

T.C.
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI



ULTRA YÜKSEK PERFORMANSLI BETON
İÇEREN KİRİŞLERİN KESME DAVRANIŞINDA KARMA ÇELİK
LİF KULLANIMININ ETKİSİ

AYTAÇ AYGEN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Jüri Üyeleri : Dr. Öğr. Üyesi Tamer BİROL (Tez Danışmanı)
Doç. Dr. Umut HASGÜL
Dr. Öğr. Üyesi Serkan SAĞIROĞLU

BALIKESİR, ŞUBAT - 2024

ETİK BEYAN

Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak tarafımda hazırlanan “**Ultra Yüksek Performanslı Beton İçeren Kirişlerin Kesme Davranışında Karma Çelik Lif Kullanımının Etkisi**” başlıklı tezde;

- Tüm bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Kullanılan veriler ve sonuçlarda herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Tüm bilgi ve sonuçları bilimsel araştırma ve etik ilkelere uygun şekilde sunduğumu,
- Yararlandığım eserlere atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,

beyan eder, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Aytaç AYGEN

ÖZET

ULTRA YÜKSEK PERFORMANSLI BETON İÇEREN KİRİŞLERİN KESME DAVRANIŞINDA KARMA ÇELİK LİF KULLANIMININ ETKİSİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

AYTAÇ AYGİN

BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

(TEZ DANIŞMANI: DR. ÖĞR. ÜYESİ TAMER BİROL)

BALIKESİR, ŞUBAT - 2024

Ultra Yüksek Performanslı Beton (UYPB), geleneksel betonlar ile karşılaştırıldığında üstün mekanik özelliklere sahip yeni nesil bir beton türüdür. UYPB çok ince malzemelerin kullanılması ve düşük su/bağlayıcı oranı nedeniyle çok yüksek basınç dayanımına ve durabiliteye sahiptir. Mevcut çalışmalarda UYPB'un çekme etkisi altındaki yüksek dayanımı ve deformasyon kapasitesi ile çatlak kontrolü özelliği sonucu betonarme kirişlerin kesme dayanımına katkısı ortaya konmuştur. Ayrıca, farklı tipte liflerin birlikte karma olarak kullanılmasıyla oluşan sinerjik etki nedeniyle tek tip lif kullanımına göre avantajları malzeme bazında pek çok çalışmada ortaya konulmasına karşın yapısal elemanlarda karma lif kullanımı ile ilgili çalışmalar oldukça sınırlıdır.

Bu çalışmada, UYPB ile üretilen I enkesitli betonarme kirişlerin kesme davranışı üzerinde karma çelik lif kullanımının etkisi iki aşamadan oluşan deneysel bir programla incelenmiştir. Çalışmanın ilk aşamasında, karma çelik lif kullanımının malzeme bazındaki etkisi temel mekanik özellikler için gerçekleştirilen testler ile incelenmiştir. İkinci aşamada ise kesme davranışının değerlendirilmesi amacıyla tek tip ve karma çelik lifli UYPB karışımları kullanılarak I enkesitli betonarme UYPB kirişler üretilmiş ve kesme etkin yüklenme altında test edilmiştir.

Elde edilen sonuçlar, lif miktarının artması ile basınç ve yarmada çekme dayanımlarının arttığını göstermiştir. UYPB karışımlarının eğilmede çekme dayanımları bakımından en iyi performans hacimce %2.0 oranında tek tip lif kullanımında elde edilmiştir. I enkesitli kirişlerin testleri sonucunda çelik lif kullanımının kesme dayanımını belirgin şekilde arttırdığı görülürken, hacimce %2.0 lif kullanımında kesme kırılması önlenebilmiştir. Deneysel çalışma sonucunda incelenen parametreler açısından karma çelik lif kullanımının belirgin bir avantajı belirlenmemiştir.

ANAHTAR KELİMELELER: Ultra yüksek performanslı beton, çelik lif, karma lif, kesme davranışı, I enkesitli kiriş

ABSTRACT

EFFECT OF HYBRID STEEL FIBER USE ON THE SHEAR BEHAVIOR OF BEAMS CONTAINING ULTRA HIGH PERFORMANCE CONCRETE

MSC THESIS

AYTAÇ AYGEN

BALIKESİR UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE

CIVIL ENGINEERING

(SUPERVISOR: ASIST. PROF. TAMER BİROL)

BALIKESİR, FEBRUARY - 2024

Ultra High Performance Concrete (UHPC) is a new generation concrete with superior mechanical properties compared to conventional concretes. UHPC has very high compressive strength and durability compared to conventional concrete due to the use of ultra fine materials and the low water to binder ratio. Existing studies have demonstrated the contribution of UHPC to shear strength of reinforced concrete beams as a result of its high strength, deformation capacity and cracking control under tension. In addition, although the advantages of using different types of fibers together as hybrid form due to the synergistic effect over the use of single fiber type have been revealed in many material-based studies, studies on the hybrid fiber use in structural members are very limited.

In this study, the effect of the hybrid steel fiber use on the shear behavior of I-section reinforced concrete beams produced with UHPC was investigated with an experimental campaign consisting of two stages. In the first stage, the effect of hybrid steel fiber use on the basic mechanical properties was investigated with the material-based tests. In the second stage, in order to evaluate the shear behavior, I-section reinforced concrete beams were produced using UHPC mixtures with mono and hybrid steel fibers and tested under shear effective loading.

The results showed that the compressive and splitting tensile strengths increased with increasing fiber content. The best performance in terms of flexural tensile strength of UHPC mixtures was obtained with the use of 2.0% mono fiber by volume. As a result of the tests of I-section beams, it was observed that the use of steel fibers significantly increased the shear strength, while shear failure could be prevented with the use of 2.0% fiber by volume. As a result of the experimental study, no significant advantage of the hybrid fiber use could be determined in terms of examined parameters.

KEYWORDS: Ultra high performance concrete, steel fiber, hybrid fiber, shear behavior, I beam

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER	iii
ŞEKİL LİSTESİ	iv
TABLO LİSTESİ	vi
SEMBOL LİSTESİ	vii
ÖNSÖZ	viii
1. GİRİŞ	1
1.1 UYPB'un Betonarme Kirişlerin Kesme Davranışına Etkisi ile ilgili Çalışmalar	2
1.2 UYPB'da Karma Lif Kullanımı	11
1.3 Çalışmanın Amacı ve Kapsamı	14
2. DENEYSEL PROGRAM	15
2.1 Ultra Yüksek Performanslı Beton (UYPB) Karışımları	15
2.2 Test Numunelerinin özellikleri	17
2.2.1 Mekanik Özelliklerin Belirlenmesinde Kullanılan Test Numuneleri	17
2.2.2 I Enkesitli Betonarme Kirişlerin Özellikleri	17
2.3 Betonun Hazırlanması ve Test Numunelerinin Üretimi	18
2.4 Test Düzenekleri	22
2.4.1 Eksenel Basınç Test Düzeneği	22
2.4.2 Yarmada Çekme Test Düzeneği	22
2.4.3 Prizma Eğilme Test Düzeneği	23
2.4.4 Betonarme Kiriş Test Düzeneği	24
3. DENEYSEL ÇALIŞMANIN SONUÇLARI	28
3.1 Eksenel Basınç Testleri	28
3.2 Yarmada Çekme Testleri	29
3.3 Prizma Eğilme Testleri	30
3.3.1 Yük-Sehim Davranışı	30
3.3.2 Yük-Çatlak Ağzı Açıklığı Yerdeğiştirmesi (ÇAAY) Davranışı	34
3.4 I Enkesitli Kirişlerin Testleri	46
3.4.1 Yük-Sehim Davranışı	46
3.4.2 Çatlak Davranışı	51
4. GENEL SONUÇLAR	57
5. KAYNAKLAR	59
ÖZGEÇMİŞ	68

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1: Ultra Yüksek Performanslı Beton (UYPB) ile normal dayanımlı beton (NDB) karşılaştırması (Wu vd., 2009).....	2
Şekil 1.2: Kirişlere ait yük-sehim grafikleri; (a) Kesme donatısız, (b) Kesme donatılı (Pansuk vd., 2017).	2
Şekil 1.3: a) Lif etkisi, b) Kesme donatısı etkisi (Mészöly ve Randl, 2018).	3
Şekil 1.4: Farklı yükleme aşamaları için UYPB kirişlerin çatlak davranışı; a) Eğilme etkin yükleme, b) Kesme etkin yükleme (Kodur vd., 2018).	4
Şekil 1.5: Test kirişlerinin yük-sehim davranışı (Hasgül vd., 2019).	5
Şekil 1.6: Test kirişlerinin hacimsel çelik lif oranlarına göre yük-sehim davranışı; a) %0.5, b) %1.0, c) %1.5 (Yavaş vd., 2019).....	6
Şekil 1.7: Beton basınç dayanımının kesme kapasitesine etkisi (Chen vd., 2022).	7
Şekil 1.8: UYPB kirişlerin kesme talebi-kesme deformasyonu ilişkisi (Bermudez vd., 2022).	8
Şekil 1.9: Farklı donatı ve a/d oranları için UYPB kirişlerin kesme kırılması türlerinin karşılaştırılması (Cao vd., 2022).....	9
Şekil 1.10: Farklı parametrelerin UYPB kirişlerin çatlama ve nihai kesme dayanımına etkileri (Ma vd., 2022).....	10
Şekil 1.11: Test Çelik lif tipi ve miktarının UYPB kirişlerin kesme dayanımına katkısı (Hasgül vd., 2023).	11
Şekil 1.12: Mikro ve Makro boyutta liflerin karma kullanımı sonucu çatlak köprüleme davranışı (Kwon vd., 2014).	13
Şekil 2.1: Çelik lifler; a) Mikro-düz lifler, b) Makro-kancalı lifler.	16
Şekil 2.2: UYPB karışımlarının karşılaştırılması (kg/m^3).....	16
Şekil 2.3: I enkesitli kirişe ait detaylar.	18
Şekil 2.4: I enkesitli kiriş için imalatı tamamlanmış donatı düzeni.	18
Şekil 2.5: Panmikser ve döküm aracı.	19
Şekil 2.6: Panmikser ve döküm aracı.	20
Şekil 2.7: Test numunelerinin üretimi.....	20
Şekil 2.8: I enkesitli kiriş üretimi.	21
Şekil 2.9: a) Beton dökümü tamamlanan test numuneleri, b) Test numunelerinin kürlenmesi.....	21
Şekil 2.10: Eksenel basınç test düzeneği.....	22
Şekil 2.11: Yarmada çekme test düzeneği.	23
Şekil 2.12: Prizma numuneleri için üç noktalı eğilme test düzeneği.	24
Şekil 2.13: I enkesitli kirişlere yerleştirilen ölçerlerin detayları.	25
Şekil 2.14: Kirişin arka yüzüne yerleştirilen ölçerler.....	26
Şekil 2.15: Asal donatılara yerleştirilen ölçerler.	26
Şekil 2.16: Betonarme kirişler için eğilme test düzeneği.....	27
Şekil 3.1: Lif içeriklerine göre karışımların basınç dayanımlarının değişimi.....	28
Şekil 3.2: Küp numunelerin kırılma şekilleri; a) Lifsiz, b) Lifli.	29
Şekil 3.3: Lif içeriklerine göre UYPB'un yarmada çekme dayanımının değişimi.	30
Şekil 3.4: Silindir numunelerin kırılma şekilleri; a) Lifsiz, b) Lifli.....	30
Şekil 3.5: Prizma numunelerin yük-sehim grafikleri.	31
Şekil 3.6: Eğilme testleri sonucu elde edilen ortalama yük-sehim grafikleri.	32
Şekil 3.7: Kontrol karışımına ait prizmaların çatlak şekilleri.	32

Şekil 3.8: Hacimce %1.0 lif içeren karışımlara ait prizmaların çatlak şekilleri.....	33
Şekil 3.9: Hacimce %2.0 lif içeren karışımlara ait prizmaların çatlak şekilleri.....	33
Şekil 3.10: Lif içeriklerine göre karışımların kırılma enerjilerinin değişimi.....	34
Şekil 3.11: Eğilme testleri sonucunda elde edilen yük-ÇAAY grafikleri.....	36
Şekil 3.12: UYPB karışımların ortalama yük-ÇAAY grafikleri.....	37
Şekil 3.13: UYPB karışımların ortalama yük-ÇAAY davranışları için çatlama noktasının belirlenmesi.....	37
Şekil 3.14: Hacimsel lif oranlarına göre eğilme dayanımlarının değişimi.....	40
Şekil 3.15: ÇAAY değerlerinin GOM Correlate 2019 yazılımı ile belirlenmesi.....	41
Şekil 3.16: Mono1.0 prizmaların deneysel ve 2B-DGK için zaman-ÇAAY grafikleri.....	41
Şekil 3.17: Mono2.0 prizmaların deneysel ve 2B-DGK için zaman-ÇAAY grafikleri.....	41
Şekil 3.18: Karma1.0 prizmaların deneysel ve 2B-DGK için zaman-ÇAAY grafikleri.....	42
Şekil 3.19: Karma2.0 prizmaların deneysel ve 2B-DGK için zaman-ÇAAY grafikleri.....	42
Şekil 3.20: Mono1.0 prizmaların 2B-DGK analizi sonucu elde edilen çatlak davranışı... ..	43
Şekil 3.21: Mono2.0 prizmaların 2B-DGK analizi sonucu elde edilen çatlak davranışı... ..	44
Şekil 3.22: Karma1.0 prizmaların 2B-DGK analizi sonucu elde edilen çatlak davranışı... ..	45
Şekil 3.23: Karma2.0 prizmaların 2B-DGK analizi sonucu elde edilen çatlak davranışı... ..	46
Şekil 3.24: I enkesitli kirişlerin yük-sehim grafikleri.....	49
Şekil 3.25: I enkesitli test kirişlerinin kırılma şekilleri.....	50
Şekil 3.26: I enkesitli testlerinde ölçülen donatı şekildeğişimleri.....	51
Şekil 3.27: I enkesitli test kirişlerinin GOM Correlate 2019 yazılımı ile çatlak genişliklerinin belirlenmesi.....	51
Şekil 3.28: Kontrol kirişinin çatlak gelişimi.....	53
Şekil 3.29: Hacimce %1.0 lif içeren kirişlerin çatlak gelişimi.....	54
Şekil 3.30: Hacimce %2.0 lif içeren I-enkesitli kirişin çatlak gelişimi.....	56

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 2.1: UYPB karışımlarının içerikleri (kg/m ³).	15
Tablo 2.2: Kullanılan çelik liflerin özellikleri.	16
Tablo 3.1: Karışımlara ait ortalama basınç dayanımları.	28
Tablo 3.2: Karışımlara ait ortalama yarmada çekme dayanımları.	29
Tablo 3.3: Karışımların tepe yükü için hesaplanan kırılma enerjisi (G_f) değerleri.	34
Tablo 3.4: Karakteristik noktalara ait eğilmeye çekme dayanımları.	38
Tablo 3.5: I enkesitli kirişlerin yük-sehim davranışı için elde edilen sonuçlar.	48
Tablo 3.6: I enkesitli test kirişlerine ait maksimum kesme çatlak genişlikleri.	52
Tablo 3.7: I enkesitli test kirişlerine ait maksimum eğilme çatlak genişlikleri.	52



SEMBOL LİSTESİ

a	: Kesme açıklığı
b	: Prizma enkesit genişliği
d	: Faydalı yükseklik
F	: Kırılma yükü
f_c	: Eksenel basınç dayanımı
f_{ct}	: Yarmada çekme dayanımı
f_R	: Eğilmede çekme dayanımı
f_{RL}	: Orantılılık sınırına karşılık gelen eğilmede çekme dayanımı
f_{Rmaks}	: Maksimum yük değerine karşılık gelen eğilmede çekme dayanımı
g	: Yerçekimi ivmesi (m/sn ²)
G_f	: Kırılma enerjisi
h_{sp}	: Prizmanın çentik hariç enkesit yüksekliği
L	: Prizma için mesnetler arası mesafe
m	: Kütle
P	: Kuvvet
P_{maks}	: Maksimum yük
R	: Yükleme hızı
s	: Gerilme artış hızı
V_f	: Hacimsel lif oranı
ε_{maks}	: Maksimum şekildeğiştirme
w₀	:Deneysel yük-deformasyon eğrisi altında kalan alan
δ	: Kırılmanın son aşamasında prizmanın deformasyonu

ÖNSÖZ

İlk olarak yaptığım bu çalışmayı; bana dürüstlüğü, çalışkanlığı ve iyi bir insan olmayı öğreten, kısacası kişiliğimin oluşmasında bana en büyük katkıyı sağlayan, 2016 yılında aramızdan ayrılan canım anneciğim Şükran AYGEN'e armağan etmek istiyorum. Daha sonra benden maddi ve manevi desteğini esirgemeyen babam Hayrullah Aygen'e sonsuz saygı ve teşekkürlerimi sunuyorum. Bu çalışmamın oluşmasında, ilerlemesinde ve sonuçlanmasında desteğini her aşamada hissettiğim, verdiği bilgi ve yönlendirmelerle bana ışık olan, danışmandan çok bir arkadaş ve ağabey gibi yaklaşan saygıdeğer hocam Dr. Öğr. Üyesi Tamer BİROL'a; danışmanım ile birlikte, test numunelerimin dökümlerinin gerçekleştirilmesinde ve daha sonrasında numunelerimin kırımları için test düzeneğinin hazırlanmasında desteğini hiçbir zaman esirgemeyen, karşılaştığımız problemlerde, danışmanım ile birlikte, engin bilgisiyle bana yol gösteren saygıdeğer hocam Doç. Dr. Altuğ YAVAŞ'a; yapı mekaniği laboratuvarında çalışmamı yürüttüğüm aşamalarda bana her zaman pozitif enerji ve moral aşılayan saygıdeğer hocam Doç. Dr. Umut HASGÜL ve saygıdeğer hocam Doç. Dr. Nuray GEDİK'e; yapmış olduğumuz çalışmalarda birbirimize beden ve iş gücü anlamında destek verdiğimiz, yol arkadaşlığı yaptığımız inşaat mühendisi Alper AVCIALP'e teşekkürü bir borç bilirim. Yazımı Mevlana'nın sevdiğim bir sözle bitirmek istiyorum: "Bulanlar ancak arayanlardır."

Balıkesir, 2024

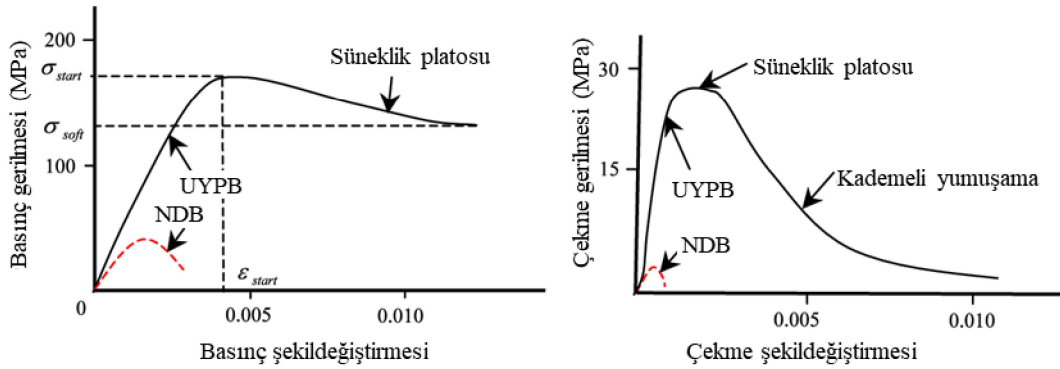
Aytaç AYGEN

1. GİRİŞ

Lifli betonların yapısal elemanlarda kullanımına olan ilgi ve buna bağlı olarak akademik çalışmalar son yıllarda büyük bir artış göstermiştir. Lifler, betondaki çatlak oluşumunu geciktirmekte ve çatlakların genişlemesini sınırlamaktadır. Böylece betonun çatlak sonrası davranışı, çekme dayanımı ve enerji sönümleme kapasitesi belirgin şekilde iyileşmektedir (Prisco vd., 2009; Yang vd., 2017; Yoo vd., 2017). Lifli beton ile üretilen betonarme kirişlerin kesme etkisine karşı gösterdikleri kayma direnci mekanizması normal dayanımlı betonarme kirişlerden farklılık göstermektedir. Lifler, kesme dayanımında beton ve donatı katkısının yanı sıra ek bir parametre olarak mekanizmaya dahil olmaktadır. Çelik liflerin oluşan çatlakları köprüleme kabiliyeti sayesinde kritik diyagonal çatlaklar arasında gerilme aktarımı sağlanmakta ve çatlak genişlemesine karşı daha fazla direnç sağlanarak diyagonal çatlakların açılması kontrol edilebilmektedir. Bunun yanı sıra lifler, agrega kenetlenmesi ve çekme donatısının kaldıraç etkisi gibi etkileri geliştirerek gerilme aktarılmasına katkı sağlamaktadır (Li vd., 1992; Lim ve Oh, 1999; Choi vd., 2007). Liflerin çatlakları köprüleyebilmesi ve çatlama sonrası etkinliği sayesinde lifli beton ile üretilen betonarme kirişlerin kesme kapasitesinde önemli artışlar elde edilmiştir (Ding vd., 2011; Dinh vd., 2011; Susetyo vd., 2011; Singh ve Jain, 2014; Yoo vd., 2017; Lantsoght, 2019). Yapılan birçok çalışmada çelik liflerin belirtilen kullanım avantajları sayesinde betonarme elemanlarda kısmen veya tamamen kesme donatısı yerine kullanılabileceği sonucu ortaya konulmuştur (Narayanan ve Darwish, 1987; Khuntia vd., 1999; Kwak vd., 2002; Parra-Montesinos, 2006; Arslan, 20014; Hasgöl vd., 2019). Betonarme yapıların tasarımında yaygın olarak kullanılan ACI 318 yönetmeliğinin 2008 versiyonunda yapılan revizyon ile minimum kesme donatısına alternatif olarak çelik lif kullanımına imkan tanınmıştır (ACI 318, 2008). ACI 318 (2019)'da en kesit yüksekliği (h) 610 mm'yi geçmeyen betonarme kirişlerde minimum kesme donatısının (*etriye*) yerine betonda hacimce %0.75 oranında çelik lifin kullanılabileceği belirtilmiştir.

