	2,27
K6	131,89	5,05	K12	141,13	2,66	0,93

Tablo 19. a/d Oranının Maksimum Yük Üzerindeki Etkisinin Karşılaştırılması

	P_{maks}^* (MPa)	Δ_{maks} (mm)		P_{maks}^{**} (MPa)	Δ_{maks} (mm)	$P_{maks}^* / P_{maks}^{**}$
K1	213,07	4,87	K7	173,81	6,13	1,23
K2	147,74	3,84	K8	137,02	2,16	1,08
K3	189,43	3,39	K9	102,82	2,57	1,84
K4	158,72	2,49	K10	130,91	3,10	1,21
K5	175,92	2,88	K11	77,59	2,71	2,27
K6	133,66	6,38	K12	144,22	3,74	0,93

Tablo 20. a/d Oranının Nihai Yük Üzerindeki Etkisinin Karşılaştırılması

	P_u^* (MPa)	Δ_u (mm)		P_u^{**} (MPa)	Δ_u (mm)	P_u^* / P_u^{**}
K1	170,00	9,82	K7	139,05	8,89	1,22
K2	118,93	7,58	K8	109,61	7,43	1,09
K3	151,54	6,62	K9	82,11	6,14	1,85
K4	124,88	7,35	K10	104,64	7,81	1,19
K5	140,73	6,87	K11	61,92	6,44	2,27
K6	106,92	13,42	K12	115,73	9,43	0,92

Elde edilen deneysel sonuçlara bakıldığında, kirişlerde a/d oranının artmasıyla birlikte donatının ilk akma yükü (P_y) değerinde belirgin bir azalma meydana geldiği görülmektedir. Aynı donatı düzeni ve çelik lif içeriğine sahip kiriş çiftlerinde bu azalma net bir şekilde görülebilmektedir. Örneğin, a/d oranı 0,75 olan etriyeli lifsiz kirişte 184,59 kN olarak kaydedilmişken, a/d oranı 1,50 olan etriyeli lifsiz kirişte bu değer 171,89 kN olarak kaydedilmiştir. Benzer şekilde, %0,5 çelik lif içeriğine sahip kiriş çiftlerinde de akma yükleri 179,58 → 89,08 kN ve 162,15 → 71,32 kN şeklinde azalmıştır. Bu sonuçlar, yüksek a/d oranına sahip kirişlerin, daha düşük kesme kapasitesine sahip olduğunu ve plastik deformasyon öncesi daha düşük yük seviyelerinde akma davranışı gösterdiğini göstermektedir. Yer değiştirme değerleri (Δ_y) açısından aynı donatı düzenine ve çelik lif içeriğine sahip kirişleri incelediğimizde ise artan ve azalan yük değerleri ile a/d oranı arttığında K1-K7 kiriş çiftinde ve K4-K10 kiriş çifti artış gözlemlenmiştir. Bunun dışındaki kiriş çiftlerinde a/d oranı arttıkça Δ_y değerinde düşüş gözlemlenmiştir. Bu durum, a/d oranının yer değiştirme kapasitesine olan etkisinin daha karmaşık ve malzeme özellikleriyle birlikte değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir. Ancak genel bir değerlendirme yapacak olursak, düşük a/d oranına sahip kirişlerin daha yüksek akma yükü taşıdığı ve daha sünek bir davranış sergileyebildiği söylenebilir. Bu da düşük a/d oranlı kirişlerin dayanım açısından daha iyi bir performans sergilediğini göstermektedir.

Deneysel sonuçları incelendiğinde, aynı donatı düzenine ve çelik lif içeriğine sahip yüksek kirişlerde a/d oranının artmasının maksimum yük taşıma kapasitesi üzerinde gözle görülür bir düşüşe neden olduğu gözlemlenmiştir (K6-K12 kiriş çifti hariç). Düşük a/d oranına sahip kirişler, daha yüksek kesme dayanımına sahip olması ve daha kontrollü çatlak gelişimi sayesinde daha büyük yükleri taşıyabilmektedir. P_{max} değerlerine bakıldığında örneğin, a/d oranı 0,75 olan K1 numunesi 213,07 kN maksimum yük taşıırken, benzer özelliklere sahip ancak a/d oranı 1,50 olan K7 numunesinde bu değer 173,81 kN değerine düşmektedir. Benzer şekilde, aynı donatı düzenine ve çelik lif içeriğine sahip kiriş çiftlerinde de maksimum yük değerlerinde ciddi azalmalar meydana gelmiştir. Bu durum, a/d oranının artmasıyla birlikte kirişin kesme kapasitesinde bir azalma olduğunu ve daha düşük yük seviyelerinde hasarın geliştiğini göstermektedir. Yüksek a/d oranlarında oluşan çatlakların daha eğik açılarla gelişmesi, kesme gerilmelerinin kritik düzeylere daha erken ulaşmasına ve yük aktarım kapasitesinin sınırlandırılmasına neden olmaktadır. Bu nedenle, kesme davranışının etkin olduğu kiriş tasarımlarında a/d oranının düşük tutulması, yapısal performans açısından önemli bir avantaj sağlamaktadır. İncelenen P_{max} yük değerlerine karşılık gelen maksimum yer değiştirme (Δ_{max}) değerleri incelendiğinde a/d oranının artması genel olarak bir düşüşe neden olmuştur. Özellikle aynı donatı düzeni ve çelik lif içeriğine sahip a/d oranı 0,75 olan kiriş numunelerinde yer değiştirme kapasitesinin birçok durumda a/d 1,50 olan numunelere kıyasla daha yüksek olduğu görülmektedir. Örneğin, K3-K9 kiriş çiftleri karşılaştırıldığında, Δ_{max} değeri 3,39 mm'den 2,57 mm'ye düşmüştür. Benzer düşüşler K2-K8, K5-K11 çiftlerinde de gözlemlenmiş ve en büyük düşüş K6-K12 kiriş çiftinde görülmüştür. K1-K7 ve K4-K10 kiriş çiftinde ise a/d artışı ile birlikte Δ_{max} artmıştır.

Nihai yük taşıma kapasitesi (P_u) açısından yapılan elde edilen sonuçlara bakıldığında, a/d oranının artmasının genellikle olumsuz bir etki oluşturduğu görülmektedir. Elde edilen bu sonuçlar ışığında, a/d oranı 0,75 olan kirişlerin, aynı donatı ve çelik lif özelliklerine sahip fakat a/d oranı 1,50 olan kirişlere kıyasla daha yüksek nihai yük değerlerine ulaştığını göstermektedir. Örneğin, etriyeli ve lifsiz kiriş çiftinde 170,00 kN nihai yük değerinden 139,05 kN değerine düşmüştür. Aynı donatı düzenine ve çelik lif içeriğine sahip kiriş çiftlerinde de benzer şekilde (118,93 → 109,61, 151,54 → 82,11 kN ve 124,88 → 104,64 gibi) azalmalar gözlemlenmiştir. En kritik düşüş ise boyuna donatı oranının yarıya indiği %0,5 çelik lif içeriğine sahip kiriş çiftinde ortaya çıkmıştır. Bu kirişte nihai yük yaklaşık %58 azalarak 140,73 kN değerinden 61,92 kN değerine düşmüştür. Bu sonuçlar, artan a/d oranı ile birlikte kirişin kesme kapasitesinin zayıfladığını, çatlak oluşumunun daha erken gerçekleştiğini ve taşıma kapasitesinin önemli ölçüde azaldığını göstermektedir. Buna karşın boyuna donatı oranının yarıya indirildiği %1 çelik lif içeriğine sahip kiriş çiftinde ise düşüş değil biraz artış gözlemlenmiştir. Genel olarak

bakıldığında, a/d oranının artışı, yapının nihai taşıma kapasitesini düşürmekte ve kırılma anının daha düşük yük seviyelerinde gerçekleşmesine neden olmaktadır. Bu durum, özellikle yüksek kesme kuvveti etkisinde çalışan kirişlerde, a/d oranının kritik bir tasarım parametresi olarak dikkate alınması gerektiğini ortaya koymaktadır. Bununla birlikte kirişlerdeki bu yük değerlerine karşılık gelen Δ_y değerlerini inceleyecek olursak genel olarak artan a/d oranı ile birlikte aynı donatı oranına ve çelik lif içeriğine sahip kiriş çiftlerindeki (K4-K10 kiriş çifti hariç) bu değerde düşüş gözlemlenmiştir.

Tablo 17, 18, 19 ve 20 birlikte değerlendirildiğinde, a/d oranının 0,75'ten 1,50'ye yükselmesi derin kirişlerde kemerleşme (*arching*) etkisini zayıflatarak tüm yük seviyelerinde (çatlama yükü P_{cr} , akma yükü P_y , tepe yük P_{max} ve nihai yük P_u) kapasiteyi genel olarak düşürmektedir. Bu eğilim özellikle %0,5 lif + düşük/orta boyuna donatı konfigürasyonlarında daha keskin olduğu gözlemlenmiştir (ör. K3→K9 için $P_{cr} \approx 2,01$, $P_y \approx 2,02$, $P_{max} \approx 1,84$, $P_u \approx 1,85$; K5→K11 için tüm basamaklarda $\approx 2,27$ kat düşüş). Etriye varlığında dahi bu düşüş gözlemlenmiş olup ancak mutlak kapasiteler etriyesiz (diğer parametreler aynı olmak üzere) derin kirişlerde daha yüksek olduğu görülmektedir (ör. K1→K7: P_{max} % ≈ 18 , P_u % ≈ 18 azalsa da K7, K8'e göre daha üst seviyededir). Buna karşılık, yüksek lif hacmi (%1) çekme bölgesinde köprüleme etkisi sağlayarak a/d artışının kapasite kaybını sınırlamış veya tersine çevirmiştir. %1 lif + 2Ø10 boyuna donatı düzeninde K6→K12 geçişinde P_{cr} , P_y , P_{max} ve P_u 'da sınırlı artış elde edilmiştir (P_{max} ve $P_u \approx 8-9$ artış), lifsiz–etriyesiz 4Ø10 kirişlerinde ise K2→K8'de P_{cr}/P_y hemen hemen eşit ya da biraz daha yüksek çıkarken P_{max}/P_u yine düşmüştür. Bu karşılaştırmalar, a/d oranının artmasıyla kesme yerine eğilme etkilerinin ağır basmaya başladığını, lifin bu bölgede kırılma sonrası taşıma ve akma öncesi eşiğin kısmen korunmasına katkı sunduğunu göstermektedir. Buna karşın enine donatının düşük a/d oranında en tutarlı kapasite arttırıcı unsur olduğunu göstermektedir. Sonuç olarak, hedef kapasite önceleniyorsa düşük a/d + etriye + yeterli boyuna donatı, hedef süneklik/artık taşıma ise eğilme-dominant konfigürasyonlarda yüksek lif hacmi daha rasyonel bir seçim olduğu sonucuna varılmıştır.