Ultra Yüksek Performanslı Beton (UYPB), son yıllarda betonun gelişimindeki en önemli atılımlardan biri olarak kabul edilmektedir. UYPB, geleneksel normal dayanımlı betonlar ile karşılaştırıldığında daha yüksek dayanıma, deformasyon kapasitesine, gelişmiş rijitliğe ve daha düşük gözenekliliğe sahiptir (Şekil 1.1). Geleneksel lifli betondan farklı olarak UYPB'da çok ince boyutlu malzemeler genellikle kısa ve yüksek dayanımlı çelik lifler bir arada kullanılarak çok daha yoğun bir beton matrisi elde edilmektedir. Bu sayede, çatlak

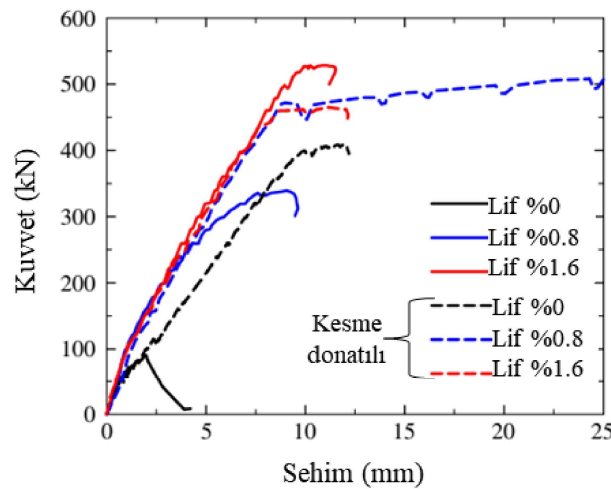
kontrol kabiliyeti, çatlak sonrası ek yük alma kapasitesi, yüksek süneklik ve durabilite gibi üstün özellikleri UYPB'un avantajlarını daha ön plana çıkarmaktadır.



Şekil 1.1: Ultra Yüksek Performanslı Beton (UYPB) ile normal dayanımlı beton (NDB) karşılaştırması (Wu vd., 2009).

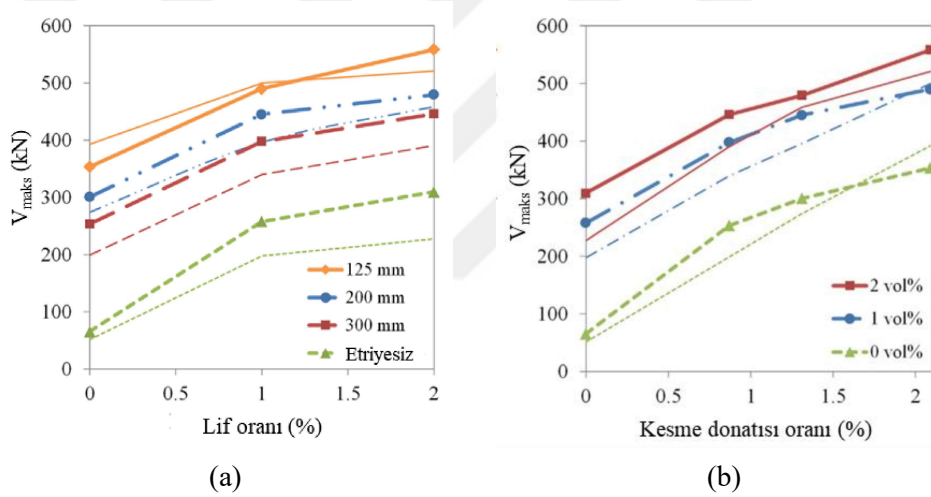
1.1 UYPB'un Betonarme Kirişlerin Kesme Davranışına Etkisi ile ilgili Çalışmalar

Pansuk vd. (2017) Yüksek Performanslı Lifli Beton (YPLB) ile üretilen I enkesitli betonarme kirişlerin kesme dayanımına çelik lif ve kesme donatısının birlikte kullanılmasının etkisini araştırmışlardır. Hazırlanan beton karışımlarında, 13/0.20 mm (boy/çap) boyutlarında mikro çelik lifler %0, %0.8 ve %1.6 olmak üzere üç farklı hacimsel oranda kullanılmıştır. Testler sonucunda çelik lif miktarının artışı ile lifsiz duruma göre kesme dayanımında önemli oranlarda artışlar elde edilmiştir. Kesme donatısı bulunmayan kirişlerde çelik lif kullanımı, lifsiz duruma göre kapasiteyi arttırmasına karşın kesme donatılı kirişlerde eğilme davranışı hakim olması nedeniyle lif ile kesme donatısının birlikte kullanımının kesme dayanımına etkisi doğrudan değerlendirilememiştir (Şekil 1.2).



Şekil 1.2: Kirişlere ait yük-sehim grafikleri; (a) Kesme donatısız, (b) Kesme donatılı (Pansuk vd., 2017).

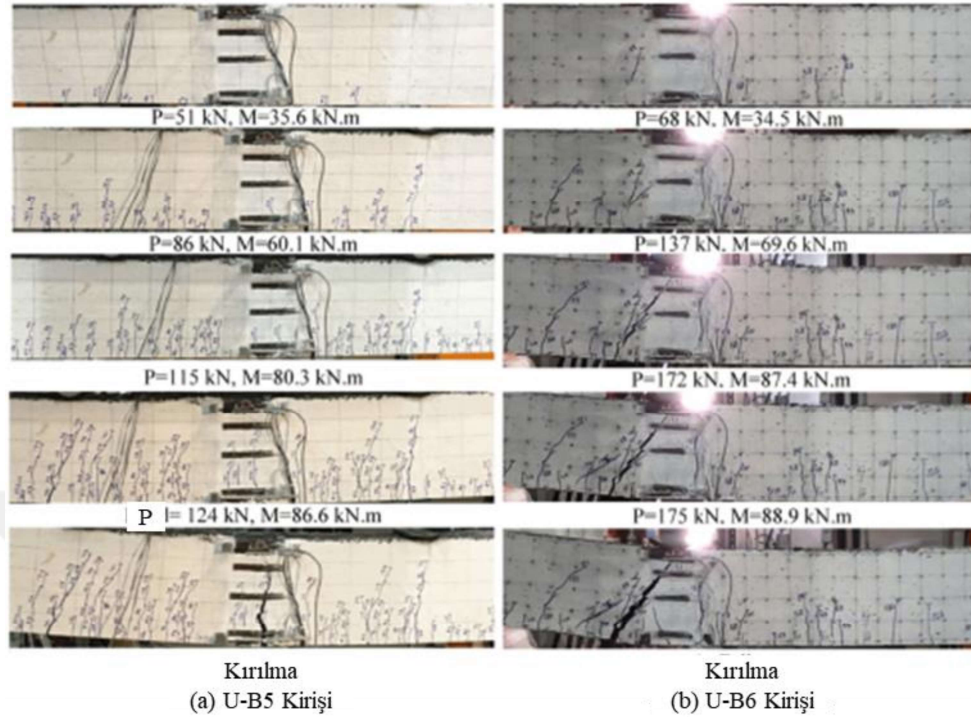
Mészöly ve Randl (2018) çalışmalarında UYPB ile üretilmiş 20 adet I enkesitli betonarme kirişi üç ve dört noktalı yükleme altında test etmişlerdir. Çalışmada, çelik lif miktarının ve kesme donatısının kirişlerin kesme davranışı üzerindeki etkileri ile bunların birlikte kullanımının kesme kapasitesi ve kırılma şekillerine etkisi deneysel olarak araştırılmıştır. UYPB karışımlarında hacimce %1 ve %2 oranlarında 15/0.2 mm (boy/çap) boyutlarında mikro çelik lifler kullanılmıştır. Test sonuçları değerlendirildiğinde kesme dayanımı açısından çelik lif kullanımının kesme donatısına göre daha etkin olduğu belirlenmiştir. Bunun yansısı, çelik lifli kirişler süneklik ve rijitlik bakımından aynı özellikteki lifsiz kirişlere göre daha iyi performans göstermiştir. Kirişlerde lif kullanımı sonucunda ilk çatlak dayanımının kesme donatılı lifsiz kirişlere göre belirgin şekilde daha yüksek olduğu belirlenirken lif miktarının artması ile çatlak genişliklerinin sınırlandığı görülmüştür (Şekil 1.3).



Şekil 1.3: a) Lif etkisi, b) Kesme donatısı etkisi (Mészöly ve Randl, 2018).

Kodur vd. (2018) Ultra Yüksek Performanslı Lifli Beton (UYPLB) kullanılarak üretilen eğilme ve kesme etkin dikdörtgen enkesitli betonarme kirişlerin davranışlarını farklı yükleme şemaları altında incelemişlerdir. UYPLB kirişler düşük donatı oranlarına (%0.9 ve %1.2) sahip olmakla birlikte kesme donatısı içermemektedir. Beton karışımında hacimce %1.5 oranında ve 13/0.2 mm (boy/çap) boyutlarında kısa düz çelik lifler kullanılmıştır. Çatlak dağılımı, kırılma modu ve yük taşıma kapasitesi gibi parametrelere göre deneysel sonuçlar değerlendirildiğinde, donatıdaki pekleşme ve kullanılan çelik lifler sayesinde yük taşıma kapasitelerinde %10 ila %20 arasında değişen artışların olduğu görülmüştür. Kesme etkin kirişlerde kesme donatısı olmamasına rağmen UYPLB'un yüksek basınç dayanımına bağlı olarak yüksek kesme dayanımı sonucunda kesme kırılması

önlenmiş ve eğilme etkin kirişlere benzer moment-eğrilik davranışları elde edilmiştir (Şekil 1.4).

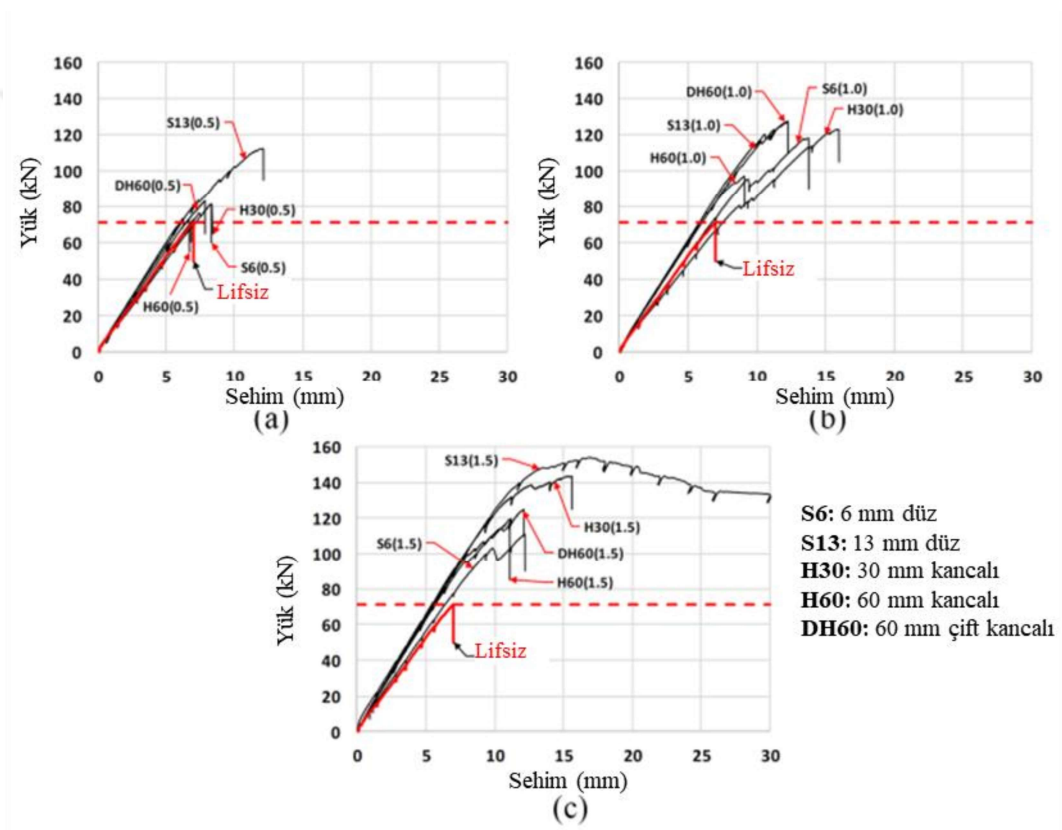


Şekil 1.4: Farklı yükleme aşamaları için UYPB kirişlerin çatlak davranışı; a) Eğilme etkin yükleme, b) Kesme etkin yükleme (Kodur vd., 2018).

Pourbaba vd. (2018) kesme donatısı bulunmayan UYPB ve normal dayanımlı beton (NDB) ile üretilen betonarme kirişlerin kesme davranışında farklı donatı oranlarının ve a/d oranlarının olası etkilerini incelemek amacıyla toplam 38 adet dikdörtgen enkesitli betonarme kiriş üretilmiş ve dört noktalı eğilme testleri gerçekleştirilmiştir. Çalışmada %2.2'den %7.8'e kadar değişen farklı donatı oranları ile 0.8, 1.2 ve 2.8'lik a/d oranları göz önünde bulundurulmuştur. UYPB'da 13 mm boyunda ve 2800 MPa çekme dayanımına sahip düz kısa çelik lifler kullanılmıştır. Kiriş testleri sonucunda UYPB içeren tüm test kirişlerinde NDB'lu kirişlere göre daha yüksek kesme dayanımları elde edilmiştir. Diğer taraftan donatı oranının artması ve a/d oranının azalmasıyla birlikte kesme dayanımının arttığı belirlenmiştir.

Ahmad vd. (2019) kesme açıklığının faydalı yüksekliğe oranı (a/d), çelik lif miktarı, boyuna donatı oranı ve etriye miktarı gibi parametrelerin UYPB kirişlerin kesme davranışına etkileri deneysel olarak incelemiştir. Çalışmada, 2.5'in altında ve üzerinde olacak şekilde iki farklı a/d oranı için toplam 10 adet betonarme kiriş üretilmiş ve dört

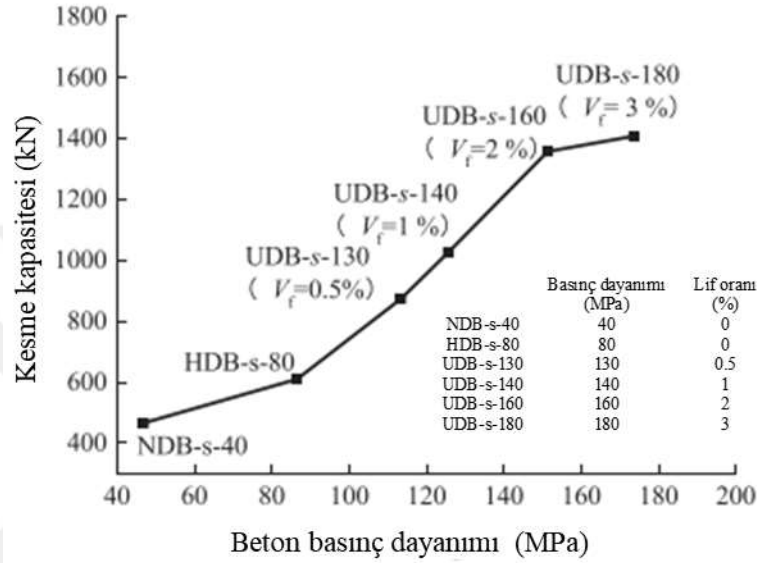
üretilmiş ve kırılma durumuna kadar dört noktali yükleme altında test edilmiştir. Test kirişlerinin kesme davranışları çatlama formu, çatlama dayanımı, nihai kesme dayanımı ve çatlama sonrası deformasyon kapasitesi bakımından tartışılmıştır. Beklendiği gibi çelik liflerin UYPB kirişlerin nihai kesme dayanımını lifsiz kirişe kıyasla önemli ölçüde artırdığı görülmüştür. Kesme dayanımına en büyük katkı 30 mm'lik kancalı lif ile elde edilirken, hacimce %1.5 oranında 13 mm'lik kısa lif kullanıldığında kirişin kırılma modu kesmeden eğilmeye dönmüştür. Çalışmada, 13 mm boyunda çelik lifin nihai dayanım açısından en etkili seçenek olduğu ve UYPB kirişlerde kesme donatısı yerine veya kesme donatısı miktarını azaltmak için kullanılabilirliği görülmüştür (Şekil 1.6).



Şekil 1.6: Test kirişlerinin hacimsel çelik lif oranlarına göre yük-sehim davranışı; a) %0.5, b) %1.0, c) %1.5 (Yavaş vd., 2019)

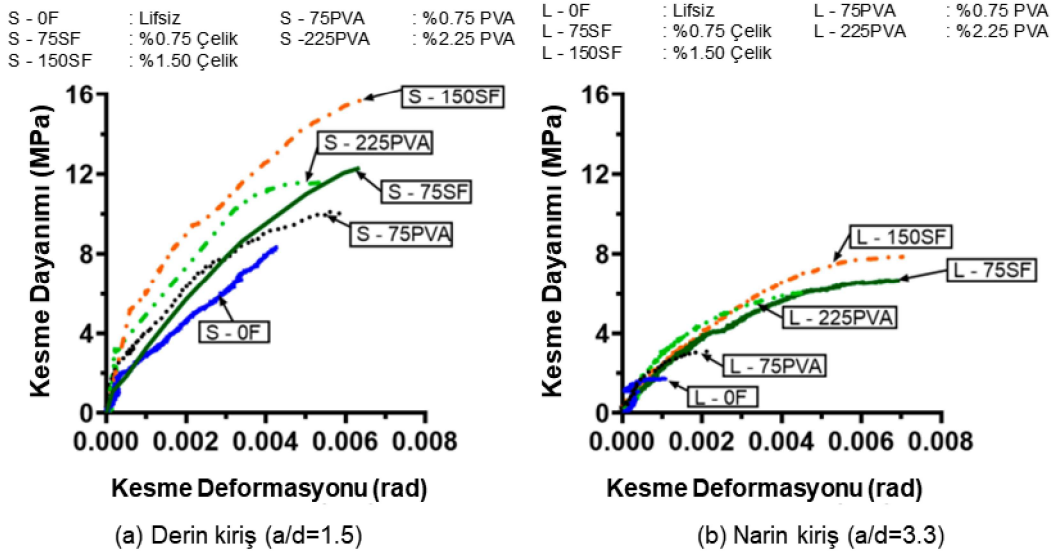
Chen vd. (2022) derin UYPB kirişlerin kesme davranışları ve kırılma modları üzerine 14 adet test kirişi için deneysel bir çalışmanın gerçekleştirmiştir. Çalışmada, a/d oranı, beton dayanımı, hacimsel çelik lif oranı, boyuna donatı oranı gibi farklı parametrelerin etkileri dikkate alınmıştır. Elde edilen sonuçlar, UYPB kirişlere ait kesme dayanımının beton dayanımı, boyuna donatı oranı, etriye oranı, gövde donatısı oranı ile arttığını, a/d oranının artmasıyla azaldığını göstermiştir. Kesme basıncı ve diyagonal basınç kırılması olarak

ikiye ayrılan derin kirişlerin göçme modlarının temel olarak a/d oranı ve beton dayanımından etkilendiği belirlenmiştir. İki kırılma modu arasında kesme basıncı kırılma türü 13 numunenin tamamında ana kırılma modu olarak ortaya çıkarken diyagonal basınç kırılması yalnızca düşük a/d oranına sahip UYPB numunesi ile 40 MPa ve 80 MPa beton basınç dayanımına sahip normal ve yüksek dayanımlı kiriş numunelerinde meydana gelmiştir (Şekil 1.7).



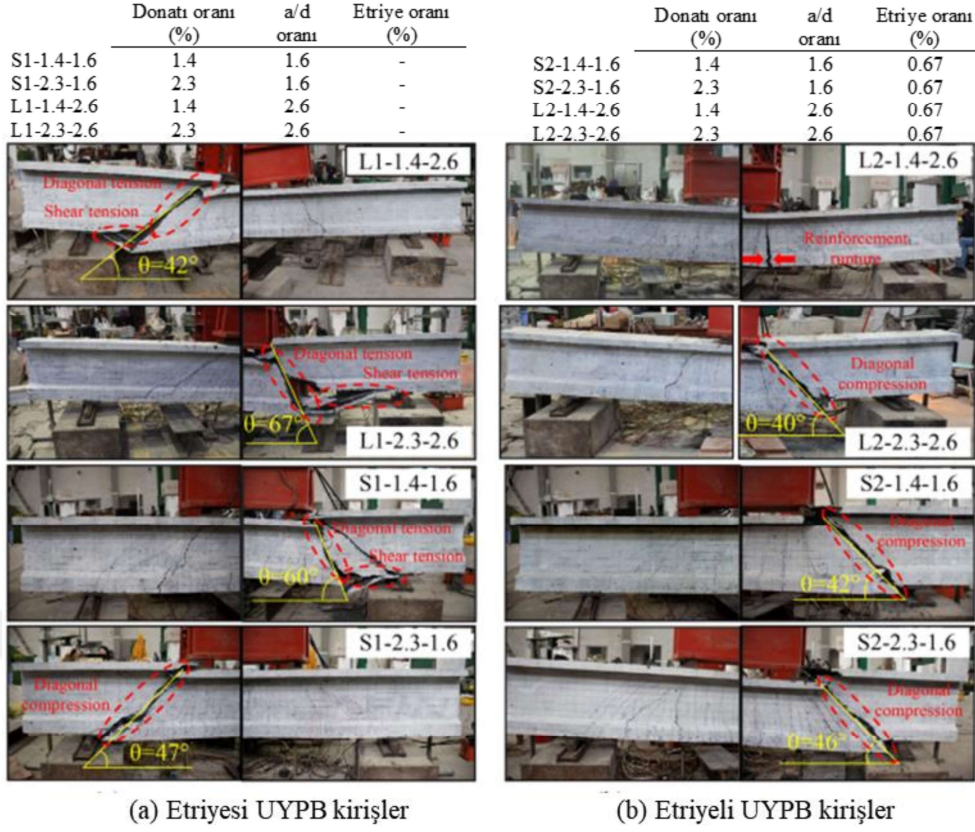
Şekil 1.7: Beton basınç dayanımının kesme kapasitesine etkisi (Chen vd., 2022).

Bermudez vd. (2022) kancalı çelik lif ile polivinil alkol (PVA) lif içeren UYPB kirişlerin kesme davranışlarını incelemişlerdir. Deneysel çalışmada a/d oranı, hacimsel lif oranı ve lif tipleri değiştirilmiştir. Dört noktalı yükleme altında test kirişleri derin kirişler ($a/d=1.5$) ve narin kirişler ($a/d=3.3$) olmak üzere iki gruba ayrılmıştır. Her iki kiriş grubu için de hacimce %0.75'lik lif kullanımının ilk kesme çatlak dayanımını ve nihai kesme dayanımını arttırdığı belirgin şekilde görülürken, lif miktarının artışı ile kesme dayanımına liflerin katkısı artış eğilimi göstermiştir (Şekil 1.8). Genel olarak PVA lifli kirişlerin kesme dayanımı ve kesme deformasyon kapasitesi ile ortalama çatlak genişliği parametreleri açısından çelik lifli kirişlerin gerisinde kaldığı görülmüştür.



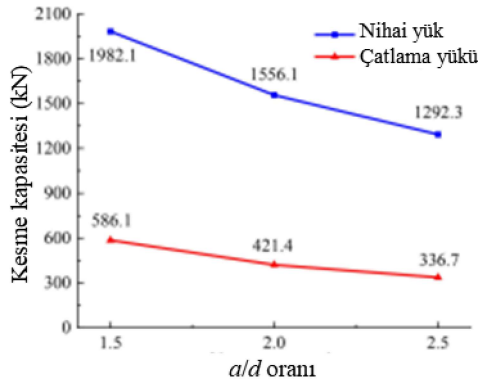
Şekil 1.8: UYPB kirişlerin kesme talebi-kesme deformasyonu ilişkisi (Bermudez vd., 2022).

Cao vd. (2022) cam elyaf takviyeli polimer donatılı UYPB kirişlerin kesme davranışını deneysel olarak incelemiştir. Çalışmada toplam 8 adet I enkesitli betonarme kiriş, farklı etriye, boyuna donatı ve a/d oranları için kırılma durumuna kadar test edilmiştir. UYPB karışımında 13/0.2 mm (boy/çap) boyutlarında düz kısa çelik lifler sabit oranda kullanılmıştır. Çalışmanın sonuçları, incelenen üç ana parametre arasında a/d oranının kirişin kesme kapasitesi üzerinde en büyük etkiye sahip olduğunu, bunu etriye oranı ve donatı oranının izlediğini göstermektedir. Etriye miktarının kiriş kesme kapasitesini ve deformasyon direncini önemli ölçüde arttırdığı görülürken, çelik liflerin düzensiz dağılımının neden olduğu gerilme yığılmalarının dayanımları azaltabildiği belirlenmiştir (Şekil 1.9). Etriye ve donatı miktarındaki artış ile çatlama sonrası rijitliğin artış gösterdiği belirlenmiştir.

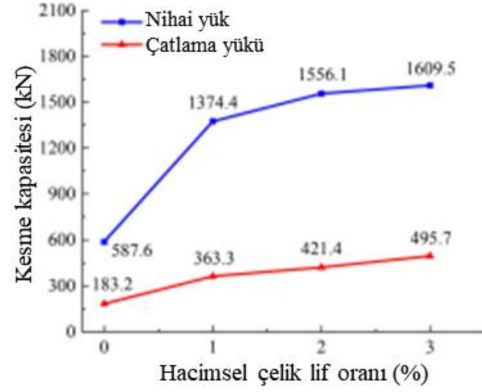


Şekil 1.9: Farklı donatı ve a/d oranları için UYPB kirişlerin kesme kırılması türlerinin karşılaştırılması (Cao vd., 2022)

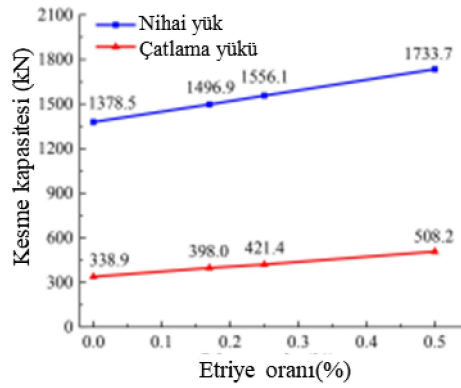
Ma vd. (2022) gerçekleştirdikleri deneysel çalışmada UYPB kirişlerin kesme davranışına çelik lif miktarının, etriye oranının ve a/d oranının etkilerini yüksek dayanımlı beton (YDB) kirişler ile karşılaştırmalı olarak incelemişlerdir. UYPB kirişlerde 13/0.2 mm (boy/çap) düz kısa çelik lifler kullanılırken, YDB kirişler lifsiz olarak üretilmiştir. Lif miktarı ve etriye oranı arttıkça, çatlakların yoğun bir şekilde dağıldığı görülürken nihai kapasite ve deformasyon kapasitesi belirgin şekilde iyileşmiştir. Test sonuçlarına göre, kiriş elemanların tasarımında çelik liflerin minimum kesme donatısı yerine kullanılabilceği görülmüştür. Bu noktada, etriye oranın azaltıldığı durumlarda bile UYPB kirişlerde tatmin edici dayanım ve deformasyon kapasiteleri elde edilebilmiştir. Küçük a/d oranları için kemerlenme etkisinin devreye girmesi ile ilk çatlak ve nihai kesme kapasitelerinde sınırlı bir artışın olduğu da görülmüştür (Şekil 1.10).



(a) a/d oranının etkisi



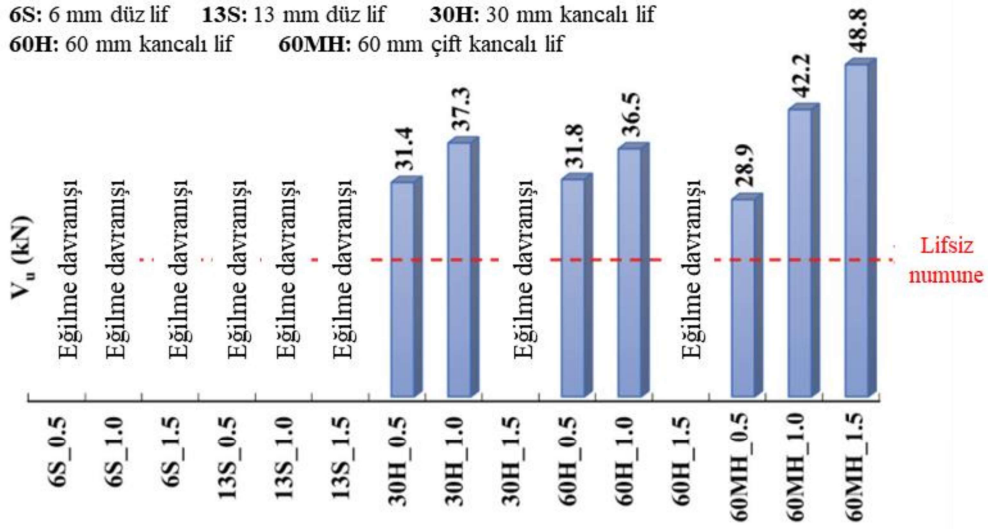
(b) Çelik lif miktarının etkisi



(c) Etriye miktarının etkisi

Şekil 1.10: Farklı parametrelerin UYPB kirişlerin çatlama ve nihai kesme dayanımına etkileri (Ma vd., 2022)

Hasgül vd. (2023) kesme etkin UYPB kirişlerde farklı çelik lif içeriklerinin etkileri ve etriye yerine tamamen çelik liflerin kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Düz ve kancalı liflerden oluşan toplam 5 farklı lif tipi ve 3 hacimsel lif oranı (%0.5, %1.0 ve %1.5) içeren toplam 15 adet UYPB test kirişi etriyesiz olarak hazırlanmış ve dört noktalı olarak yüklenmiştir. Çelik liflerin etkisi yük-sehim ilişkisi, çatlak davranışı, kırılma modları, nihai kesme dayanımı, nominal moment kapasitesi ve yerdeğiştirme sünekliği açısından tartışılmıştır. Diyagonal çekme kırılması modunun hakim olduğu UYPB kirişlerde, çelik liflerin çatlak köprüleme kabiliyeti sayesinde lifsiz referans kirişe kıyasla çatlama sonrası rijitliğin ve yük kapasitesinin önemli ölçüde arttığı belirlenmiştir. Bununla birlikte, farklı lif tiplerinin kırılma modu üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı görülmüştür. Kesme davranışının incelendiği mevcut çalışmalarda olduğu gibi, lifsiz duruma göre UYPB kirişlerin kesme dayanımları çok daha yüksek mertebelerde elde edilmiştir. Bununla birlikte lif tipinden bağımsız olarak lif arttıkça kesme dayanımının artış eğiliminde olduğu görülmüştür (Şekil 1.11).



Şekil 1.11: Test Çelik lif tipi ve miktarının UYPB kirişlerin kesme dayanımına katkısı (Hasgül vd., 2023).

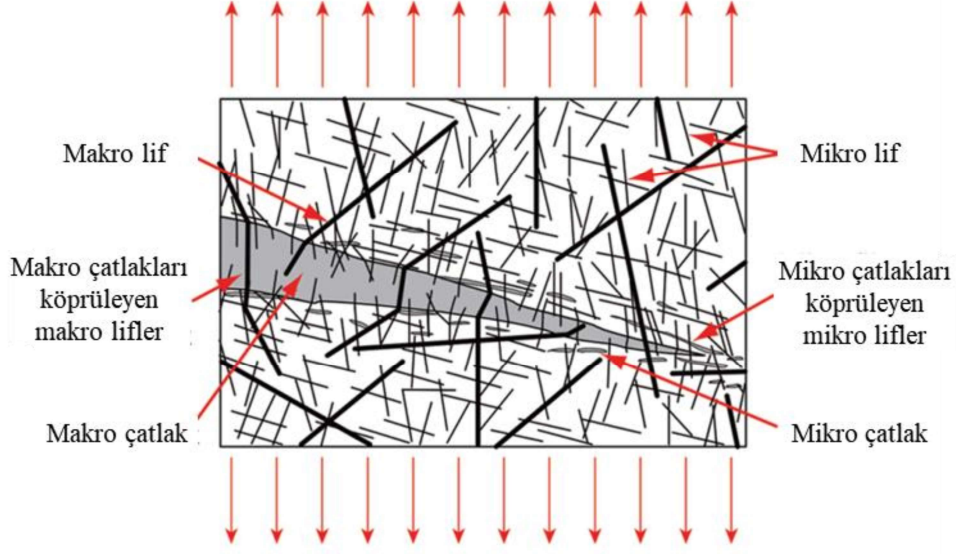
UYPB'lu betonarme kirişlerin kesme davranışına çelik lif içeriğinin etkisi ile ilgili mevcut çalışmalar değerlendirildiğinde kesme dayanımında önemli artışların elde edildiği görülmektedir. Kesme dayanımındaki artışların UYPB'da kullanılan liflerin özellikleri ve miktarı ile ilişkili olduğu görülmüştür. Çalışmalarda ayrıca, UYPB'a optimum oranda çelik lif eklenmesinin kirişlerde kesme donatısı yerine kullanılabilme veya kesme donatısı miktarını azaltma potansiyeli olduğu görülmektedir. Çoğunlukla tek tip çelik lifin farklı hacimsel oranlarda kullanıldığı deneysel çalışmalarda yüksek dayanımlı düz kısa çelik lifler tercih edilmektedir. Geleneksel lifli betonlarda kullanılan kancalı uzun liflerin de kesme davranışını iyileştirdiği bazı çalışmalarda ortaya konulmuştur. Buna karşın, birden fazla lif tipinin birlikte kullanılması sonucu ortaya çıkan sinerjik etkinin UYPB'un kesme davranışına etkileri ile ilgili çalışmaların oldukça sınırlı olduğu görülmektedir.

1.2 UYPB'da Karma Lif Kullanımı

Genel olarak lif oranının artırılması ile birlikte UYPB'un mekanik özelliklerinin geliştiği yapılan çalışmalardan görülmektedir (Abbas vd., 2015; Wang ve Geo, 2016; Wu vd., 2016; Jin vd., 2018; Wu vd., 2019; Zhang vd., 2020). Bu çalışmaların çoğunda lif tipine bağlı olarak karışım için optimum bir lif miktarı bulunduğu, bu değer üzerine çıktığında karışım sırasında liflerin kümelenmesi ve işlenebilirliğin önemli oranda azaldığı görülmüştür. Bunun sonucunda homojen olmayan lif dağılımı nedeniyle betonun iç yapısında bozulmalar ve dayanımlarda önemli kayıplar meydana gelebilmektedir (Kim vd.

2011; Yu vd. 2015; Pyo vd., 2017; Meng ve Khayat, 2018; Khayat vd., 2019). Betona sadece tek tipte (*mono*) liflerin eklenmesi, betonun sadece belirli özelliklerini geliştirebilmektedir. Betonun farklı çatlak aşamaları olduğu göz önüne alındığında tek tip lif kullanımının tüm davranışta etkili olması çoğunlukla mümkün olamamaktadır (Banthia ve Gupta 2004). UYPB'un genel performansını iyileştirmek ve gerekli lif miktarını azaltmak amacıyla çelik liflerin karma (*hibrit*) olarak kullanılması önemli bir alternatif olarak ortaya çıkmıştır (Kim vd. 2011).

Literatürde, farklı lif tiplerinin bir arada karma olarak kullanılmasının betonun mekanik özellikleri üzerindeki etkilerinin incelendiği çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Karma lif içeriği oluşturmak için mevcut yaklaşımlardan bir tanesi farklı uzunlukta çelik liflerin birlikte kullanılmasıdır (Hannawi vd., 2016; Wu vd., 2016). Şekil 1.12'de kısa (*mikro*) ve uzun (*makro*) liflerin birlikte kullanılmasına ait farklı düzeylerde çatlak köprüleme davranışı şematik olarak gösterilmiştir (Kwon vd., 2014). Eğilme davranışı açısından mono lif kullanımına göre farklı uzunlukta çelik liflerin karma olarak kullanımının sağladığı sinerjik etki nedeniyle önemli avantajları olduğu yapılan çalışmalarda ortaya konulmuştur. Burada, mikro lifler ilk çatlak sonrasında oluşan mikro çatlak genişliklerini sınırlandırarak ve yeni çatlak oluşumunu geciktirerek betonun dayanımını ve rijitliğini artırırken, makro lifler ilerleyen yük ve şekildeğiştirme seviyelerinde devreye girerek betonun deformasyon kapasitesine ve sünekliğine önemli katkı sağlamaktadır (Şekil 1.12) (Rossi vd., 2005; Banthia ve Sappakittipakron, 2007; Kim vd., 2011; Wille vd., 2011; Kwon vd., 2014). UYPB'un mekanik özelliklerine farklı geometri ve uzunluktaki çelik lifler (Sorelli vd., 2005; Kim vd., 2011; Wille vd., 2011) ile çelik liflerin sentetik lifler ile birlikte kullanımının etkileri üzerine çok sayıda çalışma yürütülmüştür (Cao vd., 2014; Li vd., 2019; Afroughsabet ve Ozbakkaloglu, 2015, Yıldırım, 2018; Caggiano vd., 2016). Karma lif kullanımının özellikle betonun çekme dayanımı ve çatlak davranışında sağladığı pozitif etkiler betonarme kirişlerin kesme davranışında önemli avantajlar sağlama potansiyeli olduğunu işaret etmektedir. Buna karşın, UYPB ile üretilmiş betonarme kirişlerin kesme davranışı üzerinde karma lif kullanımı ile ilgili çalışmaların sınırlı sayıda olduğu söylenebilir (Ma vd. 2018; Nosheen vd., 2018; Shaaban vd., 2021; Joshi vd., 2020).



Şekil 1.12: Mikro ve Makro boyutta liflerin karma kullanımını sonucu çatlak köprüleme davranışı (Kwon vd., 2014).

UYPB’da karma çelik lif içeriği genellikle farklı şekil ve uzunluktaki liflerin birlikte kullanılmasından oluşmaktadır. Burada amaç, başlangıç ve ilerleyen deformasyon aşamalarında çelik liflerin etkin olarak kullanımı ve lifler arasında oluşacak sinerjik etki ile betonun mekanik özelliklerinin iyileştirilmesidir. Aynı hacim için kısa lifler uzun liflere kıyasla sayıca daha çok olmaları nedeniyle mikro çatlakları daha verimli bir şekilde köprülerken, uzun lifler daha çok makro çatlakların gelişimini daha verimli bir şekilde sınırlayabilmektedir (Markovic, 2006). Kim vd. (2011) mikro ve makro boyuttaki çelik liflerin karma olarak kullanılmasının yerdeğiştirme ve enerji yutma kapasitesi bakımından tek tip lif kullanımına göre daha etkili olduğunu belirlemiştir. Sorelli vd. (2005) çalışmalarında farklı uzunluktaki liflerin karma kullanımının betonun tokluğunu arttırdığını belirlemişlerdir. Jiao vd. (2022), UYPB’da farklı uzunluktaki (kısa, orta ve uzun) düz çelik liflerin karma olarak kullanımını eğilme dayanımı, tokluk ve çatlak davranışı parametreleri açısından incelemişlerdir. Karışımlardaki karma lif kullanımında uzun ve orta uzunluktaki liflerin hacimsel oranının artması dayanım ve deformasyon kapasitesi açısından davranışı daha çok geliştirirken, karışımdaki kısa lif miktarının artışı tokluk ve enerji yutma kapasitesinin azalmasına neden olmuştur. Al-Osta vd. (2021) UYPB’da düz ve kancalı çelik lifleri mono ve karma olarak kullandıkları çalışmalarında kancalı lif oranı arttıkça elastisite modülü, eğilme dayanımı ve tokluk değerlerinin artış gösterdiğini belirlemişlerdir.

1.3 Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Yüksek lisans tezi kapsamında yürütülen deneysel çalışma kapsamında, farklı tipte çelik liflerin karma olarak kullanılmasının UYPB ile üretilen I enkesitli betonarme kirişlerin kesme davranışı iki aşamadan oluşan deneysel bir program çerçevesinde incelenmiştir.

Birinci aşamada, UYPB’da karma çelik lif kullanımının malzeme bazındaki etkisi temel mekanik özellikler çerçevesinde gerçekleştirilen testler ile incelenmiştir. Çalışmada tek tip lif içeren (*mono*) karışımlarda UYPB için yaygın olarak kullanılan yüksek dayanımlı mikro-düz çelik lifler kullanılmıştır. Karma lifli karışımlarda ise toplamda mono lifli karışım oranlarına eşit olacak şekilde mikro-düz ve makro-kancalı çelik lifler eşit oranda birlikte kullanılmıştır. Bunlara ek olarak karşılaştırmalarda kullanılmak üzere lifsiz (*Kontrol*) UYPB karışımı hazırlanmıştır. Mono ve karma karışımlarda %1 ve %2 olmak üzere iki farklı hacimsel lif oranı (V_f) dikkate alınmıştır. Karışımların mekanik özellikleri küp ve silindir numuneler üzerinde gerçekleştirilen aksenal basınç ve yarmada çekme testleri ile belirlenmiştir. Karışımların eğilme davranışları için çentikli prizmatik kiriş numunelerin üç noktalı yükleme testleri gerçekleştirilmiştir. Testler sonucunda mono ve karma çelik lif kullanımı basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, eğilmede çekme dayanımı ve kırılma enerjisi parametreleri açısından karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

Çalışmanın ikinci aşamasında, UYPB’lu kirişlerin kesme davranışını irdelemek amacıyla mono ve karma çelik lifli UYPB karışımları kullanılarak toplam 5 adet I enkesitli betonarme kiriş üretilmiş ve kesme etkin yükleme altında test edilmiştir. Test kirişlerinin sadece bir açıklığına kesme donatısı yerleştirilmiştir. Böylece kesme hasarının kesme donatısız diğer bölgede gerçekleşmesi sağlanmıştır. Farklı çelik lif içeriğinin UYPB’un kesme davranışına etkisi kesme dayanımı, çatlak davranışı ve kırılma modu parametreleri açısından değerlendirilmiştir. Prizmatik ve I enkesitli kirişlerin eğilme testleri sırasında çatlakların oluşumu ve ilerleyişi numunelere yerleştirilen fiziksel ölçerler dışında 2 Boyutlu Dijital Görüntü Korelasyon (2B-DGK) tekniği kullanılarak ayrıca incelenmiştir.

2. DENEYSEL PROGRAM

2.1 Ultra Yüksek Performanslı Beton (UYPB) Karışımları

Çalışmada kullanılan UYPB karışımlarını oluşturan malzemeler ve oranları Tablo 2.1’de sunulmuştur. Karışımlarda ana bağlayıcı olarak CEM I 42.5 sınıf Portland çimentosu kullanılmıştır. Çimentoya ek olarak silis dumanı ve yüksek fırın cürufu diğer bağlayıcı malzemelerdir. Parçacık boyutu analizlerinde silis dumanı ve yüksek fırın cürufu için maksimum boyutlar sırasıyla 52 ve 59 mikron olarak belirlenmiştir. Agregalar maksimum dane çapı 0.2 mm olan kuvars kumu kullanılmıştır. Akışkanlığını artırmak için polikarboksilat eter bazlı süper akışkanlaştırıcı katkı kullanılmıştır. Karışımlarda %1 ve %2 olmak üzere iki farklı hacimsel lif oranı (V_f) göz önüne alınmıştır. Tek tip lif tipi içeren (*mono*) karışımlarda 13 mm uzunluğunda mikro-düz çelik lifler kullanılırken karma lifli karışımlarda mikro lifler ile 30 mm uzunluğunda makro-kancalı çelik lifler hacimce eşit oranlarda kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan çelik lifler Şekil 2.1’de gösterilmiştir. Çelik liflere ait geometrik ve mekanik özellikler Tablo 2.2’de sunulmuştur. UYPB karışımlarını oluşturan malzemelerin 1 m³ beton için ağırlıkça karışım oranları Şekil 2.2’de grafiksel olarak sunulmuştur.

Tablo 2.1: UYPB karışımlarının içerikleri (kg/m³).

Karışım	Kontrol	Mono1.0	Mono2.0	Karma1.0	Karma2.0
Çimento	700	700	700	700	700
Silis dumanı	170	170	170	170	170
Yüksek fırın cürufu	300	300	300	300	300
Kuvars	1030	1005	980	1005	980
Su	200	200	200	200	200
Katkı	17	17	17	17	17
Çelik lif	-	78 (Mikro)	156 (Mikro)	39+39 (Mikro+Makro)	78+78 (Mikro+Makro)



(a)

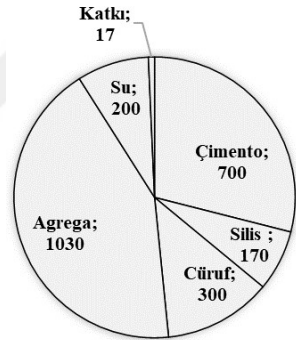


(b)

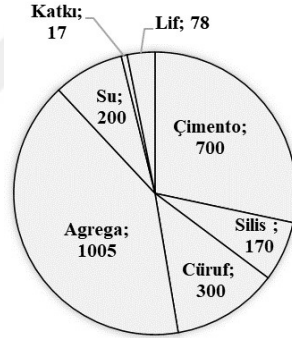
Şekil 2.1: Çelik lifler; a) Mikro-düz lifler, b) Makro-kancalı lifler.

Tablo 2.2: Kullanılan çelik liflerin özellikleri.