Sunulan çalışmada a/d oranının artmasının yük taşıma kapasitesini olumsuz yönde etkilediği sonucuna varılmıştır. Literatürde ulaşılan çalışmalarda da a/d oranının yük taşıma kapasitesi üzerinde benzer etkiye neden olduğunu belirten çalışmalara ulaşılmıştır. Shahnewaz *et al.* (2020) yürütmüş oldukları derleme çalışmasında a/d oranının artmasının yük taşıma kapasitesini azalttığını belirtmişlerdir. Al-Issawi and Kamonna (2020) de yüksek kirişlerde a/d oranının azaltılmasının yük taşıma kapasitesini arttırırken rijitlik ve süneklik parametreleri üzerinde de belirgin bir etkisinin olduğunu vurgulamışlardır. Karimizadeh and Arabzadeh (2021) de a/d oranının derin kirişlerde performansı ve davranışı etkileyen en önemli parametre

olduğunu belirtmişlerdir. Bununla birlikte a/d oranının artmasının da derin kiriş yük taşıma kapasitesini azaltan bir geometrik parametre olduğunu da vurgulamışlardır. Ma *et al.* (2022) da 833 adet derin kiriş üzerinde yürüttükleri analitik ve sayısal çalışma sonucunda a/d oranının artmasının dayanımı olumsuz yönde etkilediğini belirtmişlerdir. Alqarni *et al.* (2022), Peng *et al.* (2023) ve Jin *et al.* (2022) de yürütmüş oldukları deneysel çalışmalar sonucunda a/d oranının artmasının derin kirişlerin yük taşıma kapasitelerini azalttığını belirtmişlerdir.

a/d oranının enerji sönümleme kapasitesi üzerindeki etkisi **Tablo 21**'de gösterilmiştir. Yapılan deneysel incelemeler, a/d oranının enerji sönümleme kapasitesi (E) üzerindeki etkisinin çoğu durumda olumsuz olduğunu göstermektedir. Enerji kapasitesi, kirişin yük-deplasman eğrisi altında kalan alan olarak tanımlanmakta olup, elemanın sünekliği ve enerji tüketebilme potansiyelini yansıtmaktadır. Elde edilen sonuçlara göre, a/d oranı 0,75 olan kirişler genellikle daha yüksek enerji kapasitesine sahip olmuş, a/d oranı 1,50 olarak değiştirildiğinde bu kapasitenin azaldığı gözlemlenmiştir. Örneğin, K1–K7 numune çiftinde enerji kapasitesi 1620,11 → 815,73 K5–K11 çiftinde ise 997,13 → 411,55 düşmüştür. Bu düşüşler, yüksek a/d oranlarına sahip kirişlerde çatlakların daha hızlı ve kontrolsüz ilerlemesine, dolayısıyla ani ve gevrek göçme davranışına neden olabilir. a/d oranı daha az olan kirişlerde ise çatlak oluşumu gecikmekte ve daha yüksek bir enerji sönümlemesine izin vermektedir. Değerlendirme yapıldığında düşük a/d oranları, sadece taşıma kapasitesi değil, aynı zamanda sünek kırılma ve enerji tüketimi açısından da önemli bir yere sahiptir.

Tablo 21. a/d Oranının Enerji Sönümleme Kapasitesi Üzerindeki Etkisinin Karşılaştırılması

	E* (kN.mm)		P _u ** (kN.mm)	P _u * / P _u **
K1	1620,11	K7	815,73	1,99
K2	867,01	K8	850,21	1,02
K3	834,65	K9	489,08	1,71
K4	932,13	K10	826,89	1,13
K5	997,73	K11	411,55	2,42
K6	1281,12	K12	1099,93	1,16

Çelik Lif Katkısının Kesme Dayanımına Etkisi

Çelik lif katkısının betonarme kirişlerin kesme davranışı üzerindeki etkisi, a/d oranı, donatı oranı ve düzeni gibi parametrelerle birlikte değerlendirildiğinde daha anlamlı hale gelmektedir. Çelik lif katkısının temel işlevi, çatlak oluşumunu geciktirmek, çatlak ilerlemesini yavaşlatmak ve sünekliği artırmaktır. Özellikle düşük a/d oranına sahip kirişlerde yapılan karşılaştırmalar, çelik lif katkısının ilk çatlama yükü (P_{cr}), akma yükü (P_y) ve nihai yük (P_u) üzerinde olumlu etkiler yarattığını göstermektedir. Çelik lif oranının kritik yük, akma yükü,

maksimum yük ve nihai yük ve bu yüklere karşı gelen deplasman değerleri üzerindeki etkisi **Tablo 22, Tablo 23, Tablo 24 ve Tablo 25**'de gösterilmiştir.

Düşük a/d Oranında Çelik Lif Katkısının Kesme Dayanımına Etkisi

Çelik lif katkısını kritik yük üzerindeki etkisini incelemek amacıyla **Tablo 22** 'e baktığımızda a/d oranı 0,75 olan kiriş grubunda aynı boyuna donatı oranına sahip kiriş grubu K2-K3-K4 karşılaştırılmıştır. Bu kiriş grubunda çelik lif içeriği %0 'dan %0,5 'e çıkarıldığında P_{cr} değerinde yaklaşık %41 değerinde bir artış görülmektedir. Çelik lif içeriği %1'e çıkarıldığında %0 lif içeriğine kıyasla %19 artış ve %0,5 lif içeriğine kıyasla %16 değerinde bir düşüş olduğu gözlemlenmiştir. Burada çelik lif içeriğinin %0,5'ten fazla kullanılmasının P_{cr} değeri üzerinde beklenen performansı sağlamadığı görülmektedir. Boyuna donatı oranı yarıya indirilen ve aynı boyuna donatı oranına sahip K5-K6 kiriş çiftinde bakıldığında ise çelik lif içeriğinin %0,5 'ten %1 'e çıkarılmasıyla P_{cr} değerinde %38 'lik bir düşüş gözlemlenmiştir. Bununla beraber yine **Tablo 23**'den Δ_{cr} değerlerine bakılarak karşılaştırılma yapılmıştır. K2-K3-K4 yüksek kiriş grubuna baktığımızda çelik lif içeriğinin %0 'dan %0,5 'e çıkarılmasıyla birlikte Δ_{cr} değerinde yaklaşık %61 değerinde artış gözlemlenmiştir. %1 çelik lif içeriğine sahip kirişte Δ_{cr} değerinde düşüş gözlemlenmiştir. K5-K6 kiriş çiftine baktığımızda ise artan lif içeriğiyle birlikte Δ_{cr} değerinde de yaklaşık %16 'lık bir artış gözlemlenmiştir.

Tablo 24. Çelik Lif Oranının Kritik Yük Üzerindeki Etkisinin Karşılaştırılması

a/d		P_{cr}^* (MPa)	Δ_{cr} (mm)		P_{cr}^{**} (MPa)	Δ_{cr} (mm)	P_{cr}^*/P_{cr}^{**}
0,75	K2	80,13	1,29	K3	113,10	2,08	0,71
	K3	113,10	2,08	K4	95,23	1,02	1,19
	K5	105,32	0,80	K6	65,25	3,17	1,61
1,5	K8	83,16	0,92	K9	56,36	1,07	1,48
	K9	56,36	1,07	K10	78,55	1,06	0,72
	K11	46,42	0,77	K12	86,53	1,29	0,54

Çelik lif katkısını akma yükü üzerindeki etkisini incelemek amacıyla **Tablo 23** 'e baktığımızda a/d oranı 0,75 olan kiriş grubunda aynı boyuna donatı oranına sahip kiriş grubu K2-K3-K4 karşılaştırılmıştır. Bu kiriş grubunda çelik lif içeriği %0 'dan %0,5 'e çıkarıldığında P_y değerinde yaklaşık %40 değerinde bir artış görülmektedir. Çelik lif içeriği %1'e çıkarıldığında %0 lif içeriğine kıyasla %15 artış ve %0,5 lif içeriğine kıyasla %18 değerinde bir düşüş olduğu gözlemlenmiştir. Burada çelik lif içeriğinin %0,5'ten fazla kullanılmasının P_y değeri üzerinde beklenen performansı sağlamadığı görülmektedir. Boyuna donatı oranı yarıya indirilen ve aynı boyuna donatı oranına sahip K5-K6 kiriş çiftinde bakıldığında ise çelik lif içeriğinin %0,5 'ten %1 'e çıkarılmasıyla P_y değerinde %19 'luk bir düşüş gözlemlenmiştir.

Bununla beraber yine **Tablo 23**'den Δ_y değerlerine bakılarak karşılaştırılma yapılmıştır. K2-K3-K4 yüksek kiriş grubuna baktığımızda çelik lif içeriğinin %0 'dan %0,5 'e çıkarılmasıyla birlikte Δ_y değerinde yaklaşık %42 değerinde artış gözlemlenmiştir. %1 çelik lif içeriğine sahip kirişte Δ_y değerinde düşüş gözlemlenmiştir. K5-K6 kiriş çiftine baktığımızda ise artan lif içeriğiyle birlikte Δ_y değerinde de iki katından daha fazla bir artış gözlemlenmiştir.

Tablo 25. Çelik Lif Oranının Akma Yüğü Üzerindeki Etkisinin Karşılaştırılması

a/d		P_y^* (MPa)	Δ_y (mm)		P_y^{**} (MPa)	Δ_y (mm)	P_y^*/P_y^{**}
0,75	K2	128,40	2,03	K3	179,58	2,89	0,72
	K3	179,58	2,89	K4	147,76	1,86	1,22
	K5	162,15	1,63	K6	131,89	5,05	1,23
1,5	K8	131,02	1,92	K9	89,08	1,61	1,47
	K9	89,08	1,61	K10	124,82	2,01	0,71
	K11	71,32	1,51	K12	141,13	2,66	0,51

Çelik lif katkısını maksimum yük üzerindeki etkisini incelemek amacıyla **Tablo 24** 'e baktığımızda a/d oranı 0,75 olan kiriş grubunda aynı boyuna donatı oranına sahip kiriş grubu K2-K3-K4 karşılaştırılmıştır. Bu kiriş grubunda çelik lif içeriği %0 'dan %0,5 'e çıkarıldığında P_{max} değerinde yaklaşık %28 değerinde bir artış görülmektedir. Çelik lif içeriği %1'e çıkarıldığında %0 lif içeriğine kıyasla %7 artış ve %0,5 lif içeriğine kıyasla %16 değerinde bir düşüş olduğu gözlemlenmiştir. Burada çelik lif içeriğinin %0,5'ten fazla kullanılmasının P_{max} değeri üzerinde beklenen performansı sağlamadığı görülmektedir. Boyuna donatı oranı yarıya indirilen ve aynı boyuna donatı oranına sahip K5-K6 kiriş çiftinde bakıldığında ise çelik lif içeriğinin %0,5 'ten %1 'e çıkarılmasıyla P_{max} değerinde %19 'luk bir düşüş gözlemlenmiştir. Bununla beraber yine **Tablo 24**'den Δ_{max} değerlerine bakılarak karşılaştırılma yapılmıştır. K2-K3-K4 yüksek kiriş grubuna baktığımızda çelik lif içeriğinin %0 'dan %0,5 'e çıkarılmasıyla birlikte Δ_{max} değeri neredeyse değişmediği gözlemlenirken, %1 çelik lif içeriğine sahip kirişte Δ_{max} değerinde yaklaşık %36 değerinde bir düşüş gözlemlenmiştir. K5-K6 kiriş çiftine baktığımızda ise artan lif içeriğiyle birlikte Δ_{max} değerinde de iki katından daha fazla bir artış gözlemlenmiştir.

Tablo 26. Çelik Lif Oranının Maksimum Yük Üzerindeki Etkisinin Karşılaştırılması

a/d		P_{maks}^* (MPa)	Δ_{maks} (mm)		P_{maks}^{**} (MPa)	Δ_{maks} (mm)	P_{maks}^*/P_{maks}^{**}
0,75	K2	147,74	3,84	K3	189,43	3,39	0,78
	K3	189,43	3,39	K4	158,72	2,49	1,19
	K5	175,92	2,88	K6	133,66	6,38	1,32
1,5	K8	137,02	2,16	K9	102,82	2,57	1,33
	K9	102,82	2,57	K10	130,91	3,10	0,79
	K11	77,59	2,71	K12	144,22	3,74	0,54

Çelik lif katkısını nihai yük üzerindeki etkisini incelemek amacıyla **Tablo 25** 'e baktığımızda a/d oranı 0,75 olan kiriş grubunda aynı boyuna donatı oranına sahip kiriş grubu K2-K3-K4 karşılaştırılmıştır. Bu kiriş grubunda çelik lif içeriği %0 'dan %0,5 'e çıkarıldığında P_u değerinde yaklaşık %28 değerinde bir artış görülmektedir. Çelik lif içeriği %1'e çıkarıldığında %0 lif içeriğine kıyasla %5 artış ve %0,5 lif içeriğine kıyasla %17 değerinde bir düşüş olduğu gözlemlenmiştir. Burada çelik lif içeriğinin %0,5'ten fazla kullanılmasının P_u değeri üzerinde beklenen performansı sağlamadığı görülmektedir. Boyuna donatı oranı yarıya indirilen ve aynı boyuna donatı oranına sahip K5-K6 kiriş çiftinde bakıldığında ise çelik lif içeriğinin %0,5 'ten %1 'e çıkarılmasıyla P_u değerinde %24 'lük bir düşüş gözlemlenmiştir. Bununla beraber yine **Tablo 25**'den Δ_u değerlerine bakılarak karşılaştırılma yapılmıştır. K2-K3-K4 yüksek kiriş grubuna baktığımızda çelik lif içeriğinin %0 'dan %0,5 'e çıkarılmasıyla birlikte Δ_u değerinde yaklaşık %13 'lük bir artış gözlemlenmiştir. %1 çelik lif içeriğine sahip kirişte Δ_u değerinde %0 çelik lif içeriğine kıyasla çok az bir düşüş görülürken ve %0,5 çelik lif içeriğine kıyasla artış gözlemlenmiştir. K5-K6 kiriş çiftine baktığımızda ise artan lif içeriğiyle birlikte Δ_u değerinde de yaklaşık iki katı bir artış gözlemlenmiştir.