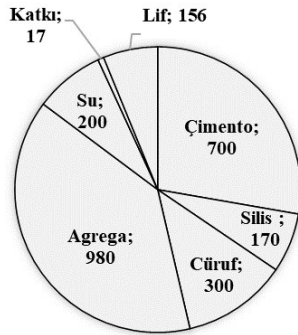
Tipi	Uzunluk (mm)	Çap (mm)	Narinlik Oranı	Çekme Dayanımı (MPa)
Micro-düz	13	0.16	81	2500
Makro-kancalı	30	0.55	55	1345



a) V_f : %0



b) V_f : %1.0



c) V_f : %2.0

Şekil 2.2: UYPB karışımlarının karşılaştırılması (kg/m^3).

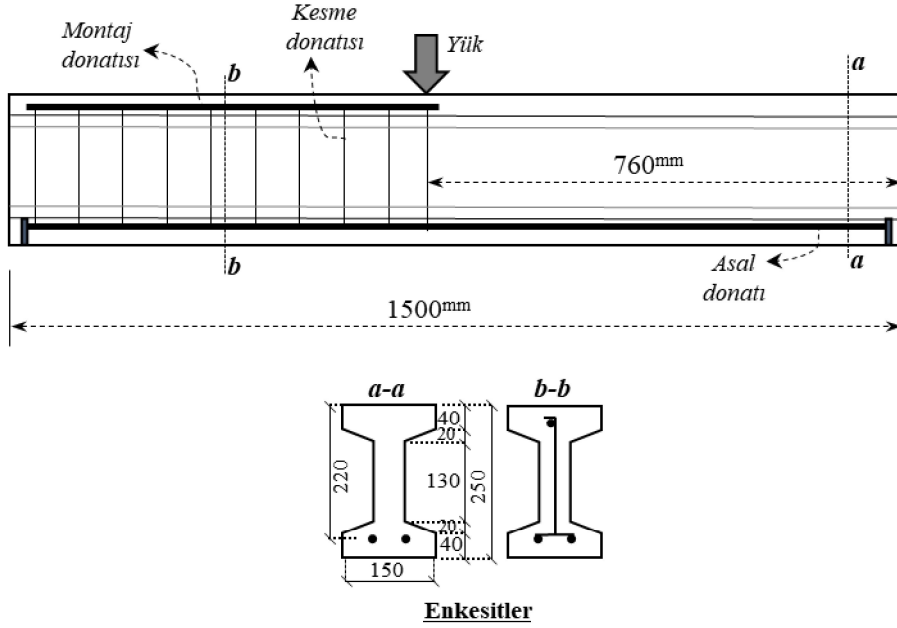
2.2 Test Numunelerinin özellikleri

2.2.1 Mekanik Özelliklerin Belirlenmesinde Kullanılan Test Numuneleri

UYPB karışımlarının mekanik özellikleri basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, eğilmede çekme dayanımı ve kırılma enerjisi parametreleri açısından değerlendirilmiştir. Basınç dayanımlarının belirlenmesi için aksel basınç testlerinde kullanmak amacıyla 100×100×100 mm boyutlarında küp numuneler kullanılmıştır. Bunun yanında yarmada çekme testleri için 100×200 mm (çap×boy) boyutlarında silindir numuneler hazırlanmıştır (EN 12390-1, 2021). Karışımların EN 14651+A1 (2007) standardına göre gerçekleştirilecek üç noktalı eğilme testleri için 150 mm×150 mm×550 mm boyutlarında prizma numuneler kullanılmıştır. Numunelerin açıklık ortasında döküm tarafına dik yüzeyde 2 mm genişliğinde ve 25 mm derinliğinde bir çentik oluşturulmuştur.

2.2.2 I Enkesitli Betonarme Kirişlerin Özellikleri

I enkesitli test kirişlerinin enkesit boyutları 150×250 mm ve toplam boyu 1500 mm'dir. Kirişler iki açıklık meydana getirmek amacıyla tek noktadan yüklenmiştir. Bu açıklıkların bir tanesine kesme davranışının incelenebilmesi amacıyla etriye yerleştirilmezken, diğer açıklıkta oluşması muhtemel kesme hasarının önlenmesi amacıyla yeterli miktarda tek kollu etriye kullanılmıştır (Şekil 2.3). Etriyeler alt tarafta asal donatılara, üst tarafta ise 8 mm çapındaki montaj donatısına kaynaklanmıştır (Şekil 2.4). Böylece kesme davranışının sadece ölçümlerin yapılacağı bölgede olması sağlanmıştır. Kani (1967)'nin klasik teorisi ve önceki benzer çalışmalara dayanarak 2.5'e karşılık gelen kesme açıklığı/faydalı yükseklik oranı (a/d) betonarme kirişlerin kesme kırılması modu için kritik bir değer olarak kabul edilmektedir. Çok düşük a/d oranlarında ($a/d < 1.5$) test edilen betonarme kirişlerde dikme hareketi (*strut action*) veya kemer hareketi (*arch action*) mümkündür. 2.5 ila 6 arasındaki a/d oranları için, eğilme çatlağı sonrasında artan diyagonal kayma gerilmeleri nedeniyle kesmeli eğilme modunda olası kırılmalar meydana gelebilmektedir. Bu nedenle, bu çalışmada kemer hareketinden kaçınmak ve I enkesitli kirişlerde diyagonal kesme kırılması modunu sağlamak için a/d oranı 3 olarak dikkate alınmıştır. Tüm kirişlerde yüksek çekme donatısı oranı (0.057) sağlayacak şekilde 2 adet $\phi 20$ donatı kullanılmıştır (Şekil 2.3). Donatıların dayanımlarının belirlenmesi amacıyla numuneler alınarak aksel çekme testleri gerçekleştirilmiştir. Testler sonucunda donatılara ortalama akma ve çekme dayanımları sırasıyla 465 MPa ve 563 MPa olarak belirlenmiştir.



Şekil 2.3: I enkestli kirişe ait detaylar.



Şekil 2.4: I enkesitli kiriş için imalatı tamamlanmış donatı düzeni.

2.3 Betonun Hazırlanması ve Test Numunelerinin Üretimi

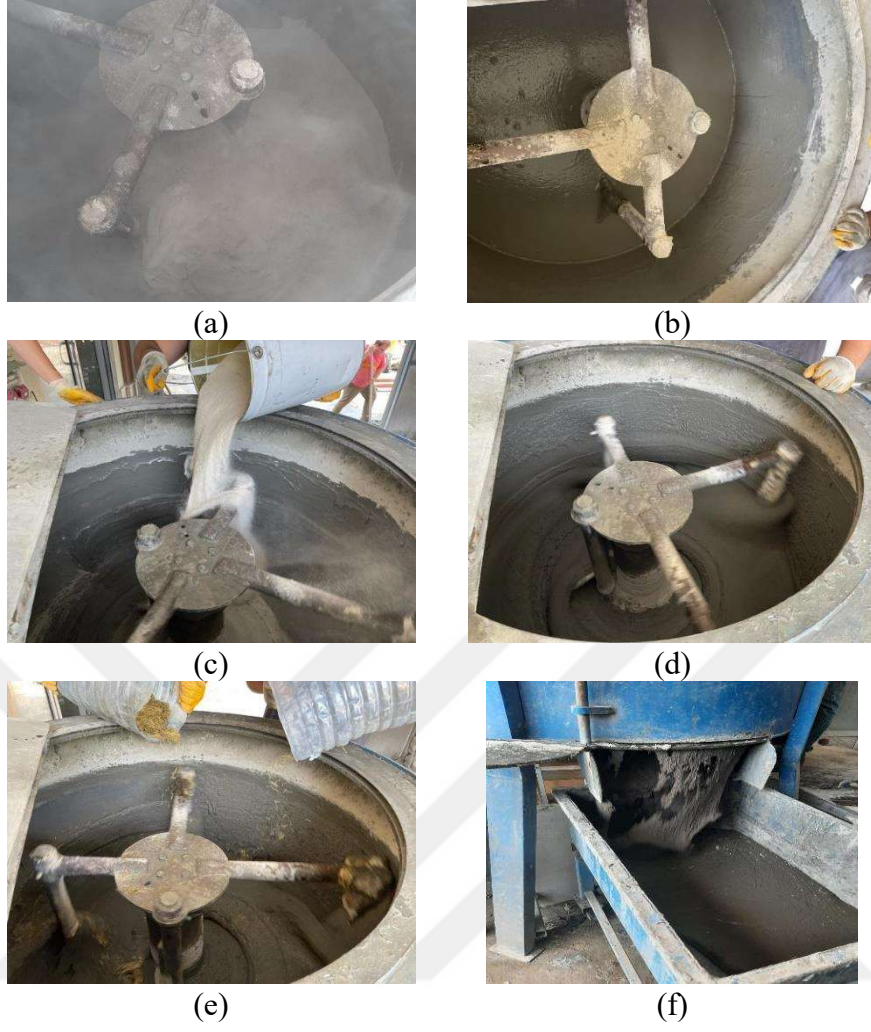
UYPB'un hazırlanması için özel olarak tasarlanmış 100 dm³ kapasiteli bir panmikser kullanılmıştır (Şekil 2.5). Öncelikle betonun bağlayıcı kısmını oluşturan toz malzemeler (*çimento, silis dumanı ve yüksek fırın cürufu*) panmiksere yerleştirilerek karıştırma işlemine başlanmaktadır (Şekil 2.6a). Toz malzemelerin homojen karışımı sağlandıktan sonra süper akışkanlaştırıcı katkının yarısı karışım suyuna eklenerek panmiksere dökülmektedir. Ardından katkının geri kalan kısmı yavaş yavaş karışıma eklenerek akıcı bir kıvam elde edilene kadar işleme devam edilmektedir (Şekil 2.6b). Bu aşamada kuvars kumu düşük hızda dönen panmiksere yavaş yavaş eklenmekte ve sonrasında devir arttırılmaktadır (Şekil 2.6c-2.6d). Son olarak lifli karışımlarda çelik liflerin eklenmesi gerekmektedir. Liflerin beton içinde kümelenmesini engellemek amacıyla lifler yavaş yavaş karışıma eklenmektedir (Şekil 2.6e). Tüm malzemelerin eklenmesi sonrasında

liflerin üniform dağılımı ve akıcı kıvam gözle kontrol edilerek beton döküm aracına alınmaktadır (Şekil 2.6f).

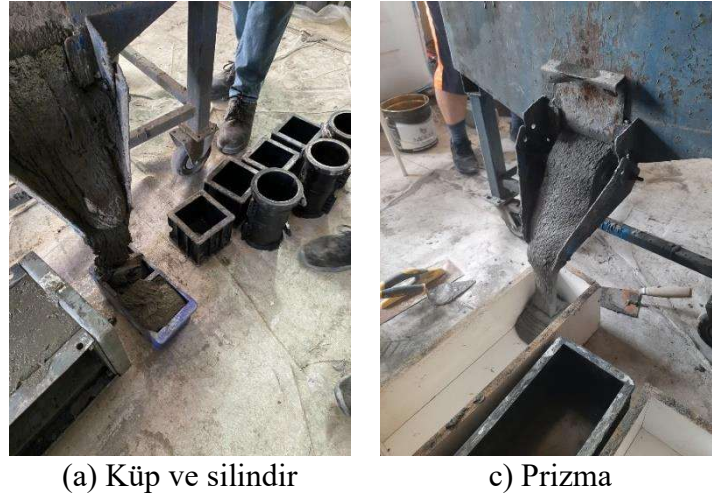


Şekil 2.5: Panmikser ve döküm aracı.

Test numuneleri için hazırlanan kalıplar döküm aracının altına yerleştirilmiş ve betonun serbest olarak akmasına izin vererek kalıpların dolması sağlanmıştır. Küp, silindir ve prizma numunelerinin hazırlanışı Şekil 2.7’de gösterilmiştir. Her karışımdan toplam 6 adet küp, 3 adet silindir ve 3 adet prizma numune alınmıştır. I enkesitli kirişlerin üretiminde döküm aracı kiriş kalıbının ucuna getirilerek kapağı açılmış ve betonun serbest olarak akarak kalıba yerleşmesi sağlanmıştır (Şekil 2.8). Numunelerin üretiminde lif dağılımını olumsuz etkileyebileceği nedeniyle sarsma tablası veya vibrasyon uygulaması gerçekleştirilmemiştir.



Şekil 2.6: Panmikser ve döküm aracı.



Şekil 2.7: Test numunelerinin üretimi.



Şekil 2.8: I enkesitli kiriş üretimi.

Beton dökümü tamamlanan numuneler su kaybının önlenmesi amacıyla plastik örtü ile örtülerek 24 saat bekletilmiştir (Şekil 2.9). Sonrasında kalıptan çıkarılan numuneler laboratuvar ortamında test gününe kadar bekletilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 2.9: a) Beton dökümü tamamlanan test numuneleri, b) Test numunelerinin kürlenmesi.

2.4 Test Düzenekleri

2.4.1 Eksenel Basınç Test Düzeneği

Eksenel basınç testlerinde 2000 kN kapasiteli beton presi kullanılmıştır (şekil 2.10). Testler EN 12390-3 (2019) standardına uygun şekilde y k kontrollü olarak gerçekleştirilmiştir. UYPB numunelerinin eksenel basınç testlerinde çok yüksek yük değerlerine çıkılması gerekmektedir. Bu nedenle yükleme hızı test sürelerini azaltmak için Graybeal ve Davis (2008)'de önerildiği şekilde 1MPa/sn olarak uygulanmıştır. Cihaz, yükleme hızını sabit tutacak şekilde yük artışı sağlayarak numuneler kırılana kadar devam ettirebilmektedir. Test sonunda numunelerin kırılma yükleri hem değer olarak hem de grafiksel olarak elde edilebilmektedir.



şekil 2.10: Eksenel basınç test düzeneği.

2.4.2 Yarmada ekme Test Düzeneği

Yarmada ekme testleri EN 12390-6 (2009) standardına göre gerçekleştirilmiştir. Silindir numuneler yükleme düzeneğine yatay olarak merkezlenerek yerleştirilmiş, numunenin altında ve üzerinde bulunan rijit başlıklar ile boy kesit boyunda çizgisel bir basınç kuvveti uygulanmıştır (şekil 2.11). Yükleme, düzeneğin içerisine yerleştirildiği beton presi yardımıyla y k kontrollü olarak gerçekleştirilmiştir (şekil 2.11). Testlerde yükleme hızı (R) Bağıntı 2.1 ile hesaplanmıştır (EN 12390-6, 2009). Burada L numunenin boyu (mm), d numunenin çapı (mm) ve s ise gerilme artış hızını (MPa/s) ifade etmekte ve 0.04 MPa/s ile 0.06 MPa/s aralığında sabit değer olarak alınmaktadır.

$$R = \frac{s \times \pi \times L \times d}{2} \quad (2.1)$$



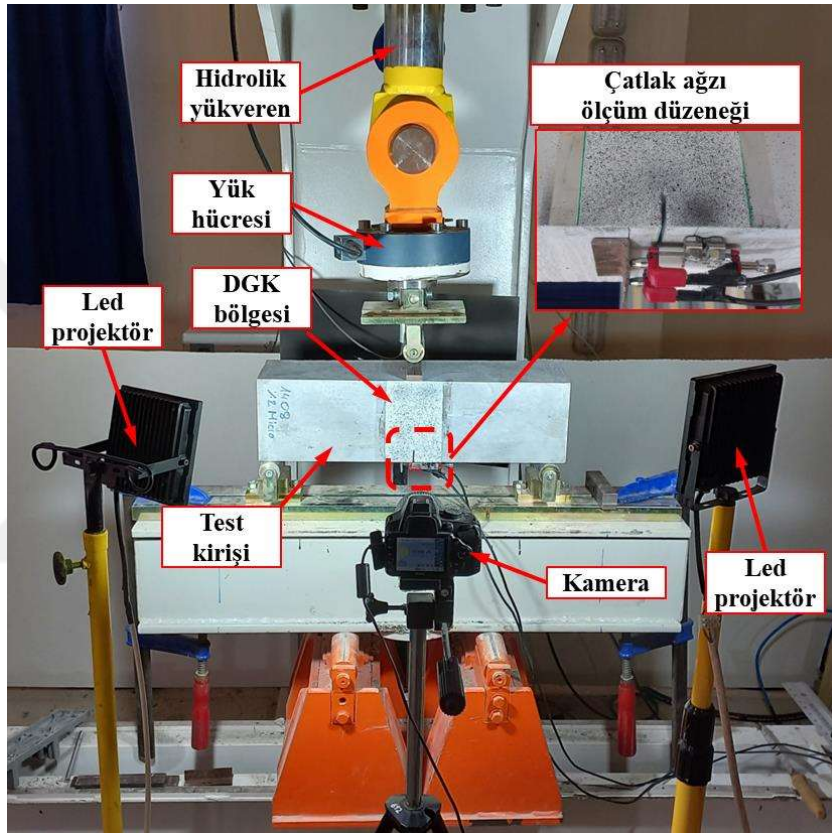
Şekil 2.11: Yarmada çekme test düzeneği.

2.4.3 Prizma Eğilme Test Düzeneği

Prizma numunelerinin üç noktalı eğilme testleri EN 14651+A1 (2007) standardına göre gerçekleştirilmiştir. Boyutları 150 mm×150 mm×550 mm olan çentikli prizmalar mesnetler arası mesafe 500 mm olacak şekilde iki adet döner silindirin üzerine basit mesnetli şekilde yerleştirilmiştir (Şekil 2.12). Yükleme, 500 kN kapasiteli servo hidrolik güç ünitesinin kontrol ettiği yükveren ile açıklık ortasında uygulanmıştır. Testler yükverene yerleştirilen bir potansiyometrik cetvel (PC) yardımıyla deformasyon kontrollü olarak gerçekleştirilmiştir. Testler boyunca yükverenin ilerleme hızı 0.05 mm/dak olacak şekilde sabit tutulmuştur. Çentik ağzındaki açılmanın ölçülmesi amacıyla kirişlerin alt yüzeyine çentik bölgesini içine alacak şekilde iki adet potansiyometrik cetvel yerleştirilmiştir (Şekil 2.12).

Üç noktalı eğilme testlerinde prizma numunelerinin yüzeylerinde meydana gelen deformasyonları incelemek için 2 Boyutlu Dijital Görüntü Korelasyonu (2B-DGK) metodu kullanılmıştır. DGK metodunun temel prensibi gelişigüzel benekleme yapılmış ilgi alanında (AOI) test başında çekilen deforme olmamış referans görüntüdeki beneklerle testin ilerleyen aşamalarında deforme olan görüntülerdeki beneklerin izlenmesine dayanmaktadır. İlgili yüzeydeki deformasyonlar görüntünün kalibrasyonuna dayalı olarak orijinal ve deforme olmuş benek kümelerinin koordinatları arasındaki mesafelerin ölçümüne bağlı olarak belirlenmektedir (Wu vd., 2011; Srikar vd., 2016; Rasheed ve Prakash, 2018; Bhowmik ve Ray, 2019). Şekil 2.12’de prizma numuneler için kullanılan

2B-DGK test düzeneği gösterilmiştir. Test düzeneği 1024×768 piksel çözünürlüğe sahip dijital fotoğraf makinası ve iki adet led projektörden oluşmaktadır. Prizma numunelerin açıklık ortasında 100 mm genişliğinde ve 150 mm yüksekliğinde bir bölge inceleme alanı olarak belirlenmiştir. Bu bölgeye önce mat beyaz spreylenmiş, ardından mat siyah spreylenmiş boya kullanılarak gelişigüzel benek deseni oluşturulmuştur (Şekil 2.12). Test süresince 10 sn aralıklarla fotoğraflar çekilmiş ve sonrasında görüntüler GOM Correlate 2019 yazılımı kullanılarak analiz edilmiştir.

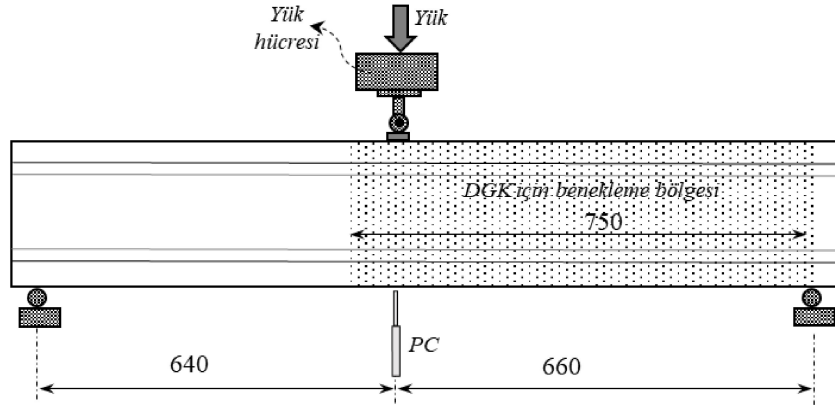


Şekil 2.12: Prizma numuneleri için üç noktalı eğilme test düzeneği.

2.4.4 Betonarme Kiriş Test Düzeneği

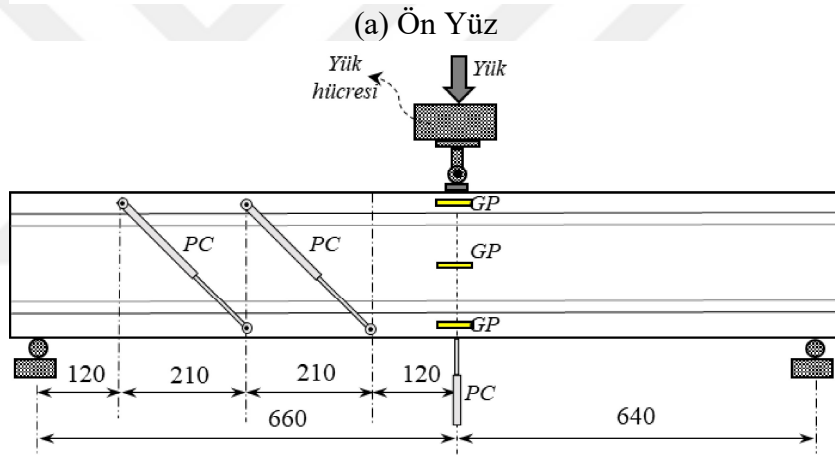
2B-DGK metodunun uygulanması için I enkesitli kirişin ön yüzünde etriye bulunmayan açıklığı kapsayacak şekilde mesnetten itibaren 750 mm'lik bir bölgeye gelişigüzel benek deseni uygulanmıştır (Şekil 2.13a). 2B-DGK için ön yüzden görüntü alınacağı için ve benek deseninin engellenmemesi amacıyla mekanik ölçerler kirişin arka yüzüne yerleştirilmiştir. Kirişin arka yüzünde yüklemenin yapıldığı en kesite 3 adet gerinim pulu (GP) yerleştirilmiştir (Şekil 2.13b). Gerinim pulları düşeyde başlıkların merkezine ve gövdenin ortasına yerleştirilmiştir. Oluşması muhtemel kesme çatlaklarının açılmasını

ölçmek amacıyla 45°'lik açıyla iki adet potansiyometrik cetvel kesme açıklığına yerleştirilmiştir (Şekil 2.13b). Kirişin arka yüzüne yerleştirilen ölçerler Şekil 2.14'te sunulmuştur.