Tablo 27. Çelik Lif Oranının Nihai Yük Üzerindeki Etkisinin Karşılaştırılması

a/d		P_u^* (MPa)	Δ_u (mm)		P_u^{**} (MPa)	Δ_u (mm)	P_u^*/P_u^{**}
0,75	K2	118,93	7,58	K3	151,54	6,62	0,78
	K3	151,54	6,62	K4	124,88	7,35	1,21
	K5	140,73	6,87	K6	106,92	13,42	1,32
1,5	K8	109,61	7,43	K9	82,11	6,14	1,33
	K9	82,11	6,14	K10	104,64	7,81	0,78
	K11	61,92	6,44	K12	115,73	9,43	0,54

Çelik lif katkısını enerji sönümleme kapasitesi üzerindeki etkisini incelemek amacıyla **Tablo 26** 'ya baktığımızda a/d oranı 0,75 olan kiriş grubunda aynı boyuna donatı oranına sahip

kiriş grubu K2-K3-K4 karşılaştırılmıştır. Bu kiriş grubunda çelik lif içeriği %0 ‘dan %0,5 ‘e çıkarıldığında E değerinde oldukça az bir düşüş gözlemlenirken, çelik lif içeriği %1’e çıkarıldığında artış olduğu gözlemlenmiştir. Boyuna donatı oranı yarıya indirilen ve aynı boyuna donatı oranına sahip K5-K6 kiriş çiftinde bakıldığında ise çelik lif içeriğinin %1 ‘e çıkarılmasıyla E değerinde %28 ‘lik bir artış gözlemlenmiştir.

Tablo 28. Çelik Lif Oranının Enerji Sönümleme Kapasitesi Üzerindeki Etkisinin Karşılaştırılması

a/d		E* (kN.mm)		E** (kN.mm)	E*/ E**
0,75	K2	867,01	K3	834,65	1,04
	K3	834,65	K4	932,13	0,90
	K5	997,73	K6	1281,12	0,78
1,5	K8	850,21	K9	489,08	1,74
	K9	489,08	K10	826,89	0,59
	K11	411,55	K12	1099,93	0,37

Yüksek a/d Oranında Çelik Lif Katkısının Kesme Dayanımına Etkisi

Çelik lif katkısını kritik yük üzerindeki etkisini incelemek amacıyla **Tablo 22** ‘e baktığımızda a/d oranı 1,5 olan kiriş grubunda aynı boyuna donatı oranına sahip kiriş grubu K8-K9-K10 karşılaştırılmıştır. Bu kiriş grubunda çelik lif içeriği %0 ‘dan %0,5 ‘e çıkarıldığında P_{cr} değerinde yaklaşık %32 değerinde bir düşüş görülmektedir. Çelik lif içeriği %1’e çıkarıldığında %0 lif içeriğine kıyasla %5 düşüş ve %0,5 lif içeriğine kıyasla %39 değerinde bir artış olduğu gözlemlenmiştir. Burada çelik lif içeriğinin %0,5 kullanılmasının P_{cr} değeri üzerinde beklenen performansı sağlamadığı görülürken %1 çelik lif takviyesi performansa olumlu yönde etki etmiştir. Boyuna donatı oranı yarıya indirilen ve aynı boyuna donatı oranına sahip K11-K12 kiriş çiftinde bakıldığında ise çelik lif içeriğinin %0,5 ‘ten %1 ‘e çıkarılmasıyla P_{cr} değerinde %86 ‘lık bir artış gözlemlenmiştir. Bununla beraber yine **Tablo 22**’den Δ_u değerlerine bakılarak karşılaştırılma yapılmıştır. K8-K9-K10 yüksek kiriş grubuna baktığımızda çelik lif içeriğinin %0 ‘dan %0,5 ‘e çıkarılmasıyla birlikte Δ_u değerinde bir artış gözlemlenirken. %1 çelik lif içeriğine sahip kirişte Δ_u değeri %0,5 lif içeriğiyle aynı etkiyi gösterdiği görülmektedir. K11-K12 kiriş çiftine baktığımızda ise artan lif içeriğiyle birlikte Δ_u değerinde de yaklaşık %68 ‘lik bir artış gözlemlenmiştir.

Çelik lif katkısını akma yükü üzerindeki etkisini incelemek amacıyla **Tablo 23** ‘e baktığımızda a/d oranı 1,5 olan kiriş grubunda aynı boyuna donatı oranına sahip kiriş grubu K8-K9-K10 karşılaştırılmıştır. Yapılan bu karşılaştırmaya bakıldığında P_y yaşanan artış ve azalışlar P_{cr} ile benzer şekilde gözlemlenmiştir. Boyuna donatı oranı yarıya indirilen ve aynı

boyuna donatı oranına sahip K11-K12 kiriş çiftinde bakıldığında ise çelik lif içeriğinin %0,5 ‘ten %1 ‘e çıkarılmasıyla yine P_{cr} değerine benzer bir şekilde artış gözlemlenmiştir. Bununla beraber yine **Tablo 22**’den Δ_y değerlerine bakılarak karşılaştırılma yapılmıştır. K8-K9-K10 yüksek kiriş grubuna baktığımızda çelik lif içeriğinin %0 ‘dan %0,5 ‘e çıkarılmasıyla birlikte Δ_y değerinde bir azalış gözlemlenirken. %1 çelik lif içeriğine sahip kirişte Δ_y değerinde artış görülmektedir. K11-K12 kiriş çiftine baktığımızda ise artan lif içeriğiyle birlikte Δ_y değerinde de yaklaşık %75 ‘lik bir artış gözlemlenmiştir.

Çelik lif katkısını maksimum yük üzerindeki etkisini incelemek amacıyla **Tablo 24** ‘e baktığımızda a/d oranı 1,5 olan kiriş grubunda aynı boyuna donatı oranına sahip kiriş grubu K8-K9-K10 karşılaştırılmıştır. Yapılan bu karşılaştırmaya bakıldığında P_{max} yaşanan artış ve azalışlar yine aynı şekilde P_{cr} ile benzer şekilde gözlemlenmiştir. Boyuna donatı oranı yarıya indirilen ve aynı boyuna donatı oranına sahip K11-K12 kiriş çiftinde bakıldığında ise çelik lif içeriğinin %0,5 ‘ten %1 ‘e çıkarılmasıyla yine P_{cr} değerine benzer bir şekilde artış gözlemlenmiştir. Bununla beraber yine **Tablo 24**’den Δ_{max} değerlerine bakılarak karşılaştırılma yapılmıştır. K8-K9-K10 yüksek kiriş grubuna baktığımızda çelik lif içeriğinin artmasıyla birlikte Δ_{max} değerinde artış gözlemlenmektedir. K11-K12 kiriş çiftinde de aynı şekilde artan lif içeriğiyle birlikte Δ_{max} değerinde de artış gözlemlenmiştir.

Çelik lif katkısını nihai yük üzerindeki etkisini incelemek amacıyla **Tablo 25**’e baktığımızda a/d oranı 1,5 olan kiriş grubunda aynı kiriş grupları karşılaştırılmış ve P_u değerinde P_{max} değeriyle benzer değişimler gözlemlenmiştir. Bununla beraber yine **Tablo 24**’den Δ_u değerlerine bakılarak karşılaştırılma yapılmıştır. K8-K9-K10 yüksek kiriş grubuna baktığımızda çelik lif içeriğinin %0,5 kullanılmasıyla birlikte Δ_{max} değerinde azalış gözlemlenmiştir. %1 çelik lif içeriğinde ise artış görülmüştür. K11-K12 kiriş çiftinde de aynı şekilde artan lif içeriğiyle birlikte Δ_{max} değerinde de artış gözlemlenmiştir.

Son olarak 1,5 a/d orana sahip kirişlerde çelik lif katkısını enerji sönmüleme kapasitesi üzerindeki etkisini incelemek amacıyla **Tablo 26** ‘ya baktığımızda aynı boyuna donatı oranına sahip kiriş grubu K2-K3-K4 karşılaştırılmıştır. Bu kiriş grubunda çelik lif içeriği %0 ‘dan %0,5 ‘e çıkarıldığında E değerinde oldukça az bir düşüş gözlemlenirken, çelik lif içeriği %1’e çıkarıldığında artış olduğu gözlemlenmiştir. Boyuna donatı oranı yarıya indirilen ve aynı boyuna donatı oranına sahip K5-K6 kiriş çiftinde bakıldığında ise çelik lif içeriğinin %1 ‘e çıkarılmasıyla E değerinde %167 ‘lik bir artış gözlemlenmiştir.

Tablo 22, 23, 24 ve 25 birlikte değerlendirildiğinde, çelik lif oranının yük basamakları (P_{cr} , P_y , P_{max} ve P_u) üzerindeki etkisinin, a/d oranı ve boyuna donatı ile güçlü etkileşim içinde olduğu görülmektedir. Derin kiriş numunelerinde (a/d=0,75; 4Ø10) %0,5 lif, lifsize göre tüm

yük basamaklarında belirgin artış sağlamıştır (K2→K3: $P_{cr} \approx +\%41$, $P_y \approx +\%40$, $P_{max} \approx +\%28$, $P_u \approx +\%28$). Ancak lif oranının %1'e yükseltilmesi, %0,5'e kıyasla kapasiteyi düşürmüştür (K3→K4: $P_{cr}/P_y/P_{max}/P_u$ 'da $\approx\%16-22$ azalma). Boyuna donatı oranının azaldığı durumlarda (2Ø10) bu eğilim daha belirgindir. K5→K6 geçişinde $P_{cr} \approx -\%38$, $P_y \approx -\%19$, $P_{max}/P_u \approx -\%24$; yani yük kapasitesi azalmaktadır. $a/d=1,50$ olan numunelerde ise tersine bir durum gözlemlenmektedir. 4Ø10 ile %0,5 lif oranı, çoğu yük basamağında lifsiz numunelere göre olumsuz sonuç vermiştir (K8→K9: $P_{cr}/P_y \approx -\%32$, $P_{max}/P_u \approx -\%25$). Lif oranının %1'e çıkarılması bu kaybı büyük ölçüde telafi etmiştir (K9→K10: $P_y \approx +\%40$, $P_{max} \approx +\%27$, $P_u \approx +\%33$, $P_{cr} \approx +\%39$). $a/d=0,75$ olan numunelerde yük taşıma kapasitenin “*strut-tie*/kemerleşme” ile taşındığını ve burada aşırı lif dozajının (işlenebilirlik, topaklanma, *strut* sürekliliğinin bozulması) zararlı olabildiğini; buna karşılık $a/d=1,50$ olan numunelerde ise çatlak dağılımının eğilme-dominant hale gelmesiyle yüksek lif hacminin çekme bölgesinde köprülemeyi güçlendirerek akma/tepe/nihai yükleri toparladığını göstermektedir. Tasarım açısından: derin kiriş numunelerinde %0,5 lif + yeterli boyuna donatı en ideal kapasite kombinasyonunu verirken, düşük boyuna donatıda %1 lif daha etkili olduğu görülmektedir. Ancak her iki durumda da lif oranı–işlenebilirlik–çatlak dağılımı üçgeni birlikte optimize edilmelidir.