GP: Gerinim pulu
PC: Potansiyometrik cetvel

(Ölçüler: mm)



GP: Gerinim pulu
PC: Potansiyometrik cetvel

(Ölçüler: mm)

(b) Arka Yüz

Şekil 2.13: I enkesitli kirişlere yerleştirilen ölçerlerin detayları.



Şekil 2.14: Kirişin arka yüzüne yerleştirilen ölçerler.

Yükleme noktasında asal donatılardaki şekildeğişirmeleri ölçmek amacıyla her iki donatıya da gerinim pulu yapıştırılmıştır. Donatılara gerinim pulu yapıştırılması aşamaları Şekil 2.15'te gösterilmiştir.



Şekil 2.15: Asal donatılara yerleştirilen ölçerler.

I enkesitli kirişlerin eğilme testleri 500 kN kapasiteli servo hidrolik güç ünitesine bağlı üç noktalı yükleme düzeneğinde gerçekleştirilmiştir (Şekil 2.16). Test kirişleri sol ucu kayıcı, sağ ucu ise sabit mesnete yerleştirilmiş ve kirişlere yükleme noktasından tekil kuvvet uygulanmıştır. Testler sırasında uygulanan kuvvet pistonun ucuna yerleştirilen yassı tip yük hücresi ile belirlenmektedir. Kirişin yükleme noktasındaki sehimini (*düşey yerdeğiştirme*) ölçmek amacıyla kirişin alt yüzeyine bir adet 150 mm ölçüm kapasiteli

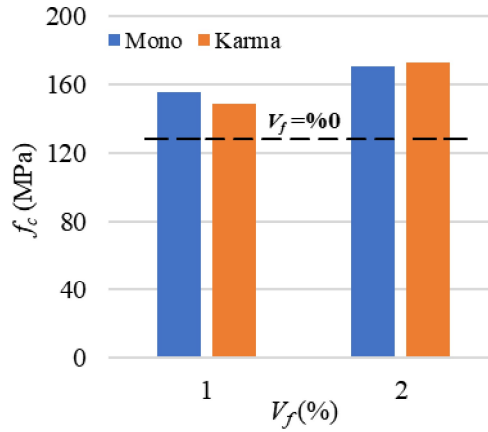
3. DENEYSEL ÇALIŞMANIN SONUÇLARI

3.1 Eksenel Basınç Testleri

Beton dökümünden bir gün sonra kalıptan çıkarılan küp numuneler doğal ortam koşulları altında kürlenmiş ve 28 gün sonra eksenel basınç testleri gerçekleştirilmiştir. Her bir karışım için ortalama basınç dayanımı (f_c), EN 12390-3 (2019) standardına uygun olarak test edilen 6 adet numunenin ortalaması alınarak hesaplanmıştır. Karışımlara ait ortalama basınç dayanımları Tablo 3.1’de sunulmuştur. Lif içeriklerine göre karışımların basınç dayanımlarının değişimi Şekil 3.1’de grafiksel olarak gösterilmiştir. Beklendiği gibi lif kullanımı sonucu lifsiz Kontrol karışımına ($V_f=0$) göre basınç dayanımında artış trendinin olduğu görülmektedir. Hacimce %1 oranında lif kullanılan mono ve karma lifli UYPB karışımlarında dayanım artışının Kontrol karışımına göre sınırlı olduğu (maksimum %11), %2 lif oranı için ise belirgin bir dayanım artışının olduğu (yaklaşık %23) belirlenmiştir. Bununla birlikte basınç dayanımı açısından mono ve karma çelik lif kullanımının belirgin bir farkının olmadığı görülmektedir (Şekil 3.1).

Tablo 3.1: Karışımlara ait ortalama basınç dayanımları.

	Kontrol	Mono1.0	Karma1.0	Mono2.0	Karma2.0
f_c (MPa)	140	156	149	171	173



Şekil 3.1: Lif içeriklerine göre karışımların basınç dayanımlarının değişimi.

Lif içermeyen Kontrol karışımından üretilen numuneler yük taşıma kapasitelerine ulaştıklarında oldukça gevrek bir şekilde kırılırken numunelerin birçoğunda şiddetli bir patlama gerçekleşmiştir. Lifli numunelerde ise yük taşıma kapasitesine ulaşıldığında kırılma gerçekleşmesine rağmen numunenin bütünlüğü korunabilmiştir (Şekil 3.2).



Şekil 3.2: Küp numunelerin kırılma şekilleri; a) Lifsiz, b) Lifli.

3.2 Yarmada Çekme Testleri

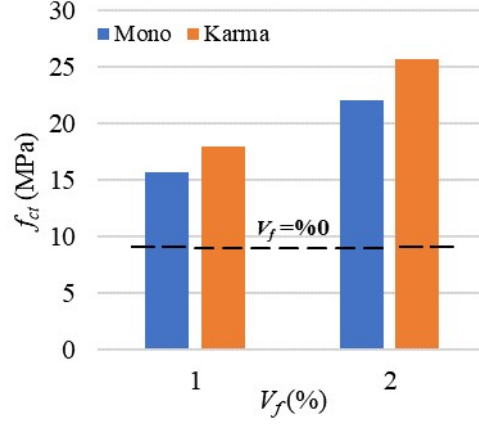
Her bir UYPB karışımı için üretilen 3 adet silindir numunesinin EN 12390-6 (2009) standardına göre yarmada çekme testleri gerçekleştirilmiştir. Test edilen silindir numunelerin kırılma yükleri (F) belirlenmiş ve Bağıntı 3.1'e göre yarmada çekme dayanımları (f_{ct}) belirlenmiştir (EN 12390-6, 2009). Bağıntıda L silindir numunenin boyunu ve d numunenin çapını ifade etmektedir.

$$f_{ct} = \frac{2 \times F}{\pi \times L \times d} \quad (3.1)$$

Karışımlara ait ortalama yarmada çekme dayanımları Tablo 3.2'de sunulmuştur. Beklendiği gibi çelik lif kullanımı sonucu lifsiz duruma göre yarmada çekme dayanımları belirgin şekilde artmıştır. Hacimce %1.0 lif içeren Mono1.0 ve Karma1.0 karışımları için lifsiz Kontrol karışımına göre sırasıyla 1.7 ve 2 kat dayanım artışı elde edilirken lif oranı %2.0'ye çıktığında mono ve karma karışımlarda sırasıyla 2.4 ve 2.9 kat gibi belirgin artışlar elde edilmiştir. Yarmada çekme dayanımının lif içeriğine bağlı değişimi Şekil 3.3'te grafiksel olarak sunulmuştur. Mono ve karma lifli karışımlar kendi içlerinde değerlendirildiğinde hacimce %1 ve %2 lif oranları için karma lifli karışımların mono liflilere göre yaklaşık 1.2 kat daha iyi performans gösterdiği belirlenmiştir (Şekil 3.3).

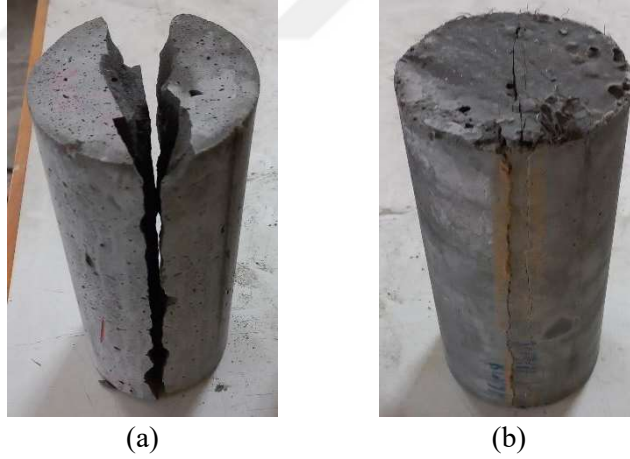
Tablo 3.2: Karışımlara ait ortalama yarmada çekme dayanımları.

	Kontrol	Mono1.0	Karma1.0	Mono2.0	Karma2.0
f_{ct} (MPa)	9.0	15.7	18.0	22.0	25.7



Şekil 3.3: Lif içeriklerine göre UYPB'un yarmada çekme dayanımının değişimi.

Yarmada çekme testleri sonucunda lifsiz ve lifli silindir numunelerin tipik kırılma durumları Şekil 3.4'te gösterilmiştir. Lifsiz numunelerde kırılma yüküne ulaşıldığında gevrek bir kırılma gerçekleşerek numune yükleme düzleminde yarıp iki parçaya ayrılmaktadır (Şekil 3.4a). Lifli numunelerde ise mono veya karma lif içeriğinden bağımsız olarak yükleme düzlemi boyunca çatlak oluşmakta fakat liflerin köprüleme özelliği nedeniyle numunenin bütünlüğü korunmaktadır (Şekil 3.4b).



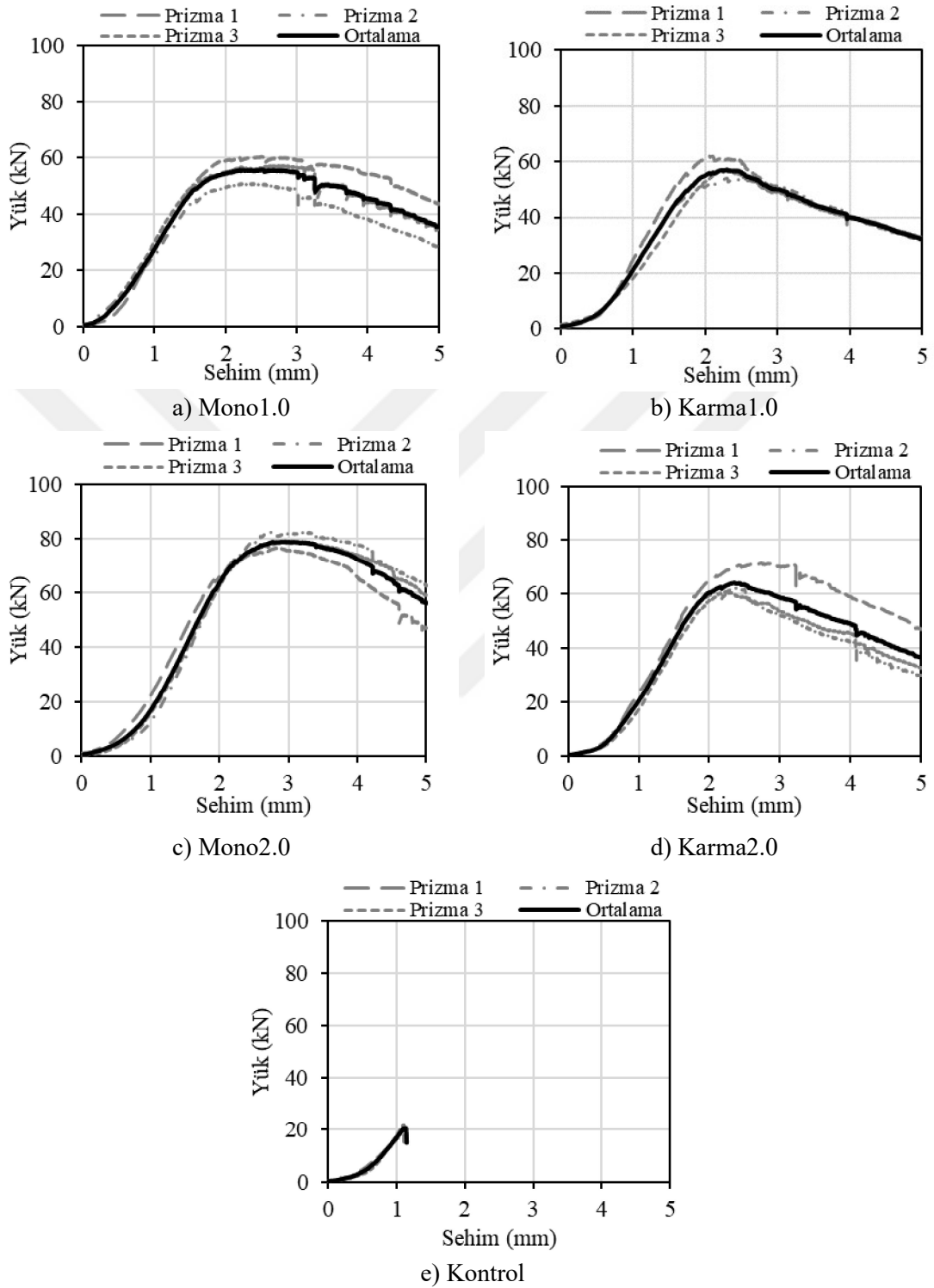
Şekil 3.4: Silindir numunelerin kırılma şekilleri; a) Lifsiz, b) Lifli.

3.3 Prizma Eğilme Testleri

3.3.1 Yük-Sehim Davranışı

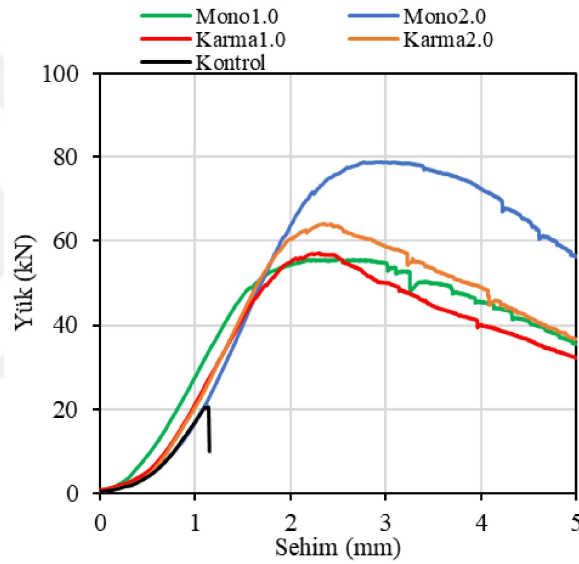
Her bir UYPB karışımı için 3 adet çentikli prizma numunesi üç noktalı yükleme altında EN 14651+A1 (2007) standardına göre test edilmiş ve elde edilen yük-sehim grafikleri Şekil 3.5'te sunulmuştur. Test edilen 3 adet prizmanın ortalama yük-sehim davranışı grafikleri üzerinde koyu renkli olarak ayrıca gösterilmiştir (Şekil 3.5). Ölçerlerin kapasiteleri göz

önüne alınarak testler 5 mm sehîm değeri geçildikten sonra bitirilmiştir. Karışımlara ait ortalama yük-sehîm grafikleri ise karşılaştırmalı olarak Şekil 3.6'da sunulmuştur.

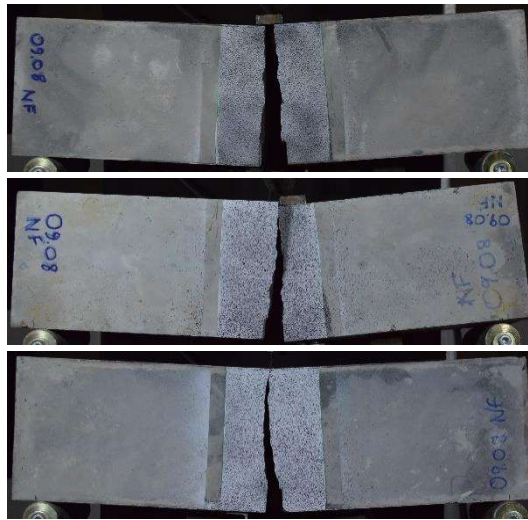


Şekil 3.5: Prizma numunelerin yük-sehîm grafikleri.

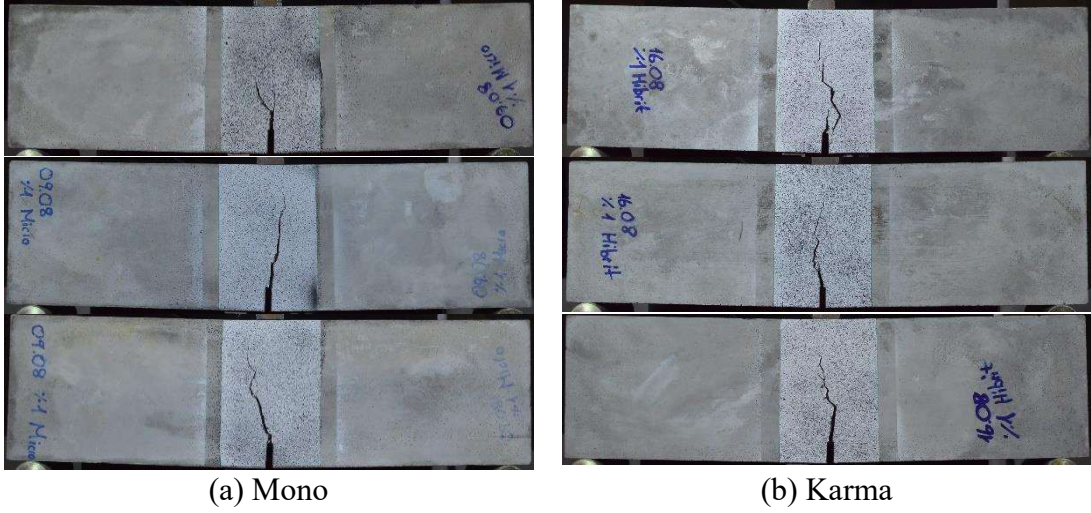
Lif içermeyen Kontrol karışıma ait prizma numunelerinde ilk çatlak oluşuktan hemen sonra ani bir kırılma meydana gelmiş ve numune çentik noktasından iki parçaya ayrılarak test sona ermiştir. Kontrol prizma numunelerinin kırılma modları Şekil 3.7’de sunulmuştur. Lifli numunelerde ise tepe noktasına ulaşıldıktan sonra artan sehim değerleri için yük değerlerinin kademeli olarak azaldığı görülmektedir (Şekil 3.6). Liflerin çatlakları köprüleme kabiliyeti nedeniyle tüm lifli numunelerde çatlak sonrası ani göçme meydana gelmemiş, yük taşıma kapasitesine ulaşılan kadar deformasyonlar artarak devam etmiştir. Lifli karışımlara ait prizma numunelerinin testlerin sonlandırıldığı 5 mm sehim değerine karşılık gelen çatlak şekilleri hacimsel lif oranlarına (V_f) göre Şekil 3.8 ve Şekil 3.9’da sunulmuştur. Beklenildiği gibi tüm numunelerde çentik bölgesinde çatlak oluşumu başlamış, bu çatlak genişleyerek ve ilerleyerek davranış devam etmiştir (Şekil 3.8-3.9).



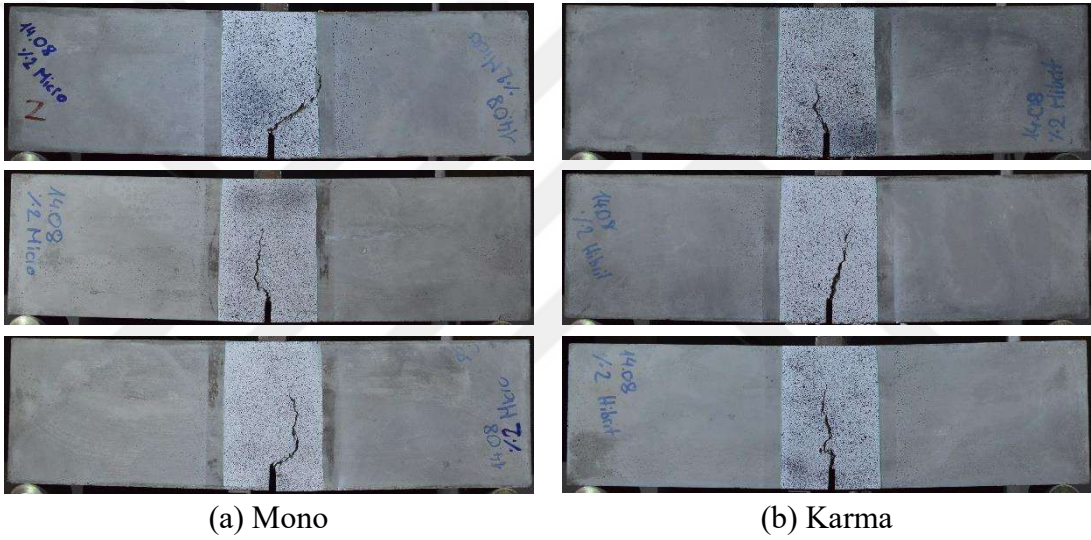
Şekil 3.6: Eğilme testleri sonucu elde edilen ortalama yük-sehim grafikleri.



Şekil 3.7: Kontrol karışımına ait prizmaların çatlak şekilleri.



Şekil 3.8: Hacimce %1.0 lif içeren karışımlara ait prizmaların çatlak şekilleri.



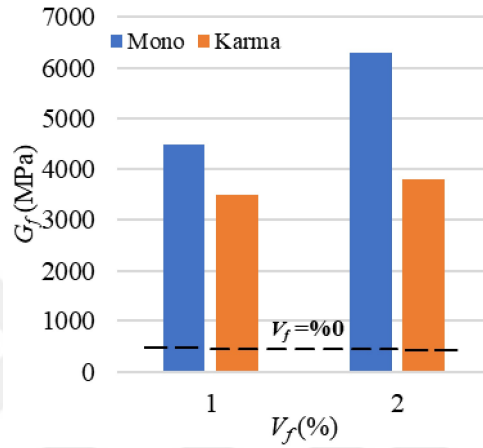
Şekil 3.9: Hacimce %2.0 lif içeren karışımlara ait prizmaların çatlak şekilleri.

Kırılma enerjisi (G_f) numunede birim çatlak oluşturmak için gereken enerji olarak tanımlanmakta ve betonun enerji yutma kapasitesini, sünekliğini ve çatlama direncini belirlemek için kullanılmaktadır. RILEM TC-50 FMC (1985)'ye göre G_f değerleri Bağntı (3.2) ile hesaplanmaktadır. Bağntı (3.2)'de w_0 deneysel yük-deformasyon eğrisi altında kalan alandır. m kirişin ve yükleme düzeneğinin makineye bağlı olmayan ancak kırılmaya kadar kirişi takip eden kısmının mesnetler arasında kalan toplam kütesidir. g yerçekimi ivmesi, δ kırılmanın son aşamasında kirişin deformasyonu, b ve h_{sp} ise sırasıyla kiriş enkesit genişliği ve çentik yüksekliği hariç enkesit yüksekliğidir. Karışımlara ait ortalama yük-sehim grafikleri dikkate alınarak tepe yüküne kadar bölge için G_f değerleri hesaplanmış ve Tablo 3.3'te verilmiştir. Lif içeriklerine göre UYPB'un G_f değerlerinin değişimi grafiksel olarak Şekil 3.10'da sunulmuştur.

$$G_f = \frac{w_0 + m \times g \times \delta}{b \times h_{sp}} \quad (3.2)$$

Tablo 3.3: Karışımların tepe yükü için hesaplanan kırılma enerjisi (G_f) değerleri.

	Kontrol	Mono1.0	Karma1.0	Mono2.0	Karma2.0
G_f (N/m)	458	4474	3483	6285	3795



Şekil 3.10: Lif içeriklerine göre karışımların kırılma enerjilerinin değişimi.

Beklenildiği gibi çelik lif kullanımı sonucu lif içermeyen Kontrol karışımına kıyasla tüm UYPB karışımlarında G_f değerlerinin belirgin şekilde arttığı görülmektedir (Tablo 3.3). Mono lifli karışımlarda lifsiz duruma göre hacimce %1 ve %2 lif oranları için sırasıyla 9.8 ve 13.7 kat artış elde edilirken, karma lifli karışımlarda 7.6 ve 8.3 kat artış olduğu belirlenmiştir. Lif oranındaki artış ile birlikte mono lifli karışımlarda G_f belirgin artış gösterirken karma lifli karışımlarda bu etkinin sınırlı olduğu belirlenmiştir (Tablo 3.3). Sonuç olarak mono lif kullanımının kırılma enerjisi bakımından genel olarak daha iyi sonuç verdiği görülmektedir.

3.3.2 Yük-Çatlak Ağız Açıklığı Yerdeğiştirmesi (ÇAAY) Davranışı

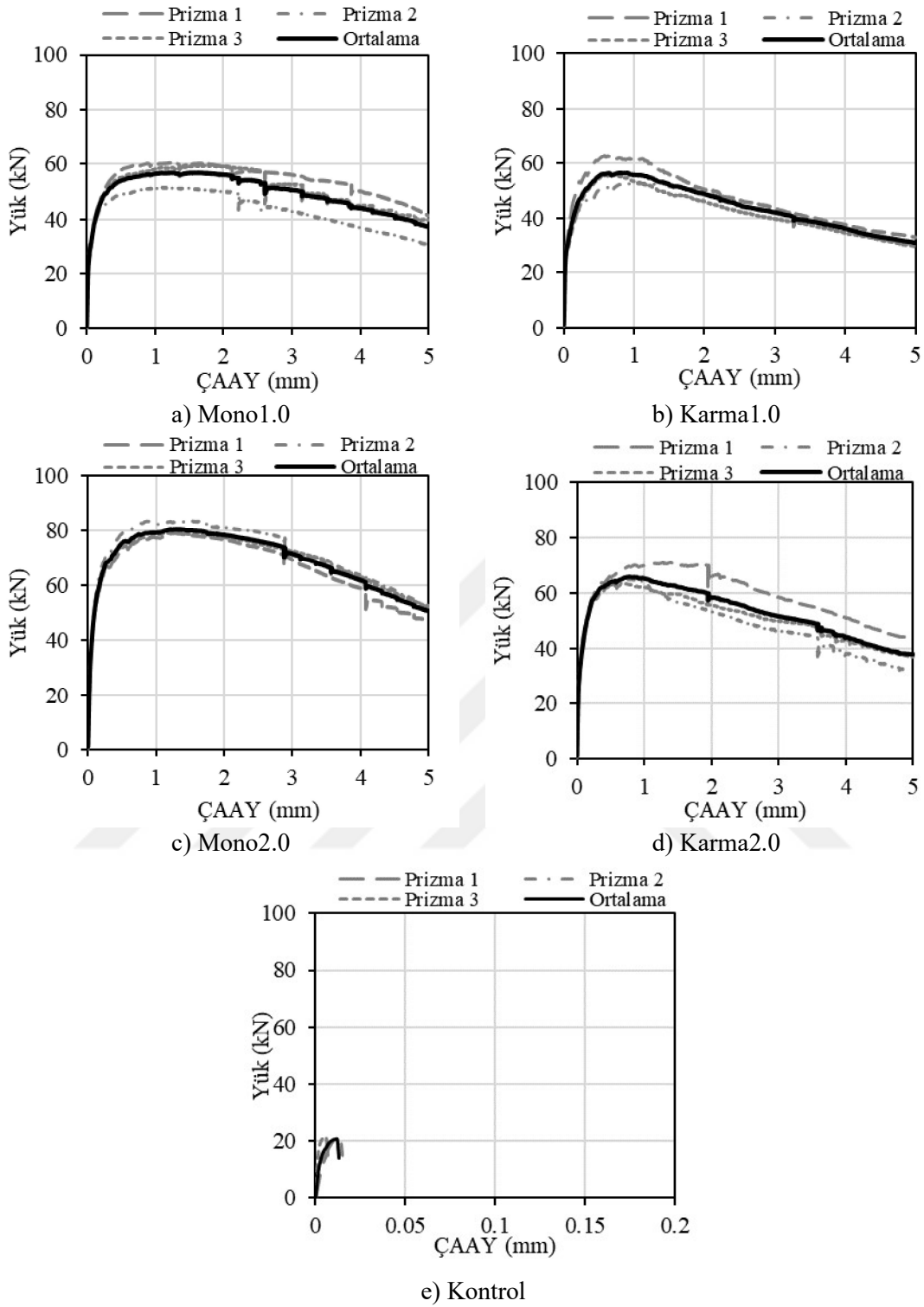
UYPB karışımları için test edilen prizma numunelerinin yük-çatlak ağız açıklığı yerdeğiştirmesi (ÇAAY) grafikleri Şekil 3.11’de gösterilmiştir. Her bir karışım için 3 numunenin davranışının ortalaması alınarak ortalama yük-ÇAAY davranışları elde edilmiş ve Şekil 3.11’de kalın çizgilerle gösterilmiştir. Elde edilen ortalama davranışlar karşılaştırmalı olarak Şekil 3.12’de ayrıca sunulmuştur. Testler sırasında ölçerlerin ölçüm kapasitesi nedeniyle 5 mm’lik ÇAAY değerine kadar veri alınabilmiştir. ÇAAY değerleri

numunelerin çentik altı bölgesine yerleştirilen iki adet ölçerden elde edilen ölçümlerin ortalaması alınarak hesaplanmıştır. Yük-sehim ilişkisine benzer şekilde Kontrol karışımında ilk çatlak sonrası davranış kırılma sonucu grafikte ani yük düşüşü ile sona ermiştir (Şekil 3.11e). Tüm lifli prizma numunelerinde ilk çatlak sonrası rijitlikte azalma ile grafikte eğim değişikliği meydana gelmiş, bununla birlikte tepe yüküne kadar dayanım artışı devam etmiştir. Tepe yükünden sonra dayanım azalması başlayarak testin sonuna kadar yükte düşüş devam etmiştir (Şekil 3.11a-d).

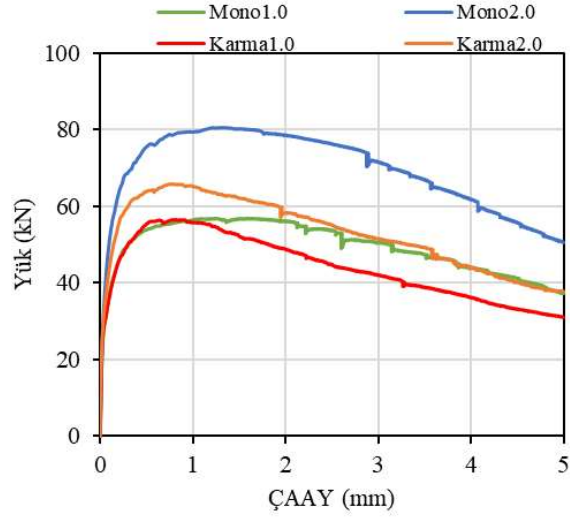
Bilindiği gibi çelik lif içeren UYPB numunelerinde çatlama sonrası lifler devreye girerek dayanım artışı kapasiteye ulaşılan kadar devam etmektedir. Sehim sertleşmesi (*deflection hardening*) olarak adlandırılan bu davranışta ilk çatlak oluşumunun belirlenmesinde kullanılan bir yöntem de yük-deformasyon grafiğinde eğimin değiştiği noktanın grafiksel olarak belirlenmesidir (Yoo vd., 2013; Guo vd., 2022). Şekil 3.13'te ortalama yük-ÇAAY grafikleri kullanılarak her bir karışım için çatlamanın olduğu nokta grafiksel olarak belirlenmiştir. Görüldüğü gibi çelik lif içeren tüm karışımlarda ilk çatlak sonrası dayanım artışının devam ettiği sehim sertleşmesi davranışının hakim olduğu görülmektedir (Şekil 3.13).

Prizma numunelerinin yük-ÇAAY grafikleri kullanılarak UYPB karışımlara ait ortalama eğilmede çekme dayanımları (f_R) EN 14651+A1 (2007)'e göre Bağıntı (3.3) kullanılarak hesaplanmıştır. Bağıntı (3.3)'de P açıklık ortasından uygulanan kuvvet, L mesnetler arası mesafe, b kiriş enkesit genişliği ve h_{sp} ise çentik derinliği çıkarılmış enkesit yüksekliğini göstermektedir (EN 14651+A1, 2007).

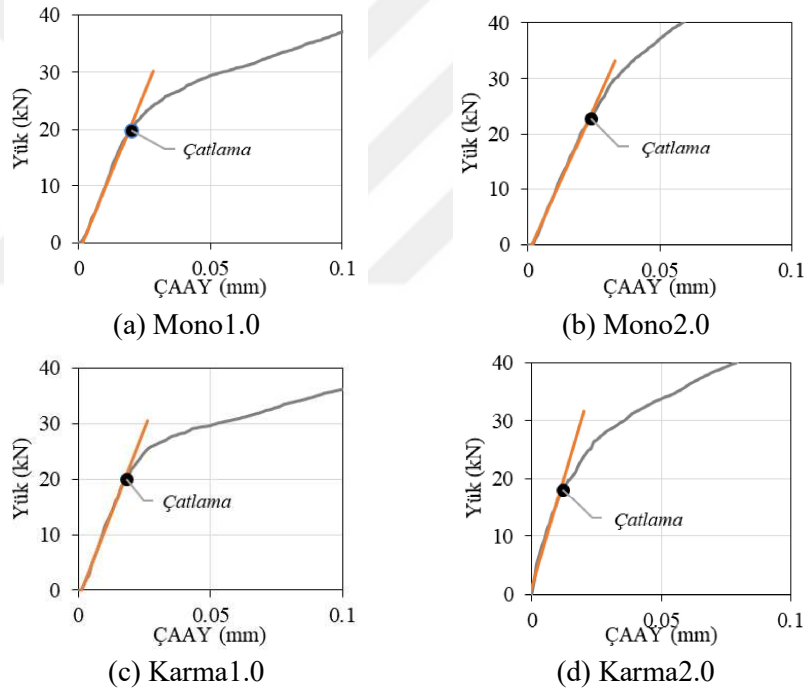
$$f_{Rj} = \frac{3 \times P \times L}{2 \times b \times h_{sp}^2} \quad (3.3)$$



Şekil 3.11: Eğilme testleri sonucunda elde edilen yük-ÇAAY grafikleri.



Şekil 3.12: UYPB karışımların ortalama yük-ÇAAY grafikleri.



Şekil 3.13: UYPB karışımların ortalama yük-ÇAAY davranışları için çatlama noktasının belirlenmesi.

Eğilmede çekme dayanımı f_{Rj} değerleri sırasıyla EN 14651+A1 (2007)'de belirtilen 0.5, 1.5, 2.5 ve 3.5 mm'lik ÇAAY değerine karşılık gelen karakteristik dayanımlar ($j=1, 2, 3, 4$) olarak tanımlanmakta ve Bağıntı (3.3) ile hesaplanmaktadır. Sehim yumuşaması gösteren numunelerden farklı olarak sehim sertleşmesi hakim davranışta yük-ÇAAY davranışında çatlamanın oluştuğu ana karşılık gelen orantılılık sınırını dayanım (f_{RL}) değeri grafikte eğim değişiklik meydana geldiği yük değeri belirlenerek hesaplanmıştır (Şekil 3.13). Tablo

3.4'te UYPB karışımlarına ait ortalama yük-ÇAAY davranışları için karakteristik dayanımlar sunulmuştur. EN 14651+A1 (2007)'deki noktalara ek olarak maksimum yüke karşılık gelen dayanımlarda (f_{Rmaks}) hesaplanmış ve Tablo 3.4'te verilmiştir. Yük-ÇAAY davranışındaki karakteristik noktalara göre lif içeriğinin etkisi Şekil 3.14'te grafiksel olarak karşılaştırılmıştır.

Tablo 3.4: Karakteristik noktalara ait eğilmede çekme dayanımları.

	Kontrol		Mono1.0		Mono2.0		Karma1.0		Karma2.0	
	ÇAAY (mm)	f_R (MPa)	ÇAAY (mm)	f_R (MPa)	ÇAAY (mm)	f_R (MPa)	ÇAAY (mm)	f_R (MPa)	ÇAAY (mm)	f_R (MPa)
LOP	0.01	6.65	0.02	6.37	0.02	7.29	0.02	6.42	0.01	5.79
ÇAAY ₁	-	-	0.50	17.24	0.50	23.85	0.50	17.72	0.50	20.43
ÇAAY ₂	-	-	1.50	18.17	1.50	25.66	1.50	16.69	1.50	19.89
ÇAAY ₃	-	-	2.50	17.21	2.50	24.44	2.50	14.36	2.50	17.66
ÇAAY ₄	-	-	3.50	15.19	3.50	21.45	3.50	12.46	3.50	15.77
MAKS.	-	-	1.25	18.20	1.30	25.81	0.82	18.10	0.78	21.08

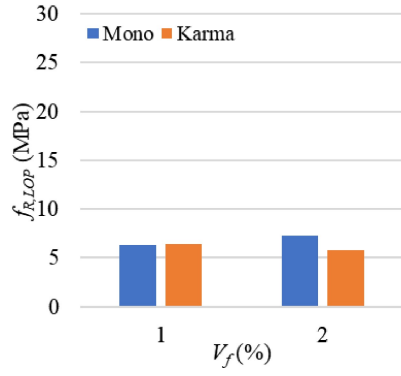
UYPB karışımların ortalama eğilmede çekme dayanımları (f_R) karşılaştırıldığında genel olarak çatlama dayanımı (f_{RL}) açısından belirgin bir fark olmadığı görülürken hacimce %2.0 mono lif kullanımı sonucu lifsiz duruma göre yaklaşık %10'luk bir artış olduğu belirlenmiştir (Tablo 3.4). Lifsiz karışım için çatlama sonrası dayanım ve deformasyon kapasitesi sona ererken lifli karışımlarda lif içeriğine göre farklı davranışların olduğu görülmüştür. Çatlama dayanımı (f_{RL}) açısından en iyi performans hacimce Mono2.0 karışımında elde edilmiştir.

Model Code 2010 (2013)'da lifli betonun çatlama sonrası dayanımını sınıflandırmak için, *Kullanılabilirlik Sınır Durumu* (KSD) için 0.5 mm ve *Taşıma Gücü Sınır Durumu* (TGSD) için 2.5 mm ÇAAY değerlerine karşılık gelen dayanımlar dikkate alınarak doğrusal bir elastik davranış varsayımı yapılmıştır. KSD için %1.0 lif içeren Mono1.0 ve Karma1.0 karışımlarında sırasıyla 17.24 ve 17.72 MPa'lık dayanımlar elde edilirken lif miktarı %2.0'a çıktığında dayanımlar mono ve karma lifli karışımlar için sırasıyla 1.4 ve 1.2 kat artışlar elde edilmiştir. Bu sınır durum için en iyi performans %2.0 mono lif içeriği için elde edilmiştir (Şekil 3.14b). TGSD için karışımların eğilme performansları karşılaştırıldığında mono lifli karışımların daha iyi performans gösterdiği belirlenmiştir (Şekil 3.14d). Hacimce %1.0 lif oranı için mono ve karma lifli karışımlar arasında

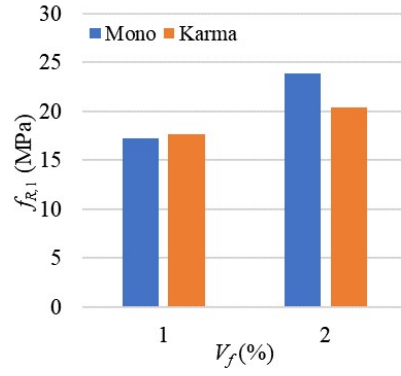
dayanımlar arasında belirgin bir farkın olmadığı görülürken mono lifli karışım daha iyi performans göstermiştir. Lif oranı %2.0 için dayanımlar belirgin şekilde artarken Mono2.0 ve Karma2.0 karışımlarında sırasıyla 24.44 MPa ve 17.66 MPa dayanım değerleri elde edilmiştir. Sonuçlar %2.0 mono lif kullanımının göz önüne alınan her iki sınır durum içinde en iyi performansı gösterdiğini ortaya koymuştur (Şekil 3.14).

Yük-ÇAAY ilişkisinde maksimum yük değerlerine karşılık dayanımlar (f_{Rmaks}) Şekil 3.14f'de karşılaştırılmıştır. Diğer karakteristik noktalara benzer şekilde lif miktarının artışı ile dayanımlarda da artış trendi olduğu görülmektedir. Mono1.0 ve Karma1.0 karışımları için maksimum dayanımda belirgin bir fark gözlenmezken hacimce %2.0 lif oranı için mono lif kullanımının karma life göre 1.2 kat daha iyi performans gösterdiği belirlenmiştir. Maksimum yüke karşılık elde edilen ÇAAY değerleri karşılaştırıldığında karma lifli karışımlarda mono liflilere oranla hacimce %1.0 ve %2.0 lif oranları için sırasıyla %35 ve %40 arasında daha düşük çatlak açıklıkları elde edilmiştir.

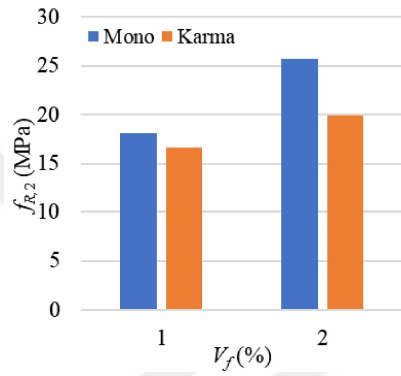
Prizma numunelerinin her biri için test boyunca belirli aralıklarla fotoğraflar çekilmiş ve GOM Correlate (2019) yazılımı ile 2B-DGK analizleri gerçekleştirilmiştir. 2B-DKG uygulamasının deneysel veriler ile uyumunu belirleyebilmek için yazılım yardımıyla her kirişin çentik bölgesine sanal ölçerler yerleştirilmiştir (3.15). Prizma numunelerin analizler sonucu elde edilen zaman-ÇAAY değerleri ile deneysel sonuçlar grafiksel olarak karşılaştırılmıştır (Şekil 3.16-3.19). Grafikler incelendiğinde 2B-DGK yöntemi ile test verilerinin oldukça uyumlu olduğu görülmektedir.



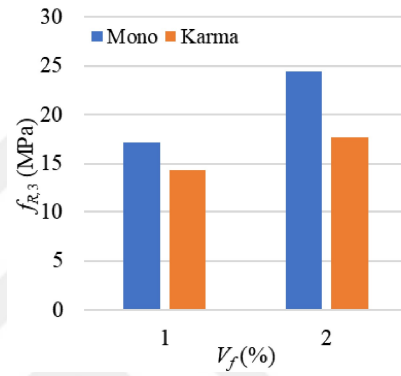
(a)



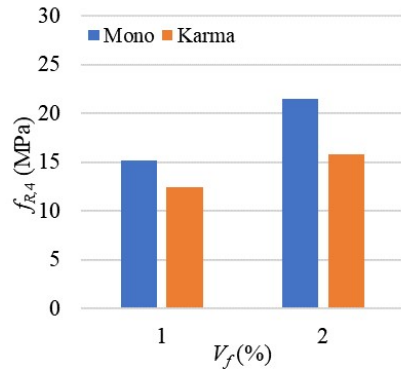
(b)



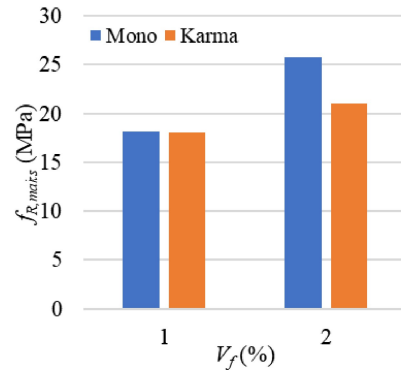
(c)



(d)

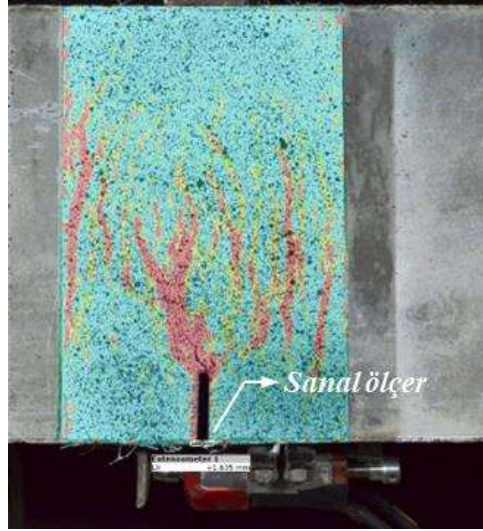


(e)

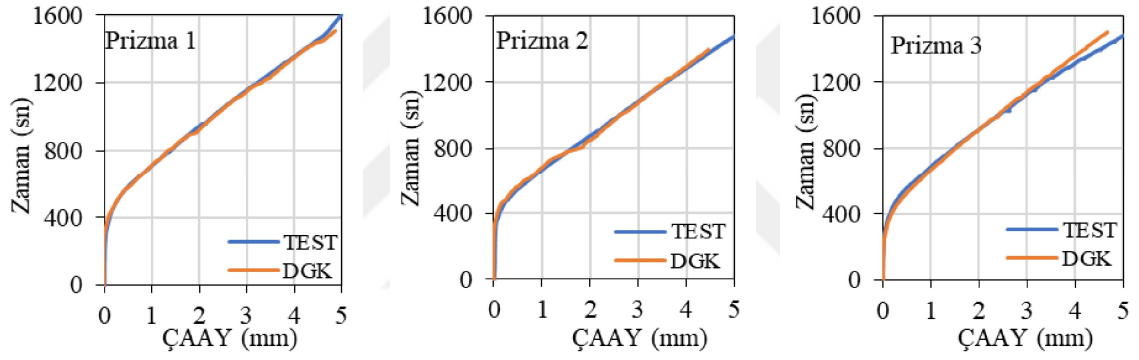


(f)

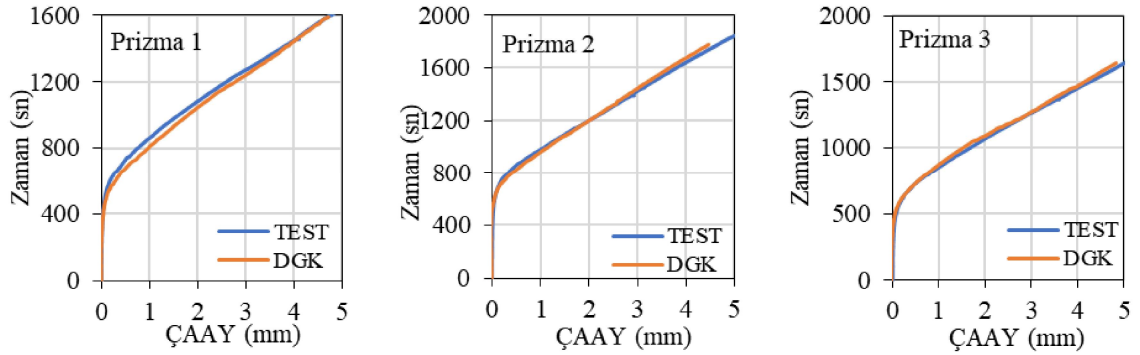
Şekil 3.14: Hacimsel lif oranlarına göre eğilme dayanımlarının değişimi.