Deneyisel çalışmadan elde edilen bulgular neticesinde geopolimer betonlu betonarme derin kirişlerde çelik lif kullanılması yük taşıma kapasitesini arttırmıştır. Literatürde de derin kirişlerde çelik lif kullanılmasının yük taşıma kapasitesi üzerinde olumlu bir etkisinin olduğu çalışmalara rastlanılmıştır. Zhao *et al.* (2018) yürütmüş olduğu deneyisel çalışma sonucunda derin kirişlerde çelik lif kullanılmasının yük taşıma kapasitesini arttırdığını belirtmişlerdir. Sunulan bu çalışmada da çelik lif kullanılmasının derin kirişlerin yük taşıma kapasitesi üzerinde benzer bir etkiye neden olduğu görülmektedir. Sagi *et al.* (2022) de mikro çelik lif kullanılmasının betonarme derin kirişlerin ilk çatlak yükü, akma yükü, yük taşıma kapasitesi ve düktilite parametrelerini arttırdığını belirtmişlerdir. Yine aynı çalışmada da %1'in üzerinde çelik lif kullanılmasının derin kirişlerin performansını önemli ölçüde etkilemediğini de ayrıca belirtmişlerdir. Sunulan bu çalışmada da çelik lif oranı maksimum %1 oranında kullanılmıştır. Hatta çelik lif oranının %0,5 üzerine çıkması yük taşıma kapasitesi üzerinde olumsuz bir etkiye neden olmuştur. Dang *et al.* (2021) de derin kirişlerde çelik lif kullanılmasının %55 oranına kadar yük taşıma kapasitesini arttırmakla birlikte kesme çatlağı genişliğini ve orta nokta deplasmanını sırasıyla %68 ve %57 oranında azalttığını belirtmişlerdir.

Boyuna Donatı Oranının Kesme Dayanımına Etkisi

Boyuna donatı oranının kritik yük, akma yükü, maksimum yük ve nihai yük ve bu yüklere karşı gelen deplasman değerleri üzerindeki etkisi **Tablo 27, Tablo 28, Tablo 29 ve Tablo 30**'de gösterilmiştir.

Tablo 29. Boyuna Donatı Oranının Kritik Yük Üzerindeki Etkisinin Karşılaştırılması

a/d		P_{cr}^* (MPa)	Δ_{cr} (mm)		P_{cr}^{**} (MPa)	Δ_{cr} (mm)	P_{cr}^* / P_{cr}^{**}
0,75	K3	113,10	2,08	K5	105,32	0,80	1,07
	K4	95,23	1,02	K6	65,25	3,17	1,46
1,5	K9	56,36	1,07	K11	46,42	0,77	1,21
	K10	78,55	1,06	K12	86,53	1,29	0,91

Tablo 27'deki elde edilen sonuçlar incelendiğinde, boyuna donatı oranının kritik kesme dayanımı üzerinde doğrudan belirleyici bir etkiye sahip olduğu görülmektedir. Boyuna donatı oranı yüksek olan numunelerde (K3, K4, K9) kritik kesme gerilmelerinin, donatı oranının yarıya düşürüldüğü numunelere (K5, K6, K11) yüksek çıktığı tespit edilmiştir. Örneğin, a/d oranı 0,75 olan K3-K5 numuneleri karşılaştırıldığında K3 kirişi 113,10 MPa kritik kesme dayanımına sahipken, donatı oranı yarıya indirilen K5 numunesinde bu yük değeri 105,32 MPa seviyesine düşmüştür bu da %7'lik bir düşüş yaşandığı anlamına gelmektedir. K4-K6 kiriş çiftine baktığımızda da kritik yük değerinde %32 düşüş gözlemlenmiştir. Benzer şekilde, a/d oranı 1,50 olan K9-K11 kiriş çiftine bakıldığında, K9 yüksek kirişi 56,36 MPa kritik kesme gerilmesine sahipken bu değer K11 kirişinde 46,42 MPa değerine gerilemiştir yani %17'lik bir düşüş yaşanmıştır. K10-K12 kiriş çiftine baktığımızda ise a/d oranı 1,5 olan bu kirişlerde %10'luk bir artış gözlemlenmiştir. Burada yaşanan artış yarıya indirilen boyuna donatı oranı etkisinin %1 oranında kullanılan çelik lif katkısıyla birlikte tolere edildiğini göstermektedir.

Tablo 30. Boyuna Donatı Oranının Akma Yükü Üzerindeki Etkisinin Karşılaştırılması

a/d		P_y^* (MPa)	Δ_y (mm)		P_y^{**} (MPa)	Δ_y (mm)	P_y^* / P_y^{**}
0,75	K3	179,58	2,89	K5	162,15	1,63	1,11
	K4	147,76	1,86	K6	131,89	5,05	1,12
1,5	K9	89,08	1,61	K11	71,32	1,51	1,25
	K10	124,82	2,01	K12	141,13	2,66	0,88

Tablo 28'deki elde edilen sonuçlar incelendiğinde, boyuna donatı oranı akma yükleri üzerinde doğrudan etkili olduğu görülmektedir. Yüksek donatılı numunelerde (K3, K4, K9 ve K10) daha yüksek akma yükü değerleri elde edilmiştir. Örneğin, K3 numunesinde 179,58 MPa

olarak ölçülen akma yükü, donatı oranının yarıya düşürüldüğü K5 numunesinde 162,15 MPa'a gerilemiş yani %9 düşüş yaşanmıştır. Benzer şekilde, K4-K6 kiriş çiftine baktığımızda %10'luk düşüş yaşanmıştır. a/d oranı 1,5 olan K9-K11 kiriş çiftine bakıldığında da %19 oranında düşüş yaşandığı görülmektedir. Yine Tablo 27'deki kritik yük değerine benzer şekilde K10-K12 kiriş çiftinde %13 oranında artış yaşandığı görülmektedir. Bu da yine benzer şekilde a/d oranı 1,5 olan kirişlerde %1 çelik lif katkısının boyuna donatı oranındaki düşüşü tolere ettiğini göstermektedir.

Tablo 31. Boyuna Donatı Oranının Maksimum Yük Üzerindeki Etkisinin Karşılaştırılması

a/d		P_{maks}^* (MPa)	Δ_{maks} (mm)		P_{maks}^{**} (MPa)	Δ_{maks} (mm)	P_{maks}^*/P_{maks}^{**}
0,75	K3	189,43	3,39	K5	175,92	2,88	1,08
	K4	158,72	2,49	K6	133,66	6,38	1,19
1,5	K9	102,82	2,57	K11	77,59	2,71	1,33
	K10	130,91	3,10	K12	144,22	3,74	0,91

Tablo 29'daki elde edilen sonuçları incelendiğinde, maksimum yük taşıma kapasitelerinin boyuna donatı oranına doğrudan bağlı olarak değiştiği görülmektedir. Yüksek donatılı numuneler (K3, K4, K9) daha yüksek maksimum yük değerlerine ulaşırken, donatı oranı yarıya düşürülen numunelerde (K5, K6, K11) belirgin düşüşler kaydedilmiştir. K3-K5 kiriş çiftine bakıldığında %7, K4-K6 ve K9-K11 kiriş çiftlerine bakıldığında ise yaklaşık %15 oranında bir düşüş gözlemlenmiştir. Bununla birlikte a/d oranı 1,5 olan K10-K12 çiftinde çelik lif katkısının maksimum yük kapasitesi üzerinde iyileştirici bir rol oynadığı görülmektedir. %1 çelik lif katkısı içeren bu kiriş çiftinde %10 oranında artış yaşanmıştır.

Tablo 32. Boyuna Donatı Oranının Nihai Yük Üzerindeki Etkisinin Karşılaştırılması

a/d		P_u^* (MPa)	Δ_u (mm)		P_u^{**} (MPa)	Δ_u (mm)	P_u^*/P_u^{**}
0,75	K3	151,54	6,62	K5	140,73	6,87	1,08
	K4	124,88	7,35	K6	106,92	13,42	1,17
1,5	K9	82,11	6,14	K11	61,92	6,44	1,33
	K10	104,64	7,81	K12	115,73	9,43	0,90

Tablo 30'daki elde edilen sonuçları incelendiğinde, nihai yük taşıma kapasitelerinin boyuna donatı oranına doğrudan bağlı olarak değiştiği görülmektedir. Yüksek donatılı numuneler (K3, K4, K9) daha yüksek maksimum yük değerlerine ulaşırken, donatı oranı yarıya düşürülen numunelerde (K5, K6, K11) belirgin düşüşler kaydedilmiştir. K3-K5 kiriş çiftine bakıldığında %7, K4-K6 kiriş çiftine bakıldığında %15 ve K9-K11 kiriş çiftine bakıldığında ise

yaklaşık %20 oranında bir düşüş gözlemlenmiştir. Bununla birlikte a/d oranı 1,5 olan K10-K12 çiftinde çelik lif katkısının maksimum yük kapasitesi üzerinde iyileştirici bir rol oynadığı görülmektedir. %1 çelik lif katkısı içeren bu kiriş çiftinde %10 oranında artış yaşanmıştır.

Tablolar 27, 28, 29 ve 30 birlikte değerlendirildiğinde, boyuna donatı oranının etkisini hem a/d oranı 0,75 hem de 1,5 olan numunelerde gözlemlenmiştir. a/d oranı 0,75 olan numunelerde, boyuna donatı miktarının artırılması; çatlama anından tepe ve nihai kapasiteye kadar tüm yük kademelerinde daha güvenli, rijit ve yüksek taşıma kapasiteli bir davranışa neden olmuştur. Bu sonuç, kemerleşme (*strut-and-tie*) mekanizmasında çekme bölgelerinin sürekliliğinin ve ankraj koşullarının güçlenmesiyle, eğik çatlak açıklıklarının daha etkin kontrol edilmesine dayanmaktadır. a/d oranı 1,50 olan numunelerde ise boyuna donatı etkisi lif hacmiyle eşzamanlı değerlendirilmelidir. Lif içeriğinin görece düşük olduğu konfigürasyonlarda, daha yüksek boyuna donatı yine tüm yük basamaklarında belirgin bir üstünlük sağlamıştır. Çünkü eğilme kontrolü baskın hale geldikçe çekme bölgesindeki donatının çatlak açılmalarını sınırlayıcı etkisi ön plana çıkmaktadır. Buna karşılık, lif hacminin yükseldiği düzenlerde lif-matris köprülemesi ve çekip-çıkarma (pull-out) enerjisi, donatıyla etkileşime girerek kırılma sonrası taşımanın biçimini belirler; bu durumda boyuna donatının gereğinden fazla artırılması, liflerin etkin devreye girişini yer yer sınırlayabileceğinden, kapasite artışı her konfigürasyonda aynı ölçüde yansımayabilir. Dolayısıyla hedef performansa (kapasite, süneklik, artık taşıma/enerji) göre boyuna donatı ile lif dozunun birlikte optimize edilmesi gerekmektedir. a/d'nin küçük olduğu derin kirişlerde boyuna donatı artışı en tutarlı kapasite kazanımlarını sağlarken, a/d oranının artması optimum çözüm, lif katkısı ile donatı miktarının dengeli eşleştirilmesine dayanır. Deneysel çalışmada derin kirişlerin yük taşıma kapasitesini etkileyen en önemli parametrelerden birinin de boyuna donatı oranıdır. Deneysel çalışmada da ulaşılan bulgular, boyuna donatı oranının azaltılmasının yük taşıma kapasitesi üzerinde önemli bir etkisinin olduğunu göstermektedir. Dutta *et al.* (2022), Shyamala (2022) ve Kadhim and Abdullah (2024) de boyuna donatı oranının azaltılmasının yük taşıma kapasitesini azalttığını belirtmişlerdir. Li *et al.* (2022) de boyuna donatı oranının %0,67'den %1,27'ye arttırılmasının yük taşıma kapasitesini %45 oranında arttırdığını belirtmişlerdir.