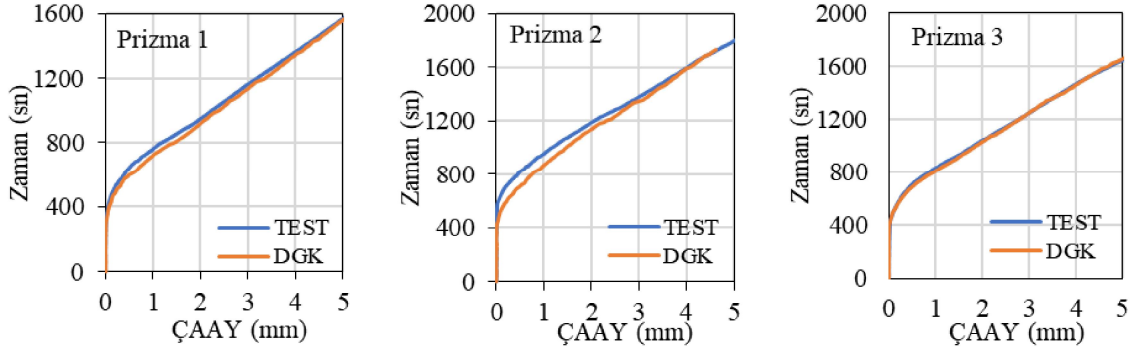
Şekil 3.15: ÇAAY değerlerinin GOM Correlate 2019 yazılımı ile belirlenmesi.



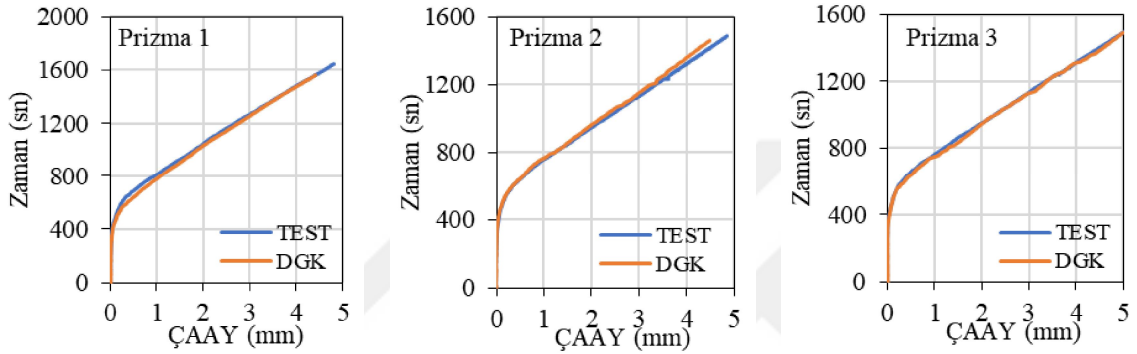
Şekil 3.16: Mono1.0 prizmaların deneysel ve 2B-DGK için zaman-ÇAAY grafikleri.



Şekil 3.17: Mono2.0 prizmaların deneysel ve 2B-DGK için zaman-ÇAAY grafikleri.

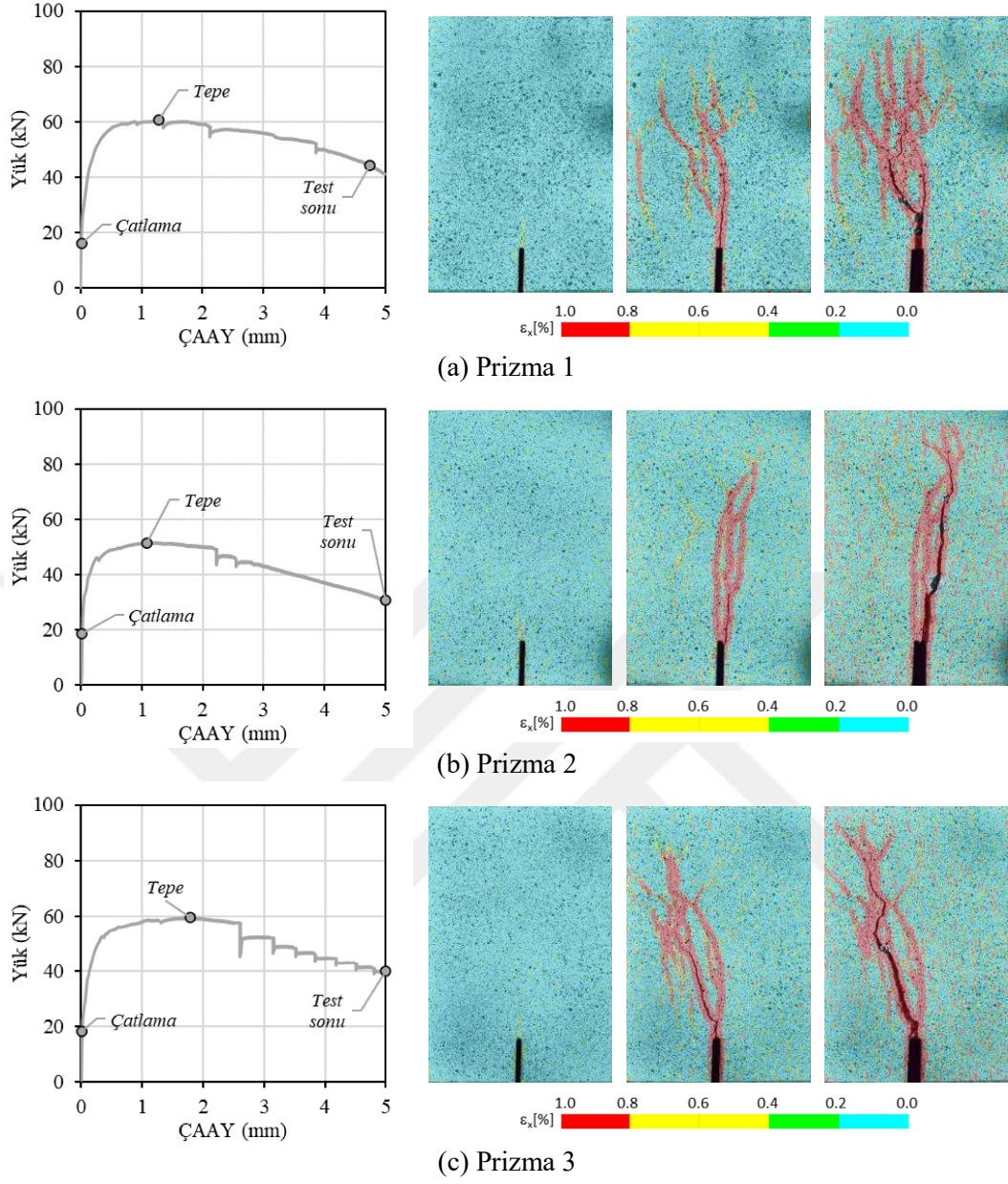


Şekil 3.18: Karma1.0 prizmaların deneysel ve 2B-DGK için zaman-ÇAAAY grafikleri.

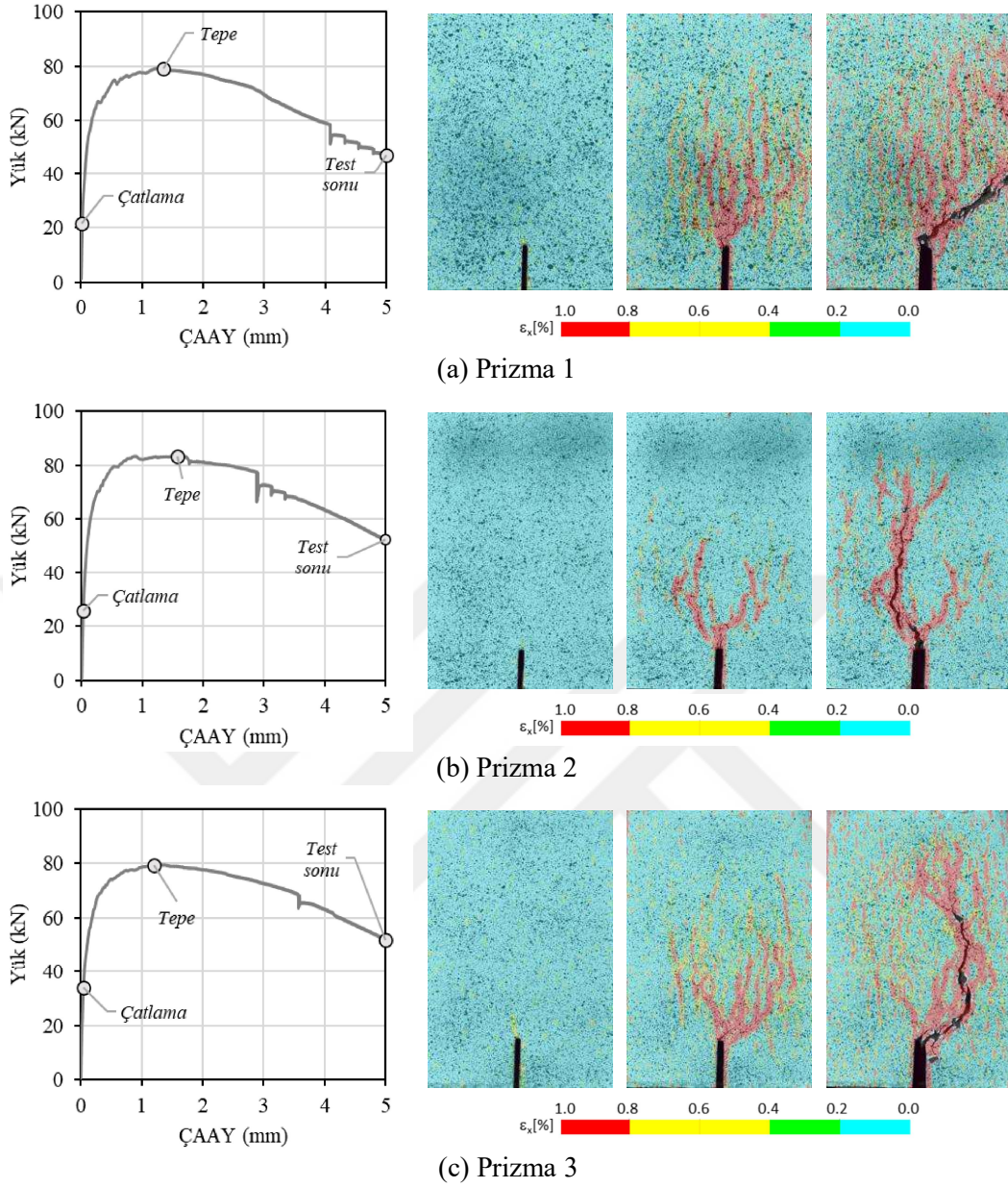


Şekil 3.19: Karma2.0 prizmaların deneysel ve 2B-DGK için zaman-ÇAAAY grafikleri.

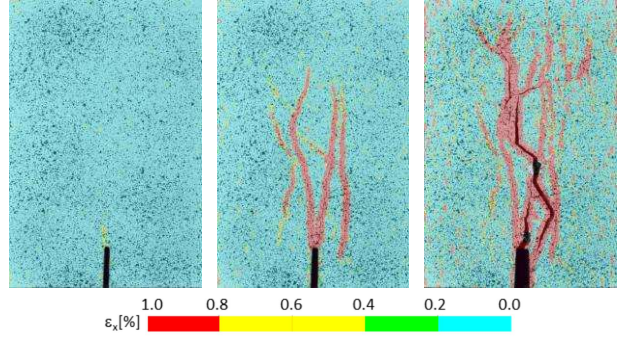
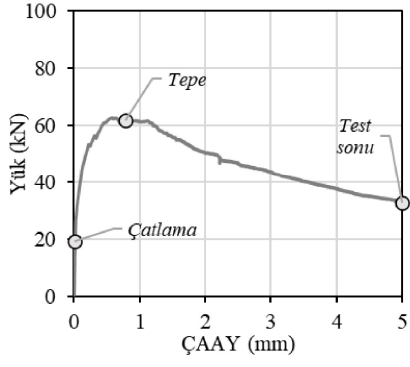
GOM Correlate (2019) yazılımı ile prizmaların çatlama, tepe yükü ve test sonundaki aşamalara ait çatlak davranışları elde edilmiş ve her bir karışım için Şekil 3.20-23'te sunulmuştur. Analizler sonucunda görsel olarak belirlenebilen çatlak oluşumu dışında meydana gelen kılcal çatlakların ve şekildeğişirmelerin oldukça detaylı bir şekilde belirlenebildiği görülmektedir. 2B-DGK, çatlak başlangıcını ve çatlak gelişimini aşama aşama incelemeye imkan tanımaktadır.



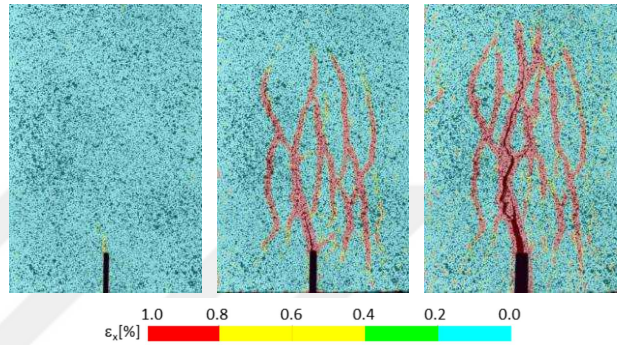
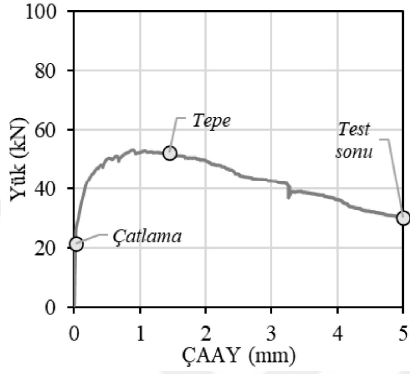
Şekil 3.20: Mono1.0 prizmaların 2B-DGK analizi sonucu elde edilen çatlak davranışı.



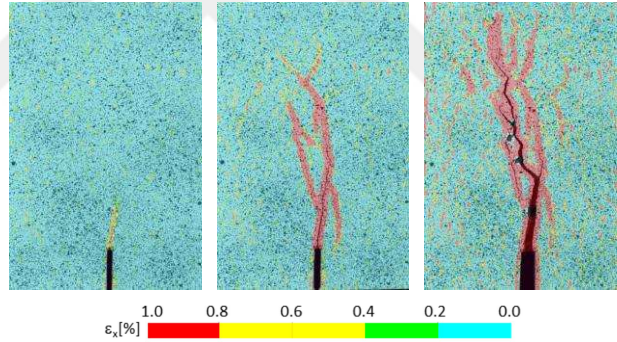
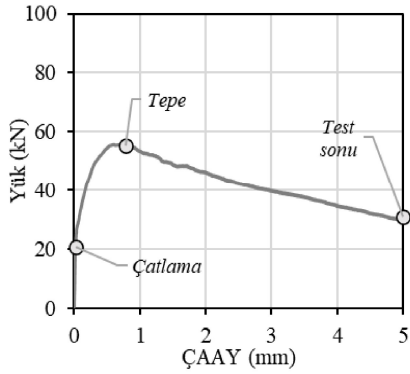
Şekil 3.21: Mono2.0 prizmaların 2B-DGK analizi sonucu elde edilen çatlak davranışı.



(a) Prizma 1

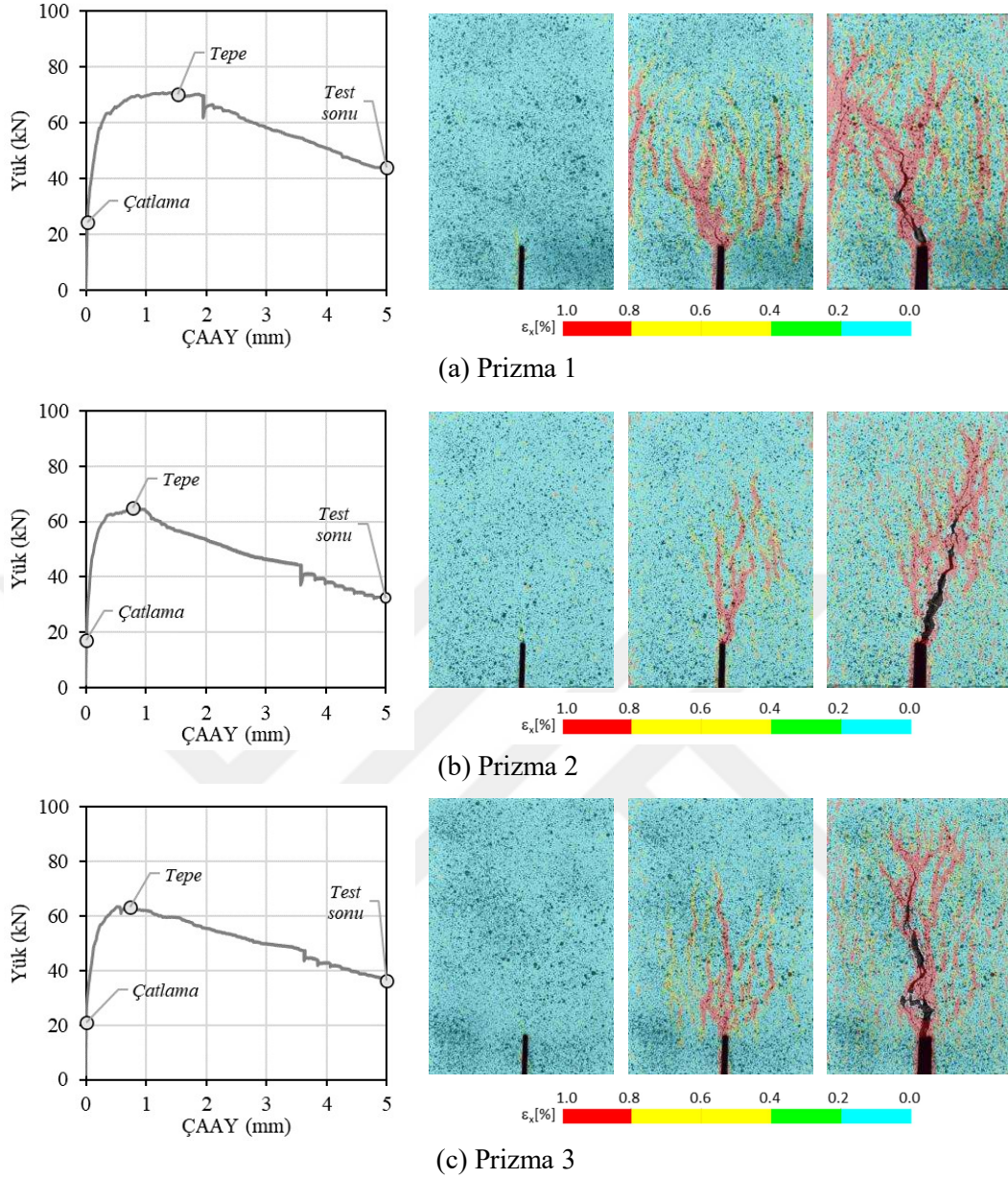


(b) Prizma 2



(c) Prizma 3

Şekil 3.22: Karma1.0 prizmaların 2B-DGK analizi sonucu elde edilen çatlak davranışı.



Şekil 3.23: Karma2.0 prizmaların 2B-DGK analizi sonucu elde edilen çatlak davranışı.

3.4 I Enkesitli Kirişlerin Testleri

3.4.1 Yük-Sehim Davranışı

I enkesitli test kirişleri üç noktalı yükleme altında kırılma durumuna kadar test edilmiş ve yük-sehim davranışları grafiksel olarak elde edilerek Şekil 3.24'te sunulmuştur. Kirişlerin kırılma modları Şekil 3.25'te karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir. Tepe yüküne ve kırılma durumuna karşılık gelen yük ve sehim değerleri Tablo 3.5'te verilmiştir. Test kirişlerinde boyuna donatılara yerleştirilen gerinim pullarından alınan ölçümler, maksimum şekildeğiştirme değerlerini (ϵ_{maks}) içerecek şekilde yük-şekildeğiştirme grafikleri olarak Şekil 3.26'da sunulmuştur.