Boyuna donatı oranının enerji sönümleme kapasitesi üzerindeki etkisi **Tablo 31**'de gösterilmiştir.

Tablo 33. Boyuna Donatı Oranının Enerji Sönümleme Kapasitesi Üzerindeki Etkisinin Karşılaştırılması

a/d		E* (kN.mm)		E** (kN.mm)	E*/ E**
0,75	K3	867,01	K5	932,13	0,93
	K4	834,65	K6	997,73	0,84
1,5	K9	489,08	K11	411,55	1,19
	K10	826,89	K12	1099,93	0,75

Tablo 31'daki sonuçlar incelendiğinde, boyuna donatı oranının enerji sönümleme kapasitesi üzerindeki farklı etkilerini ortaya koymaktadır. a/d oranı 0,75 olan kiriş çiftlerine baktığımızda, boyuna donatı oranının azalması ile birlikte enerji sönümleme kapasitesinde K3-K5 kiriş çiftinde %8 ve K4-K6 kiriş çiftinde %20 oranında artış yaşandığı görülmektedir. a/d oranı 1,5 olan kiriş çiftlerine baktığımızda ise boyuna donatı oranının azalmasıyla K9-K11 kirişinde %16 düşüş ve K10-K12 kirişinde %33 artış yaşandığı görülmektedir.

Donatı ve Betondaki Şekil Değiştirmelerin Karşılaştırılması

a/d oranının donatı ve betondaki şekil değiştirmelere etkisi

Tez çalışması kapsamında üretilen 12 adet yüksek kirişe ait şekil değiştirme değerleri **Tablo 32**'de verilmiştir. Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde verilen tüm şekillerde (**Şekil 61, Şekil 62, Şekil 63**) kirişlerdeki sıralamalar benzer şekildedir. Aynı donatı düzenine sahip kirişlere bakıldığında artan a/d oranıyla (0,75→1,5) birlikte kirişlerdeki şekil değiştirme değerlerinde düşüş olduğu görülmektedir. Gözlemlenen bu sonuç artan a/d oranının süneklik üzerinde olumsuz bir etki oluşturduğunu ve düşük a/d oranının yüksek süneklik açısından daha tercih edilebilir olduğunu ortaya koymaktadır.

Çelik Lif Katkısının Şekil Değiştirmeye Etkisi

Düşük a/d oranında çelik lif katkısının şekil değiştirmeye etkisi

a/d oranı 0,75 olan kiriş grubuna ait sonuçlar incelendiğinde %0 'dan %0,5 'e çıkan lif oranıyla birlikte şekil değiştirme değerlerinde artış gözlemlenmiştir. Devamında çelik lif oranının %1 e çıkarılmasıyla birlikte %0,5 katkılı numunelere göre düşüş gözlenirken katkısız numunelere göre az da olsa bir artış gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar genel olarak değerlendirildiğinde düşük a/d oranında çelik lif katkısının %0,5 oranında kullanılması en yüksek şekil değiştirme değerlerini verirken çelik lif katkısının %1'e çıkarılması beklenen etkiyi göstermemiştir. Bu düşüş yüksek lif hacminde (%1) işlenebilirlik/yerleşme ve lif topaklanması (balling) gibi sorunlar meydana geldiğine işaretir.

Yüksek a/d oranında çelik lif katkısının şekil değiştirmeye etkisi

a/d oranı 1,5 olan kiriş grubuna ait sonuçlar incelendiğinde %0 ‘dan %0,5 ‘e çıkan lif oranıyla birlikte şekil değiştirme değerlerinde düşüş gözlemlenmiştir. Devamında çelik lif oranının %1’e çıkarılmasıyla şekil değiştirme değerlerinde katkısız numunelere göre düşüş gözlenirken %0,5 oranında lif içeriğine sahip kirişlere göre artış gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar genel olarak değerlendirildiğinde yüksek a/d oranında çelik lif katkısının etkinliğinin belirli bir eşik değerine ulaştığında ortaya çıktığını, yeterli lif oranıyla birlikte çatlak ilerlemesinin daha etkin şekilde sınırlandığını ve betonarme elemanın sünekliğinin arttığını ortaya koymaktadır. Dolayısıyla K8–K9-K10 kiriş grubundaki karşılaştırma, çelik lif katkısının etkisinin doğrusal olmadığını, düşük oranlarda yetersiz kalabileceğini, ancak uygun miktarda kullanıldığında süneklik kapasitesini iyileştirdiğini göstermektedir.

Boyuna Donatı Oranının Şekil Değiştirmeye Etkisi

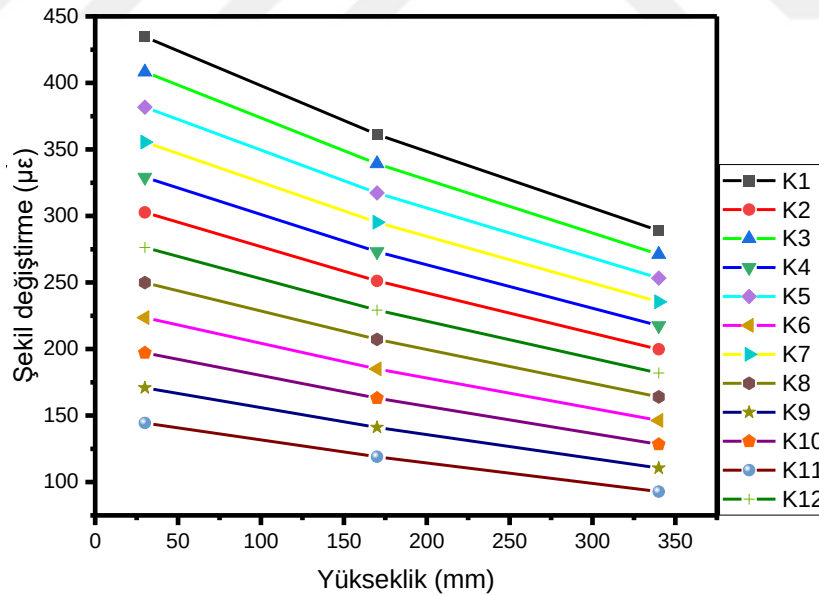
Boyuna donatı miktarı, deney numuneleri arasında şekil değiştirme davranışını belirgin biçimde etkileyen temel parametrelerden biridir. a/d oranı 0,75 olan kiriş grubuna ait sonuçlar incelendiğinde aynı çelik lif oranlarına sahip kirişlerde azalan boyuna donatı oranıyla birlikte yer değiştirme değerlerinde düşüş yaşanmıştır. Bu sonuç değerlendirildiğinde yüksek boyuna donatı oranının sünekliği artırdığı görülmektedir.

a/d oranı 1,5 olan kiriş grubuna bakıldığında ise çelik lif katkısı düşük olan kirişlerde boyuna donatı oranının azaltılması sünekliği azaltırken çelik lif katkısı yüksek olan kirişlerde boyuna donatı oranının azaltılması ile birlikte süneklik artırmaktadır. Deney sonuçları, boyuna donatı oranı ile çelik lif katkısının süneklik üzerindeki etkisinin a/d oranına bağlı olarak farklılaştığını göstermektedir. a/d oranı 0,75 olan kirişlerde boyuna donatı oranı azaldığında şekil değiştirme kapasitesi genel olarak düşmüş; bu durum, düşük kesme açıklığına sahip numunelerde sünek davranışın esasen boyuna donatıya bağlı olduğunu ortaya koymuştur. Buna karşılık a/d oranı 1,50 olan kirişlerde lif katkısı belirleyici bir rol üstlenmiştir. Özellikle %1 lif içeren numunelerde (K10-K12), boyuna donatı oranının azalmasına rağmen şekil değiştirme değerlerinin arttığı gözlenmiştir. Bu bulgu, yüksek çelik lif oranının çatlak köprüleme mekanizmasını daha etkin hale getirdiğini ve liflerin matris içinde daha homojen dağılmasıyla yük aktarımını sürekli kıldığını göstermektedir. Böylece, daha büyük a/d oranına sahip kirişlerde boyuna donatı oranının azalması sünekliği düşürmemiş, aksine lif katkısının baskın etkisiyle şekil değiştirme kapasitesi artmıştır. Sonuç olarak, boyuna donatı oranının artması kirişlerin şekil değiştirme kapasitesini artırma eğilimindeyken, azalan boyuna donatı oranı ile yüksek a/d oranına sahip ve çelik lif katkısı bulunan kirişlerde liflerin etkin çatlak köprüleme mekanizması sayesinde bu eğilim tersine dönebilmekte ve donatı oranının azalmasına rağmen

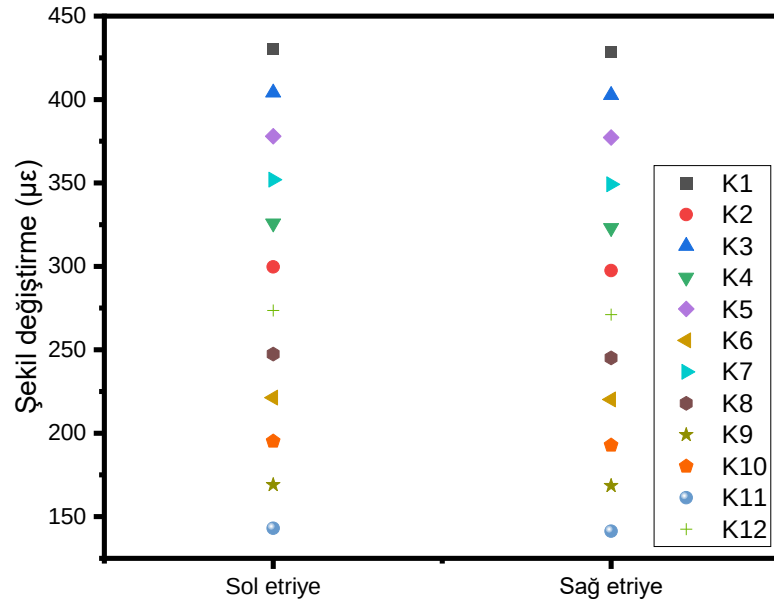
süneklik korunmakta hatta artırılabilir. Buradan artan a/d oranıyla birlikte süneklik davranışının yalnızca boyuna donatı oranına bağlı olmadığı, çelik lif içeriği ile boyuna donatı oranının birlikte değerlendirilmesi gereken etkileşimli parametreler olduğu görülmüştür.

Tablo 34. Deney Numunelerinin Şekil Değiştirme Değerleri ($\mu\epsilon$)

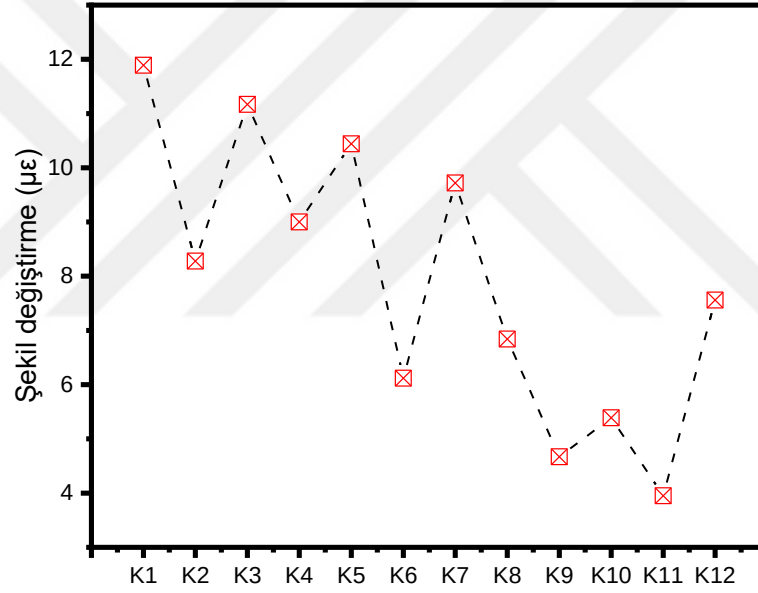
	Boyuna donatı			Etriye		Beton
	Alt	Orta	Üst	Sol etriye	Sağ etriye	Üst
K1	434,6	361,3	289,0	430,3	428,5	11,89
K2	302,7	251,2	199,8	299,7	297,5	8,28
K3	408,2	339,3	271,2	404,1	402,6	11,17
K4	329,1	273,2	217,6	325,8	323,1	9,0
K5	381,8	317,3	253,3	378,0	377,2	10,44
K6	223,6	185,1	146,3	221,3	220,2	6,12
K7	355,5	295,2	235,5	351,9	349,2	9,72
K8	249,9	207,2	164,1	247,4	245,1	6,84
K9	170,8	141,1	110,6	169,1	168,5	4,67
K10	197,2	163,1	128,4	195,2	192,8	5,39
K11	144,4	119,1	92,8	143,0	141,3	3,95
K12	276,3	229,2	182,0	273,6	271,1	7,56



Şekil 67. Boyuna donatılardaki şekil değıştirmelerin karşılaştırması



Şekil 68. Etriyelerdeki şekil değiştirmelerin karşılaştırması



Şekil 69. Beton yüzeyindeki şekil değiştirmelerin karşılaştırması

SONUÇ

Bu yüksek lisans tezinde, çelik lif katkılı geopolimer betondan üretilen yüksek kirişlerin kesme davranışları, deneysel yöntemlerle incelenmiştir. Çalışmada, kesme açıklığı/derinlik (a/d) oranı, çelik lif katkısı, boyuna donatı oranı ve enine donatı varlığının kesme dayanımına etkileri araştırılmıştır. Hazırlanan tüm beton karışımlarında bağlayıcı olarak yüksek fırın cürufu ve metakaolin kullanılmıştır. Bunun yanı sıra atık mermer tozu, kuvars, ince ve iri agrega malzemeleri kullanılmıştır. Geopolimer aktifleşme işlemi için sodyum silikat ve sodyum hidroksit çözeltileri aktivatör olarak kullanılmıştır. Bu kapsamda, çelik lif katkısı %0, %0,5 ve %1 farklı oranlarda dahil edilmiş ve elde edilen kirişlerde boyuna donatı oranı ile etriye varlığı dikkate alınarak karşılaştırmalı değerlendirmeler yapılmıştır. Deneysel çalışmalar üç noktalı eğilme testi ile gerçekleştirilmiş ve kirişlerin kesme davranışları bu yükleme koşulları altında incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara ve gelecekteki çalışmalar için önerilere bu kısımda yer verilmiştir.

- K1 kirişi tüm kirişler arasında en iyi performansı gösteren kiriş olmuştur. Buradan düşük a/d oranında etriye varlığının yük taşıma kapasitesi ve sünekliği artırdığı sonucuna varılmıştır. Etriyersiz K11 kirişi tüm kirişler arasında en kötü performansı gösteren kiriş olmuştur. K11 kirişinde düşük boyuna donatı oranı ve düşük lif içeriği kullanılması bu spnuca sebep olmuştur.
- Tüm kirişlerde maksimum yükten sonra yük taşıma kapasitesinde düşüş olmasına rağmen deplasman artmaya devam etmiş, bu durum sünek davranışın ve plastik deformasyonun varlığını göstermiştir.
- İncelenen tüm yüksek kirişlerin göçme modu, belirgin şekilde kesme göçmesi olarak gerçekleşmiştir. Bu durum, çatlak oluşumlarının yükleme noktalarından mesnetlere doğru eğimli biçimde ilerlemesiyle doğrulanmıştır.
- Çoğu numunede hasar yalnızca çatlak bölgelerinde yoğunlaşırken, K1, K5, K6, K8, K9 ve K10'da yükleme noktası çevresinde ek hasarlar gözlenmiştir. Bu durum, kesme göçmesine ek olarak basınç bölgesinde gerilme yoğunlaşmasına bağlı ezilme işaret etmektedir.
- Genel olarak a/d oranı arttıkça ilk çatlama yükü düşmektedir. Bu durum, kesme çatlaklarının daha düşük yük seviyelerinde oluşmasına ve kesme kapasitesinin azalmasına yol açmaktadır. a/d oranının artması, aynı donatı düzeni ve lif içeriğine

sahip kirişlerde donatı akma yükünde belirgin bir azalmaya neden olmuştur. a/d oranı arttıkça maksimum yük taşıma kapasitesi çoğu durumda düşmüştür (K6–K12 hariç). Düşük a/d oranlı kirişler, daha yüksek kesme dayanımı ve kontrollü çatlak gelişimi sayesinde daha büyük yükler taşımaktadır. a/d oranı artışı, genellikle nihai yük değerinde düşüşe yol açmıştır. a/d oranı arttıkça enerji sönümleme kapasitesi çoğu durumda düşmüştür. Bu, sünekliğin azalmasına ve gevrek göçme riskinin artmasına yol açmaktadır. Düşük a/d oranları hem kesme kapasitesi hem de enerji tüketimi açısından daha avantajlı olduğu görülmektedir. Bu nedenle yüksek kesme kuvveti etkisindeki kirişlerde tercih edilmelidir.

- Çelik lif katkısı, çatlak oluşumunu geciktirerek, çatlak ilerlemesini yavaşlatarak ve sünekliği artırarak kirişlerin kesme davranışını olumlu yönde etkilemektedir. Ancak bu etkinin boyutu; a/d oranı, boyuna donatı oranı ve etriye varlığı gibi parametrelerle doğrudan ilişkilidir.
- Düşük a/d oranına sahip kirişlerde, etriye varlığı çelik lif katkısına kıyasla yük taşıma kapasitesi ve süneklik üzerinde daha yüksek katkı sağlamaktadır. Etriye yerine %0,5 çelik lif kullanıldığında yük taşıma kapasitesi artırılabilse de süneklik performansı etriye kadar etkili olmamaktadır.
- %0,5 çelik lif katkısının %1'e çıkarılması durumunda yük taşıma kapasitesinde ve süneklikte belirgin düşüşler gözlemlenmiştir. Lif oranındaki artış, beton matrisi içinde liflerin homojen dağılmasını zorlaştırarak topaklanma ve boşluk oluşumuna yol açmakta, böylece liflerin etkinliğini azaltmaktadır. Bu bulgu, çelik lif oranının optimum düzeyin üzerine çıkarılmasının yapısal performans üzerinde olumsuz etkiler ortaya çıkarabileceğini göstermektedir.
- Boyuna donatı oranının yarıya düşürülmesi yük değerlerinde değişen düşüşe yol açmıştır. Yer değiştirme kapasiteleri de benzer şekilde azalmıştır. Bu durum, boyuna donatının taşıma kapasitesi, rijitlik ve süneklik açısından kritik bir parametre olduğunu ortaya koymaktadır.
- Boyuna donatı oranı yarıya indirildiğinde, %1 çelik lif kullanımı yer değiştirme değerlerinde artış sağlasa da yük taşıma kapasitesindeki düşüşü tamamen telafi edememektedir. Bununla birlikte, düşük donatı oranında çelik liflerin daha homojen dağıldığı ve etkinliğinin arttığı gözlemlenmiştir.
- Çelik lif katkısının enerji sönümleme kapasitesine etkisi, donatı oranı ve a/d oranına bağlı olarak değişmektedir. Uygun çelik lif oranı ve homojen dağılım sağlandığında, özellikle düşük donatı oranına sahip kirişlerde enerji kapasitesinde %100'ün üzerinde artışlar elde edilebilmektedir.

- Çelik lif katkısının yapısal performansa katkısı, lif oranının optimum seviyede tutulması, boyuna donatı oranının yeterli düzeyde olması ve a/d oranının düşük seçilmesi ile en üst seviyeye çıkarılabilmektedir. Çelik lif oranının gereğinden fazla artırılması ya da donatı oranının aşırı azaltılması, beklenen performansı sağlamamaktadır. Dolayısıyla tasarımda düşük a/d için %0,5 lif + yeterli boyuna donatı, daha yüksek a/d veya düşük boyuna donatı oranı içinse %1 lif daha uygun görünmektedir. Genel olarak, lif oranı–işlenebilirlik–çatlak dağılımı dengesi birlikte gözetilerek optimum performans elde edilebilir.

Gelecekte yapılacak çalışmalarda, cam lif, polipropilen lif veya hibrit lifler gibi farklı lif tiplerinin geopolimer beton üzerindeki etkileri araştırılarak malzemenin mekanik ve dayanıklılık özellikleri daha kapsamlı biçimde değerlendirilebilir. Sadece tekil yükleme koşullarına bağlı testler değil, aynı zamanda dört noktalı eğilme deneyi veya tekrarlı yüklemeler (yorgunluk testleri) gibi farklı yükleme senaryoları uygulanarak geopolimer kirişlerin davranışının daha ayrıntılı şekilde anlaşılması sağlanabilir. Geopolimer betonun uzun vadeli yapısal performansının yanı sıra asit, sülfat veya donma-çözülme gibi çevresel koşullara karşı dayanımının deneysel olarak test edilmesi, malzemenin sürdürülebilirliği açısından önemli veriler sunacaktır. Çalışmada elde edilen bulgular, yüksek lif oranlarının (örneğin %1) bazı durumlarda topaklanmaya sebep olarak performansı olumsuz etkilediğini göstermektedir. Bu nedenle, farklı lif oranlarının optimum seviyelerinin belirlenmesine yönelik çalışmalar gelecekteki araştırmalar için önemli bir konu oluşturmaktadır.

KAYNAKLAR

- Abdila, S. R., Abdullah, M. M. A. B., Ahmad, R., Burduhos Nergis, D. D., Rahim, S. Z. A., Omar, M. F., ... & Syafwandi. (2022). Potential of soil stabilization using ground granulated blast furnace slag (GGBFS) and fly ash via geopolymerization method: A review. *Materials*, 15(1), 375.
- Abuwarda, A. M. I. (2019). Betonarme derin kirişlerin güçlendirilmesine ilişkin bazı önerilerin deneysel araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Adjei, S., Elkatatny, S., Aggrey, W. N., & Abdelraouf, Y. (2022). Geopolymer as the future oil-well cement: A review. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 208, 109485.
- Aisheh, Y. I. A., Atrushi, D. S., Akeed, M. H., Qaidi, S., & Tayeh, B. A. (2022). Influence of steel fibers and microsilica on the mechanical properties of ultra-high-performance geopolymer concrete (UHP-GPC). *Case Studies in Construction Materials*, 17, e01245.
- Aisheh, Y. I. A., Atrushi, D. S., Akeed, M. H., Qaidi, S., & Tayeh, B. A. (2022). Influence of polypropylene and steel fibers on the mechanical properties of ultra-high-performance fiber-reinforced geopolymer concrete. *Case Studies in Construction Materials*, 17, e01234.
- Akkaya, H. C. (2023). *Betonarme derin kirişlerin farklı lifli polimerlerle kesmeye karşı güçlendirilmesi*. Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Albidah, A. S. (2023). Shear behaviour of metakaolin-fly ash based geopolymer concrete deep beams. *Engineering Structures*, 275, 115271.
- Al-Issawi, A. S. H., & Kamonna, H. H. (2020). Experimental study of RC deep beams strengthened by NSM steel bars. *Materials Today: Proceedings*, 20, 540-547.
- Almutairi, A.L., Tayeh, B.A., Adesina, A., Isleem, H.F., Zeyad, A.M., 2021. Potential applications of geopolymer concrete in construction: A review. *Case Studies in Construction Materials*, 15, e00733.
- Alqarni, A. S., Albidah, A. S., & Abadel, A. A. (2022). Shear performance of reinforced concrete deep beams using different coarse aggregates under the effect of elevated temperatures. *Case Studies in Construction Materials*, 16, e01087.
- Arslan, S., Öz, A., Benli, A., Bayrak, B., Kaplan, G. ve Aydın, AC (2024). Cüruf/uçucu kül bazlı kendiliğinden yerleşen jeopolimer kompozitlerde silis dumanı ve metakaolinin sürdürülebilir kullanımı: Taze, fiziko-mekanik ve dayanıklılık özellikleri. *Sürdürülebilir Kimya ve Eczacılık*, 38, 101512.
- ASTM, ASTM-C-618 Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use, Annu, West Conshohocken PA, (2012)
- Aygörmez, Y., Canpolat, O., Al-mashhadani, M. M., Uysal, M., 2020. Elevated temperature, freezing-thawing and wetting-drying effects on polypropylene fiber reinforced metakaolin based geopolymer composites. *Construction and Building Materials*. 235, 117502
- Bellum, R. R. (2022). Influence of steel and PP fibers on mechanical and microstructural properties of fly ash-GGBFS based geopolymer composites. *Ceramics International*,

- Birincioğlu, M. İ. (2022). Çelik lifli betonarme yüksek kirişlerde kesme davranışının incelenmesi. Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi.
- Chen, K., Wu, D., Xia, L., Cai, Q., & Zhang, Z. (2021). Geopolymer concrete durability subjected to aggressive environments—A review of influence factors and comparison with ordinary Portland cement. *Construction and Building Materials*, 279, 122496.
- Collins, M. P., Kuchma, D. (1999). “How Safe Are Our Large, Lightly-Reinforced Concrete Beams, Slabs and Footings?” *ACI Structural Journal*, 96(4), pp. 482-490.
- Cong, P., & Cheng, Y. (2021). Advances in geopolymer materials: A comprehensive review. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 8(3), 283-314.
- da Silva, A. C. R., Almeida, B. M., Lucas, M. M., Candido, V. S., da Cruz, K. S. P., Oliveira, M. S., ... & Monteiro, S. N. (2022). Fatigue behavior of steel fiber reinforced geopolymer concrete. *Case Studies in Construction Materials*, 16, e00829.
- Dang, T. D., Tran, D. T., Nguyen-Minh, L., & Nassif, A. Y. (2021, October). Shear resistant capacity of steel fibers reinforced concrete deep beams: An experimental investigation and a new prediction model. In *Structures* (Vol. 33, pp. 2284-2300). Elsevier.
- Davidovits, J. (1994). Geopolymers: Man-Made Rock Geosynthesis and The Resulting Development of Very Early High Strength Cement. *Journal of Materials Education*, 16, 91-91.
- Davidovits, J. (1999). Chemistry of Geopolymeric Systems, Terminology. Geopolymere '99 International Conference, Saint-Quentin, France, 30 June - 2 July 1999.
- Davidovits, J. 1988. Soft Mineralogy and Geopolymers. Proceedings of the of Geopolymer 88 International Conference, the Université de Technologie, Compiègne, France, 1-3 June 1988.
- Davidovits, J., 1991. Geopolymers. *Journal of thermal analysis*. 37(8): p. 1633-1656.
- Davidovits, J., 1994. Properties of Geopolymer Cements, Published in Proceedings. First International Conference on Alkaline Cements and Concretes ,Scientific Research Institute on Binders and Materials, Kiev State Technical University, Kiev, Ukraine, 131-149.
- Davidovits, J., 2002. 30 Years of successes and failures in geopolymer applications. Market trends and potential breakthroughs, in Geopolymer. Conference, Melbourne, Australia.
- Davidovits, J., 2011. Geopolymer Chemistry and Applications. 3. dü. Saint-Quentin: Institut Géopolymère.
- Davidovits, J., 2020. Geopolymer Chemistry and applications, 5th edition, Institut Géopolymère, Saint Quantin, France.
- Demir, A. (2018). *Betonarme yüksek kirişlerde kesme çatlağının artık yük taşıma kapasitesine etkisinin incelenmesi* (Doctoral dissertation, Sakarya Üniversitesi (Turkey)).
- Deng, M., Ma, F., Ye, W., & Liang, X. (2018). Investigation of the shear strength of HDC deep beams based on a modified direct strut-and-tie model. *Construction and Building Materials*, 172, 340-348.
- Dutta, B., Kumari, A., & Nayak, A. N. (2022). Shear behaviour of RC deep beams retrofitted with externally bonded GFRP fabrics: Experimental and numerical study. *Structures*, 46, 1-16.

- Duxson, P., Fernández-Jiménez, A., Provis, J. L., Lukey, G. C., Palomo, A., Van Deventer, J. S. J., 2007. Geopolymer technology: the current state of the art. *Journal Materyal Science*, 42, 2917-2933.
- Duxson, P., Provis, J.L., Lukey, G.C., Van Deventer, J.S. (2007). The Role of İnorganic Polymer Technology in The Development of ‘Green Concrete’. *Cement and Concrete Research*, 37(12), 1590-1597.
- El-Sayed, A. K., & Shuraim, A. B. (2016). Size effect on shear resistance of high strength concrete deep beams. *Materials and Structures*, 49(5), 1871-1882.
- Eryılmaz, K. (2023). *Geri dönüştürülmüş geopolimer agregalar ile sürdürülebilir beton üretiminin araştırılması*. Yüksek lisans tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Farhan, K. Z., Johari, M. A. M., & Demirboğa, R. (2022). Evaluation of properties of steel fiber reinforced GGBFS-based geopolymer composites in aggressive environments. *Construction and Building Materials*, 345, 128339.
- Farooq, F., Jin, X., Javed, M. F., Akbar, A., Shah, M. I., Aslam, F., & Alyousef, R. (2021). Geopolymer concrete as sustainable material: A state of the art review. *Construction and Building Materials*, 306, 124762.
- Fu, Q., Xu, W., Zhao, X., Bu, M., Yuan, Q., Niu, D., 2021. The microstructure and durability of fly ash-based geopolymer concrete: A review. *Ceramics International*, 47-21, 29550-29566.
- Ghafoor MT, Khan QS, Qazi AU, Neaz Sheikh M, Hadi MNS (2021) Influence of alkaline activators on the mechanical properties of f ly ash based geopolymer concrete cured at ambient temperature. *Constr Build Mater* 273:121752
- Glasby, T., Day, J., Genrich, R., & Aldred, J. (2015). EFC geopolymer concrete aircraft pavements at Brisbane West Wellcamp Airport. *Concrete*, 2015, 1-9.
- Gourley, J. T. (2014). Geopolymers in Australia. *J. Aus. Ceram. Soc*, 50, 102-110.
- Görür, E. B. (2015). Alkali ile aktifleştirilmiş uçucu kül geopolimer betonun dayanım ve durabilite özelliklerinin araştırılması. *Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Doktora Tezi*.
- Hamcumpai, K., Nuaklong, P., Chindasiriphan, P., Jongvivatsakul, P., Tangaramvong, S., Di Sarno, L., & Likitlersuang, S. (2024). High-strength steel fiber-reinforced geopolymer concrete utilising recycled granite waste and rice husk ash. *Construction and Building Materials*, 433, 136693.
- Hanle, L. J., Jayaraman, K. R., & Smith, J. S. (2004). CO2 emissions profile of the US cement industry. *Washington DC: Environmental Protection Agency*, 10.
- Hassan, A., Arif, M., Shariq, M., 2019a. Use of geopolymer concrete for a cleaner and sustainable environment—a review of mechanical properties and microstructure. *J. Clean. Prod.* 223, 704–728.
- Husem, M., Yilmaz, M., & Cosgun, S. I. (2022). Experimental and numerical investigations on reinforcement arrangements in RC deep beams. *Advances in concrete construction*, 13(3), 243-254.
- Imtiaz L, Rehman SK, Ali Memon S, Khizar Khan M, Faisal Javed M (2020) A review of recent developments and advances in eco friendly geopolymer concrete. *Appl Sci* 10(21):7838 <https://doi.org/10.3390/app10217838>
- Irmak, S. (2024). *YFC/UK bazlı metakaolin ve silis dumanı içeren kendiliğinden yerleşen geopolimer kompozitlerde farklı çözelti oranlarının mekanik ve durabilite özelliklerine*

etkisi .Yüksek lisans tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

- Javed, M. A., Irfan, M., Khalid, S., Chen, Y., & Ahmed, S. (2016). An experimental study on the shear strengthening of reinforced concrete deep beams with carbon fiber reinforced polymers. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 20(7), 2802-2810.
- Jin, L., Jiang, X. A., Lu, K., & Du, X. (2022). Tests on shear failure and size effect of CFRP-wrapped RC beams without stirrups: Influence of CFRP ratio. *Composite Structures*, 291, 115613.
- Kadhim, A. J., & Zinkaah, O. H. (2025). Numerical and theoretical investigation for the flexural behaviour of geopolymer concrete beams reinforced with hybrid FRP/steel bars. *Journal of Building Engineering*, 101, 111883.
- Kadhim, H. K., & Abdullah, M. D. (2024). Effect of loading type in concrete deep beam with strut reinforcement. *Open Engineering*, 14(1), 20220488.
- Kantarıcı, F. (2021). Lif boyunun ve içeriğinin geopolimer betonların asit direncine etkisi. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 11(2), 424-437. <https://doi.org/10.17714/gumusfenbil.866094>
- Kantarıcı, F., 2018. Nano Silis, Mikro Silis ve Polimer Katkılar İçeren Volkanik Tuf Esaslı Geopolimer Beton Üretimi ve Özelliklerinin Araştırılması, Doktora Tezi, İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Malatya.
- Karimizadeh, H., & Arabzadeh, A. (2021, December). A STM-based analytical model for predicting load capacity of deep RC beams with openings. *Structures*, 34, 1185-1200.
- Kaur, M., Singh, J., & Kaur, M. (2018). Microstructure and strength development of fly ash-based geopolymer mortar: Role of nano-metakaolin. *Construction and Building Materials*, 190, 672-679.
- Kuranlı, Ö. F. (2020). Farklı bağlayıcı ve lif içeren jeopolimer betonların mekanik ve durabilite özelliklerinin incelenmesi. Yüksek lisans tezi, İstanbul.
- Latosh, F. (2014). *Structural behaviour of conventional and FRP-reinforced concrete deep beams* (Doctoral dissertation, Concordia University).
- Laxmi, G., Patil, S., Hossiney, N., & Thejas, H. K. (2023). Effect of hooked end steel fibers on strength and durability properties of ambient cured geopolymer concrete. *Case Studies in Construction Materials*, 18, e02122.
- Leonhardt F, Reducing the Shear Reinforcement in Reinforced Concrete Beams and Slabs, *Magazine of Concrete Research*, Vol. 17, No.53 December 1965, pp. 187-198. Nawy EG, Reinforced Concrete – A Fundamental Approach, Sixth edition, Prentice Hall, New Jersey, 2009.
- Li, N., Shi, C., Zhang, Z., Wang, H., & Liu, Y. (2019). A review on mixture design methods for geopolymer concrete. *Composites Part B: Engineering*, 178, 107490.
- Li, S., Wu, Z., Zhang, J., & Xie, W. (2022). Experimental Study and Calculation Methods of Shear Capacity for High-Strength Reinforced Concrete Full-Scale Deep Beams. *Materials*, 15(17), 6017.
- Liu, Y., Shi, C., Zhang, Z., Li, N., & Shi, D. (2020). Mechanical and fracture properties of ultra-high performance geopolymer concrete: Effects of steel fiber and silica fume. *Cement and Concrete Composites*, 112, 103665.
- Luukkonen, T., Abdollahnejad, Z., Yliniemi, J., Kinnunen, P., & Illikainen, M. (2018). One-part alkali-activated materials: A review. *Cement and Concrete Research*, 103, 21-34.
- Ma, C., Xie, C., Tuohuti, A., & Duan, Y. (2022). Analysis of influencing factors on shear

- behavior of the reinforced concrete deep beams. *Journal of building engineering*, 45, 103383.
- MacGregor, J. G. (1997). "Reinforced Concrete, Mechanics and Design," 3rd Edition, Prentice Hall, New Jersey, 939 pp.
- Manzoor, T., Bhat, J. A., & Shah, A. H. (2024). Performance of geopolymer concrete at elevated temperature– A critical review. *Construction and Building Materials*, 420, 135578.
- McLellan, B.C., Williams R.P., Lay J., Riessen A.V., Corder G.D., 2011. Costs And Carbon Emissions For Geopolymer Pastes in Comparison to Ordinary Portland Cement. *Journal of Cleaner Production*, 19, 1080-1090.
- McNulty, E., 2009. Geopolymers: An Environmental Alternative to Carbon Dioxide Producing Ordinary Portland Cement. Department of Chemistry, The Catholic University of America.
- Mohamed, A. M., Tayeh, B. A., Aisheh, Y. I. A., & Salih, M. N. A. (2023). Exploring the performance of steel fiber reinforced lightweight concrete: A case study review. *Case Studies in Construction Materials*, 18, e01968.
- Moradi, M., & Esfahani, M. R. (2017). Application of the strut-and-tie method for steel fiber reinforced concrete deep beams. *Construction and Building Materials*, 131, 423-437.
- Mudimby, A., & Bhanuprakash, D. (2023). Minimum flexural reinforcement of fly ash and GGBS based geopolymer concrete members. *Materials Today: Proceedings*.
- N.B. Singh, B.Middendorf, Chemistry of blended cements part-I: Natural pozzolanas, fly ashes and granulated blast-furnace slags, *Cem. Int.* 6 (4) (2008) 76–91.
- Nawaz, M., Heitor, A., Sivakumar, M., 2020. Geopolymers in construction- recent developments. *Construction and Building Materials*, 260, 120472.
- Nishanth, L., & Patil, N. N. (2022). Experimental evaluation on workability and strength characteristics of self-consolidating geopolymer concrete based on GGBFS, flyash and alccofine. *Materials Today: Proceedings*, 59, 51-57.
- Odeh, A., Al-Fakih, A., Alghannam, M., Al-Ainya, M., Khalid, H., Al-Shugaa, M. A., ... & Aswin, M. (2024). Recent progress in geopolymer concrete technology: a review. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 48(5), 3285-3308. <https://doi.org/10.1007/s40996-024-01391-z>
- Palomo, A., Grutzeck, M. W., Blanco, M. T., 1999. Alkali-activated fly ashes: a cement for the future. *Cement and Concrete Research*, 29, 1323-1329.
- Parathi, S., Nagarajan, P., & Pallikkara, S. A. (2021). Ecofriendly geopolymer concrete: A comprehensive review. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 23(6), 1701-1713. <https://doi.org/10.1007/s10098-021-02085-0>
- Patel, Y. J., & Shah, N. (2018). Development of self-compacting geopolymer concrete as a sustainable construction material. *Sustainable Environment Research*, 28(6), 412-421.
- Peng, F., Cai, Y., Yi, W., & Xue, W. (2023). Shear behavior of two-span continuous concrete deep beams reinforced with GFRP bars. *Engineering Structures*, 290, 116367.
- Provis, J. L., & Van Deventer, J. S. J. (Eds.). (2009). *Geopolymers: structures, processing, properties and industrial applications*. Elsevier.
- Rangan, B. V., 2010. Fly Ash-Based Geopolymer Concrete. International Workshop on Geopolymer Cement and Concrete. 68-106, Mumbai University, India.

- Rao, G. A., & Raj, J. L. (2024, November). Effect of horizontal web reinforcement, depth, proportionated loading and bearing plates on shear strength and serviceability of reinforced concrete deep beams. In *STRUCTURES* (Vol. 69). STE 800, 230 PARK AVE, NEW YORK, NY 10169 USA: ELSEVIER SCIENCE INC.
- Roy, D., M., 1999. Alkali-activated cements opportunities and challenges. *Cement and Concrete Research*. 29, 249-254.
- Sagi, M. S. V., Lakavath, C., & Prakash, S. S. (2022). Effect of steel fibers on the shear behavior of Self-Compacting reinforced concrete deep Beams: An experimental investigation and analytical model. *Engineering Structures*, 269, 114802. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114802>
- Shahnewaz, M., Rteil, A., & Alam, M. S. (2020). Shear strength of reinforced concrete deep beams—A review with improved model by genetic algorithm and reliability analysis. *Structures*, 23, 494-508.
- Sharma, U., Gupta, N., Bahrami, A., Özkılıç, Y. O., Verma, M., Berwal, P., ... & Islam, S. (2024). Behavior of fibers in geopolymers concrete: A comprehensive review. *Buildings*, 14(1), 136.
- Shyamala, G. (2022). Impact of reinforcement and geometry of deep beam—Research perspective. *Materials Today: Proceedings*, 68, 1556-1561.
- Singh, B., Ishwarya, G., Gupta, M., & Bhattacharyya, S. K. (2015). Geopolymer concrete: A review of some recent developments. *Construction and building materials*, 85, 78-90. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.036>
- Singh, N. B., Kumar, M., & Rai, S. (2020). Geopolymer cement and concrete: Properties. *Materials Today: Proceedings*, 29, 743-748. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.04.513>
- Smith, K.N. and Vantsiotis, A.S. (1982). Shear strength of deep beams. *ACI J. Proc.*, 79(3), 201-213. <https://doi.org/10.14359/10899>.
- Sukontasukkul, P., Intarabut, D., Phoo-ngernkham, T., Suksiripattanapong, C., Zhang, H., & Chindaprasirt, P. (2023). Self-compacting steel fibers reinforced geopolymer: Study on mechanical properties and durability against acid and chloride attacks. *Case Studies in Construction Materials*, 19, e02298.
- Thakur, R. N., & Ghosh, S. (2009). Performance of fly ash based geopolymer composites at elevated temperature. *International Journal of Applied Engineering Research*, 4(4), 583-594.
- Thang, X.N. (2016). Influence of Curing and Water to the Mechanical Properties of Geopolymer Mortar. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 5(2), 49-52.
- TS EN 12090-3, 2019. Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 3: Deney numunelerinin basınç dayanımının tayin, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, Türkiye.
- TS EN 12390-1, 2021. Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 1: Deney numunesi ve kalıplarının şekil, boyut ve diğer özellikleri, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, Türkiye.
- TS EN 12390-5, 2019. Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 5: Deney numunelerinin eğilme dayanımının tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, Türkiye.
- TS EN 12390-6, 2024. Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 6: Deney numunelerinin yarmada çekme dayanımının tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, Türkiye

- TS EN 15167-1, 2006. Öğütülmüş yüksek fırın curufu - Beton, harç ve şerbette kullanım için - Bölüm 1: Tarifler, özellikler ve uygunluk kriterleri, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, Türkiye.
- TS EN 196-2, 2013. Çimento deney yöntemleri- Bölüm 2: Çimentonun kimyasal analizi, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, Türkiye.
- TS EN 196-3, 2017. Çimento deney yöntemleri - Bölüm 3: Priz süreleri ve genleşme tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, Türkiye.
- TS EN 196-6, 2020. Çimento deney yöntemleri- Bölüm 6: İncelik tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, Türkiye.
- Tuchscherer, R. G., & Quesada, A. (2015). Replacement of deformed side-face steel reinforcement in deep beams with steel fibers. *Structures*, 3, 130-136.
- Turan, A. F. (2022). *Betonarme kirişlerde donatı oranının ve genişlik/yükseklik oranının kiriş davranışına etkileri* (Master's thesis, Bursa Uludag University (Turkey)).
- Türk Standartları Enstitüsü. (1992). *TS 10513: [Standart başlığı]*. Ankara: Türk Standartları Enstitüsü.
- Türk Standartları Enstitüsü. (2000). *TS 500: Betonarme yapıların tasarım ve yapım kuralları*. Ankara: Türk Standartları Enstitüsü.
- van Jaarsveld JGS, van Deventer JSJ, Lukey GC (2003) The characterisation of source materials in fly ash-based geopolymers. *Mater Lett* 57:1272–1280. [https://doi.org/10.1016/S0167-577X\(02\)00971-0](https://doi.org/10.1016/S0167-577X(02)00971-0)
- Wang, Y., Aslani, F., & Valizadeh, A. (2020). An investigation into the mechanical behaviour of fiber-reinforced geopolymer concrete incorporating NiTi shape memory alloy, steel and polypropylene fibers. *Construction and Building Materials*, 259, 119765.
- Wu, T., Wei, H., & Liu, X. (2018). Experimental investigation of shear models for lightweight aggregate concrete deep beams. *Advances in Structural Engineering*, 21(1), 109-124.
- Xu, L., Yang, Y., Yu, Y., Zhang, Y., Hao, N., Chen, X., & Xue, Y. (2024). Behavior and shear strength of prestressed steel reinforced concrete composite deep beam. *Construction and Building Materials*, 438, 137222.
- Yılmaz, A. (2021). *Kauçuk lif katkılı jeopolimer betonların mekanik ve durabilite özelliklerinin araştırılması*. Yüksek lisans tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Yılmaz, M. (2016). Farklı donatı düzenine sahip betonarme yüksek kirişlerin davranışlarının deneysel ve teorik olarak incelenmesi. *Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yüksek Lisans Tezi*.
- Zahid, M., Khan, M. I., Shafiq, N., Abbas, Y. M., & Khatib, J. M. (2024). Achieving superior mechanical performance in one-part geopolymer composites through innovative hybrid fiber systems of recycled steel and PVA fibers. *Journal of Materials Research and Technology*, 32, 1772-1787.
- Zhang, H., Sarker, P. K., Wang, Q., He, B., & Jiang, Z. (2021). Strength and toughness of ambient-cured geopolymer concrete containing virgin and recycled fibers in mono and hybrid combinations. *Construction and Building Materials*, 304, 124649.
- Zhang, J. H., Li, S. S., Xie, W., & Guo, Y. D. (2020). Experimental study on shear capacity of high strength reinforcement concrete deep beams with small shear span–depth ratio. *Materials*, 13(5), 1218.
- Zhang, M., Zhao, M., Zhang, G., et al., 2018d. Reaction kinetics of red mud-fly ash based geopolymers: effects of curing temperature on chemical bonding, porosity, and

- mechanical strength. *Cement Concrete Composites* 93, 175e185.
- Zhao, J., Liang, J., Chu, L., & Shen, F. (2018). Experimental study on shear behavior of steel fiber reinforced concrete beams with high-strength reinforcement. *Materials*, 11(9), 1682.
- Zhao, Q., Wang, Y., Xie, M., & Huang, B. (2022). Experimental study on mechanical behavior of steel fiber reinforced geopolymeric recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 356, 129267.
- Zhen, C., Li, B., Li, Y., Liu, Y., Xu, H., Wang, L., & Shi, Y. (2025). Mechanical, fracture and environmental performance evaluation of steel fiber reinforced industrial solid wastes based geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*, 492, 143038.
- Zheng, J., Qi, L., Zheng, Y., & Zheng, L. (2023). Mechanical properties and compressive constitutive model of steel fiber-reinforced geopolymer concrete. *Journal of Building Engineering*, 80, 108161.
- Zheng, Y., Zhang, W., Zheng, L., & Zheng, J. (2024). Mechanical properties of steel fiber-reinforced geopolymer concrete after high temperature exposure. *Construction and Building Materials*, 439, 137394.
- Zuaiter, M., Khalil, A., Elkafrawy, M., Hawileh, R., AlHamaydeh, M., Ayman, A., & Kim, T. Y. (2025). Effect of blending GGBS and silica fume on the mechanical properties of geopolymer concrete. *Scientific Reports*, 15(1), 9091.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı:	Yasemin ÖZBEN
Doğum Tarihi:	
Doğum Yeri:	
Uyruğu:	
Adres:	
Tel:	
Email:	
Eğitim	
Lise:	Erzurum Anadolu Lisesi
Lisans:	Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi
Yüksek Lisans:	Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Yabancı Dil Bilgisi	
İngilizce:	İyi
Üye Olunan Mesleki Kuruluşlar	
İnşaat Mühendisleri Odası	
Eserler	