Testler sonucunda kirişlerde kesme kırılması ve eğilme kırılması olmak üzere iki farklı kırılma modu elde edilmiştir. Kontrol kirişi 68.55 kN'luk yük değerine ulaştığında kesme kırılması sonucu test sona ermiştir (Şekil 3.24a, Şekil 25a). Kontrol kirişinde kırılma yüküne ulaşıldığında boyuna donatıda maksimum şekildeğiştirme değeri (ϵ_{maks}) 0.00115 olarak ölçülmüş ve donatılarda akma meydana gelmeden kırılmanın meydana geldiği belirlenmiştir (Şekil 3.26a). Hacimce %1.0 lif içeren Mono1.0 ve Karma1.0 kirişlerinde de kesme kırılması meydana gelirken yük-sehim davranışında sırasıyla 186.98 kN ve 136.70 kN tepe yükü değerleri elde edilmiştir. Kontrol kirişinden farklı olmak üzere kırılma ani olmayıp yaklaşık %21'lik yük düşüşünden sonra meydana gelmiştir (Şekil 3.24b-c). Her iki kirişte de gövdede başlayan eğik çatlaklar ilerleyerek ve genişleyerek kirişlerde kesme kırılmasına sebep olmuştur. Kırılma yüküne ulaşıldığında test kirişlerinde ölçülen boyuna donatılardaki maksimum şekildeğiştirme değerleri Mono 1.0 ve Karma1.0 kirişleri için sırasıyla 0.00265 ve 0.00195 olarak ölçülmüştür (Şekil 3.26 b-c). Şekil değıştirme ölçümlerine göre Kontrol ve Karma1.0 kirişlerinde donatı akmadan kesme kırılması gerçekleşirken, Mono1.0 kirişinde donatı aktıktan hemen sonra kırılmanın gerçekleştiği belirlenmiştir. Kesme kırılması meydana gelen kirişler kendi içinde değerlendirildiğinde, Mono1.0 ve Karma1.0 kirişlerinin kesme dayanımları Kontrol kirişine göre sırasıyla 2.73 ve 2.0 kat daha fazla elde edilmiştir. Beklendiği gibi çelik lif kullanımının kirişlerin kesme dayanımını lifsiz duruma göre arttırdığı görülmüştür. Kesme dayanımı açısından mono ve karma lif kullanımı karşılaştırıldığında ise Mono1.0 kirişinin kesme dayanımının Karma1.0 kirişine göre %37 daha fazla olduğu belirlenmiştir.

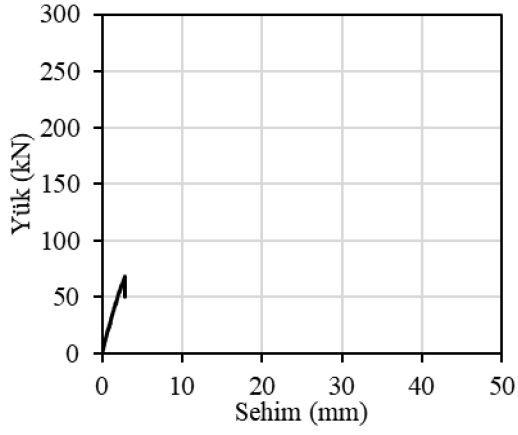
Hacimce %2.0 lif içeren kirişler belirgin bir dayanım kaybı olmadan yük taşıma kapasitelerine ulaşmıştır (Şekil 3.24d-e). Mono2.0 ve Karma2.0 kirişlerinde boyuna donatılarda ölçülebilen maksimum şekildeğiştirmeler sırasıyla 0.00847 ve 0.0107 olarak elde edilmiştir (Şekil 3.26d-e). Her iki kiriş içinde donatıların akma şekildeğiştirme sınırlarını aştığı ve akmanın meydana geldiği belirlenmiştir. Mono2.0 ve Hibrit2.0 için sırasıyla 273.33 kN ve 264.56 kN'luk yük taşıma kapasite değerleri elde edilmiştir (Tablo 3.5). Sonrasında hem liflerin sıyrılması, hem de basınç bölgesinde beton ezilmesi nedeniyle dayanımda azalmalar başlamıştır (Şekil 3.24d-e). Mono2.0 kirişinde dayanım kaybı kapasitenin %20'sini aştıktan sonra 215.67 kN yük seviyesinde oluşan büyük çatlak açıklığı sonucu güvenlik nedeniyle test sonlandırılmıştır (Şekil 3.25d). Hibrit 2.0 kirişinde ise yük değeri 214.81 kN'a ulaştığında beton ezilmesi sonucu hızlı bir dayanım kaybı meydana gelmiş ve test sonuçlanmıştır (Şekil 3.25e). Kirişlerin kırılma şekilleri

incelendiğinde belirgin bir kesme hasarının bulunmadığı görülmektedir (Şekil 3.25d-e). Mono2.0 ve Karma2.0 kirişlerinin testler sonucunda elde edilen deneysel yük taşıma kapasiteleri karşılaştırıldığında mono ve karma çelik lif kullanımının belirgin bir farkının olmadığı görülmektedir.

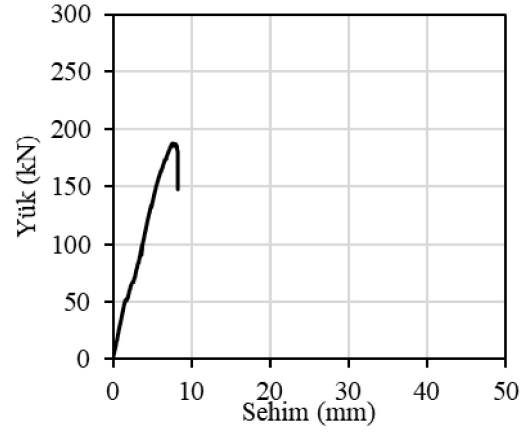
Tablo 3.5: I enkesitli kirişlerin yük-sehim davranışı için elde edilen sonuçlar.

	Tepe		Kırılma		Kırılma Modu
	Sehim (mm)	Yük (kN)	Sehim (mm)	Yük (kN)	
Kontrol	2.88	68.55	2.88	68.55	Kesme
Mono1.0	7.65	186.98	8.28	147.29	Kesme
Hibrit1.0	5.43	136.57	6.80	108.40	Kesme
Mono2.0	7.24	273.33	41.82	215.67	Eğilme
Hibrit2.0	7.61	264.56	34.05	214.81	Eğilme

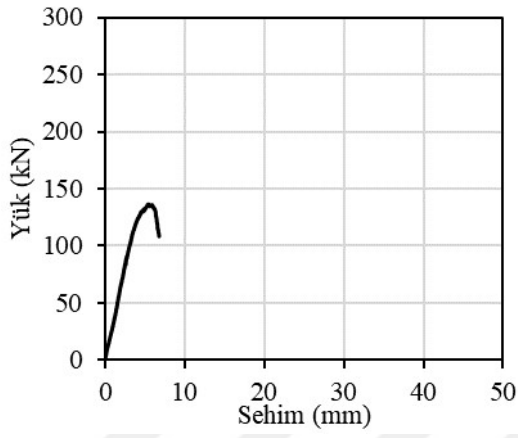
I enkesitli kirişlerin yük-sehim davranışları birlikte değerlendirildiğinde, hacimce %1.0 oranında çelik lif kullanımının kesme kırılmasını önleyemediği görülmüştür. Bununla birlikte Mono1.0 ve Hibrit1.0 kirişlerinde lifsiz kirşe göre kesme dayanımının belirgin şekilde arttığı belirlenmiştir. Hacimce %2.0 lif kullanımında ise hem mono hem de karma lif içeriği içinde kesme hasarlarının önlenildiği ve sünek bir eğilme kırılması davranışının elde edildiği görülmüştür. Mono ve karma lif kullanımının yük taşıma kapasiteleri açısından belirgin bir etkisinin olmadığı belirlenmiştir. Sonuç olarak hem kesme hem de eğilme davranışında mono lif kullanımının çalışmada göz önüne alınan karma lif içeriklerine göre daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür.



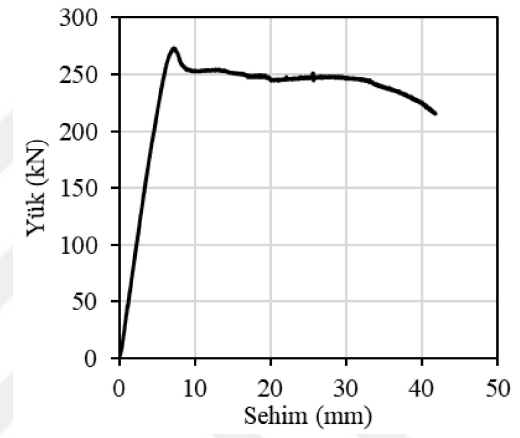
(a) Kontrol



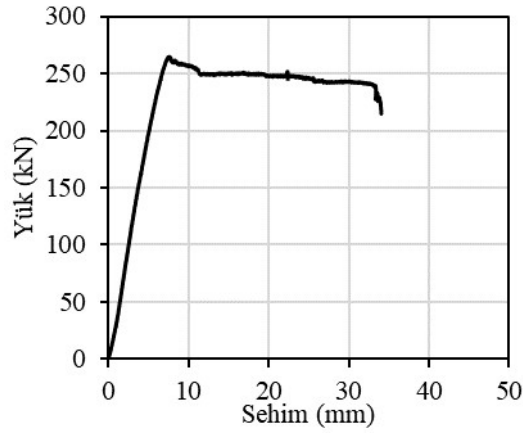
(b) Mono1.0



(c) Karma1.0



(d) Mono2.0



(e) Karma2.0

Şekil 3.24: I enkesitli kirişlerin yük-sehim grafikleri.



(a) Kontrol



(b) Mono1.0



(c) Karma1.0

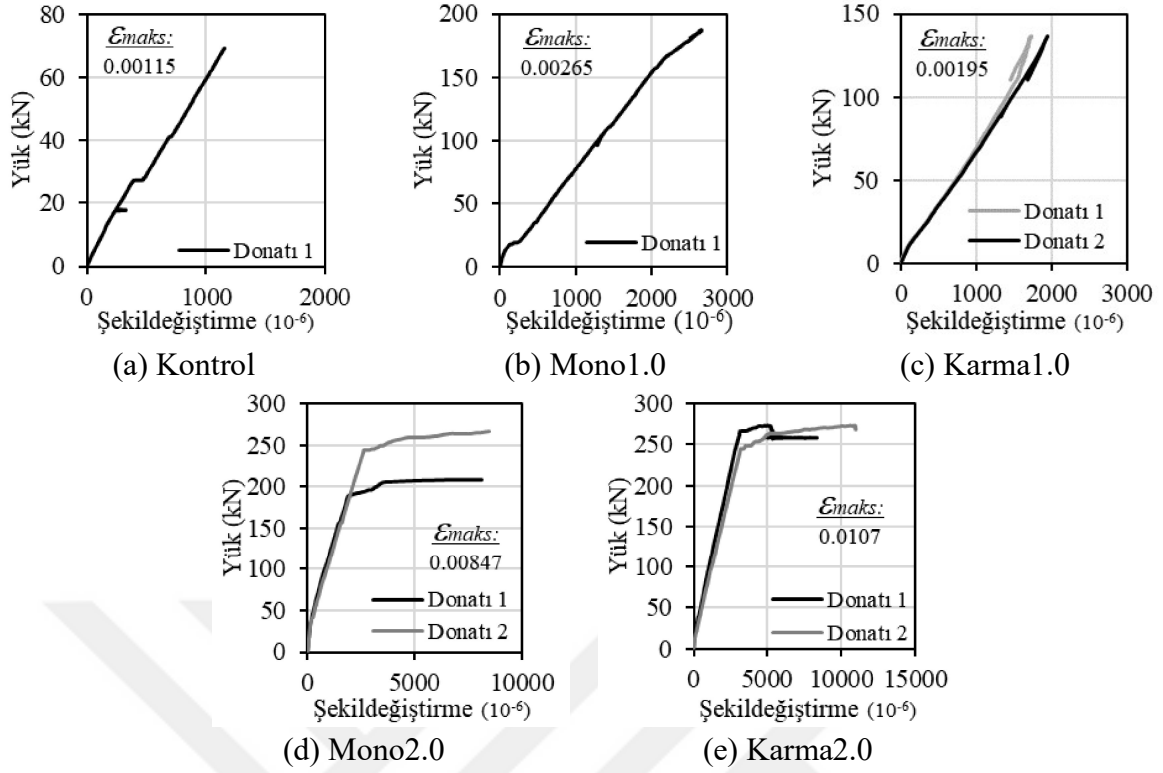


(d) Mono2.0



(e) Karma2.0

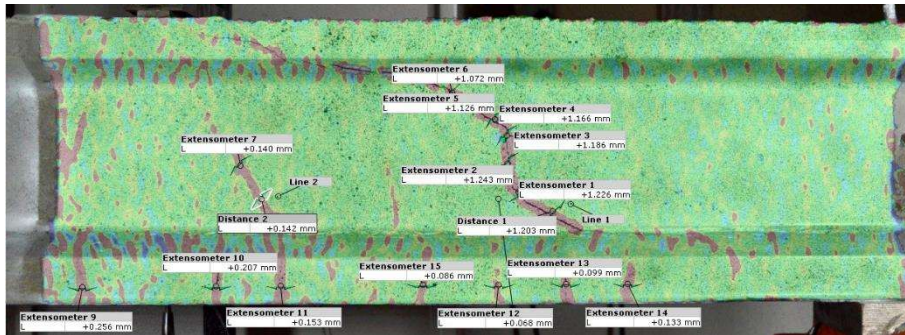
Şekil 3.25: I enkesitli test kirişlerinin kırılma şekilleri.



Şekil 3.26: I enkesitli testlerinde ölçülen donatı şekildeğiştirmeleri

3.4.2 Çatlak Davranışı

I enkesitli test kirişlerinin çatlak davranışı GOM Correlate (2019) yazılımı yardımıyla gerçekleştirilen 2B-DGK analizleri ile incelenmiştir. Yazılım yardımıyla testin görüntü alınan aşamalarında sanal ölçerler kullanılarak deformasyon ölçümleri yapılabilmektedir. Şekil 3.27’de örnek olarak çatlak genişliklerinin takibi için yerleştirilen sanal ölçerler gösterilmiştir.



Şekil 3.27: I enkesitli test kirişlerinin GOM Correlate 2019 yazılımı ile çatlak genişliklerinin belirlenmesi

Farklı çelik lif içeriklerinin çatlak davranışına etkilerini karşılaştırabilmek amacıyla belirli yük değerleri için 2B-DGK ile maksimum kesme ve eğilme çatlakları ölçülmüş ve Tablo 3.6 ve Tablo 3.7’de sunulmuştur.

Tablo 3.6: I enkesitli test kirişlerine ait maksimum kesme çatlak genişlikleri.

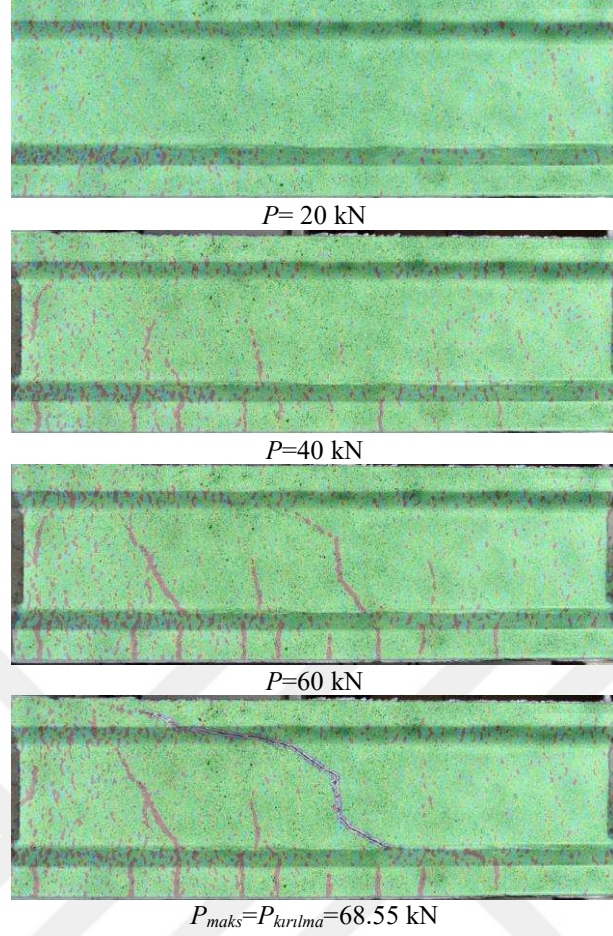
Yük (kN)	Maksimum kesme çatlak genişlikleri (mm)		
	Kontrol	Mono1.0	Karma1.0
20	0.02	0.02	0.03
40	0.05	0.05	0.06
60	0.24	0.07	0.08
100	-	0.14	0.29
140	-	0.39	2.10
180	-	-	-
220	-	-	-

Tablo 3.7: I enkesitli test kirişlerine ait maksimum eğilme çatlak genişlikleri.

Yük (kN)	Maksimum eğilme çatlak genişlikleri (mm)				
	Kontrol	Mono1.0	Karma1.0	Mono2.0	Karma2.0
20	0.09	0.02	0.04	0.005	0.010
40	0.18	0.07	0.10	0.012	0.042
60	0.26	0.08	0.15	0.021	0.056
100	-	0.09	0.23	0.040	0.085
140	-	0.19	0.35	0.075	0.116
180	-	-	-	0.097	0.208
220	-	-	-	0.138	0.275

Kontrol Kirişi:

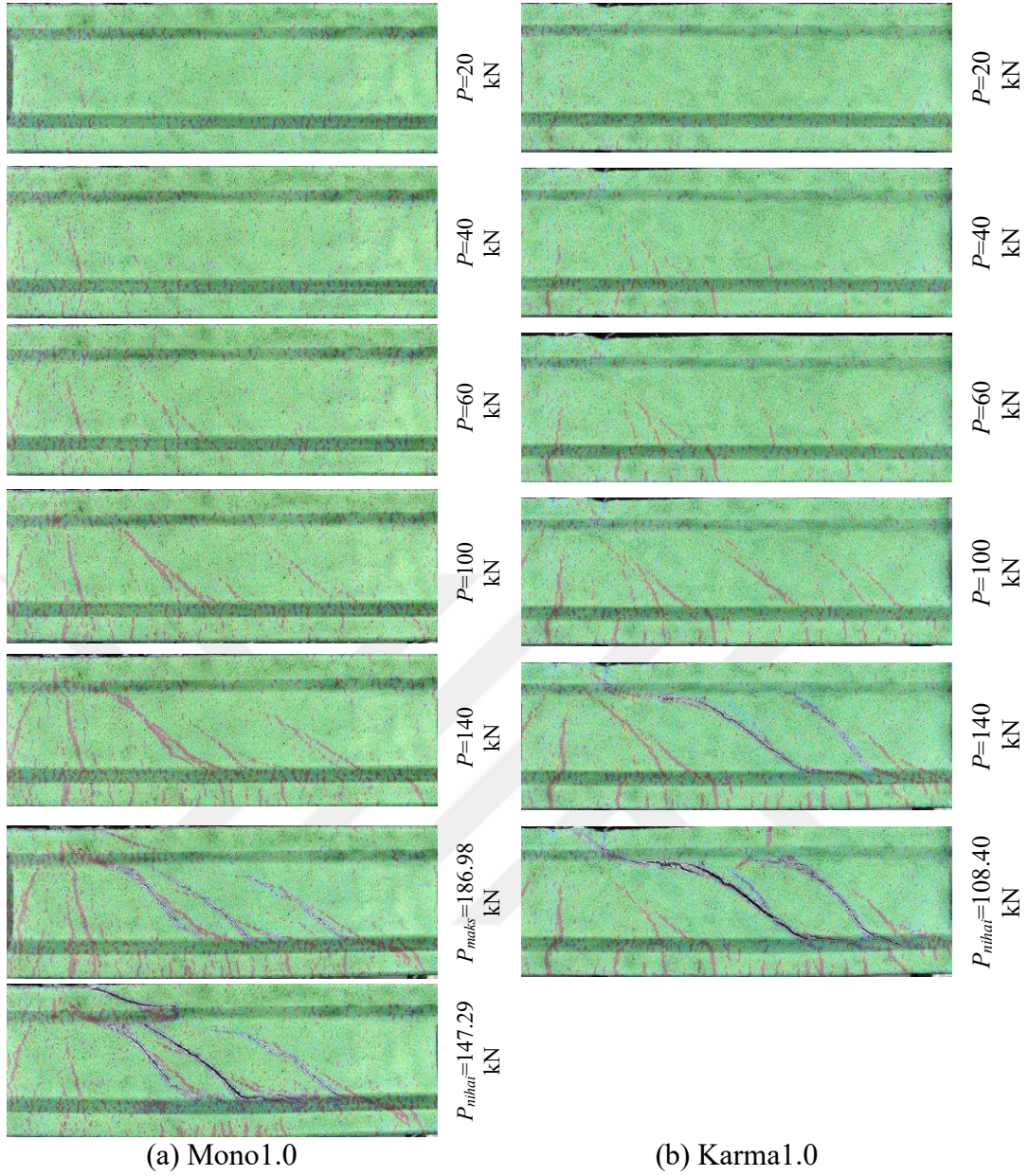
Lifsiz UYPB karışımı ile hazırlanmış Kontrol kirişi için 2B-DGK analizi ile elde edilen çatlak oluşum aşamaları belirli yük değerleri için Şekil 3.28’de sunulmuştur. İlk olarak yükleme noktasına yakın bölgelerde eğilme çatlakları meydana gelmiştir. Yüklemenin ilerleyen aşamalarında yeni eğilme çatlaklarının oluştuğu görülmektedir. Yük değeri 60 kN’a ulaşıldığında iki adet kesme çatlaklarının oluştuğu görülmektedir. Bu aşamadan sonra eğilme çatlaklarının gelişimi yavaşlamış ve eğik çatlakların genişlikleri artarak davranış devam etmiştir. Yük-sehim grafiğinde tepe yüküne ulaşıldığında iki kesme çatlakından sağ tarafta olan belirgin şekilde açılmıştır (Şekil 3.28). Hemen ardından bu çatlak yükleme noktası ile mesnet noktasını birleştirecek şekilde ilerlemiş ve ani bir şekilde kesme kırılması meydana gelmiştir.



Şekil 3.28: Kontrol kirişinin çatlak gelişimi.

Hacimce %1.0 Lif İçeren Kirişler:

Mono1.0 ve Karma1.0 karışımları ile hazırlanan ($V_f=1.0$) I enkesitli kirişlerin 2B-DGK analizi ile elde edilen çatlak aşamaları belirli yük değerleri için karşılaştırmalı olarak Şekil 3.29’da sunulmuştur. Her iki kirişte de çatlak davranışlarının benzer olduğu görülmektedir. Öncelikle eğilme çatlakları oluşmuş ardından eğik kesme çatlakları meydana gelmiştir. Bununla birlikte lifsiz kirişten farklı olarak daha fazla sayıda kesme çatlağının meydana geldiği görülmektedir (Şekil 3.29). Belirli yük aşamalarındaki çatlak genişlikleri karşılaştırıldığında Mono1.0 kirişinde Karma1.0’a göre kesme çatlağı genişliklerinin daha az olduğu görülmektedir (Tablo 3.6). Benzer şekilde eğilme çatlağı genişliklerinin Mono1.0 kirişinde belirgin şekilde daha az olduğu belirlenmiştir (Tablo 3.6).



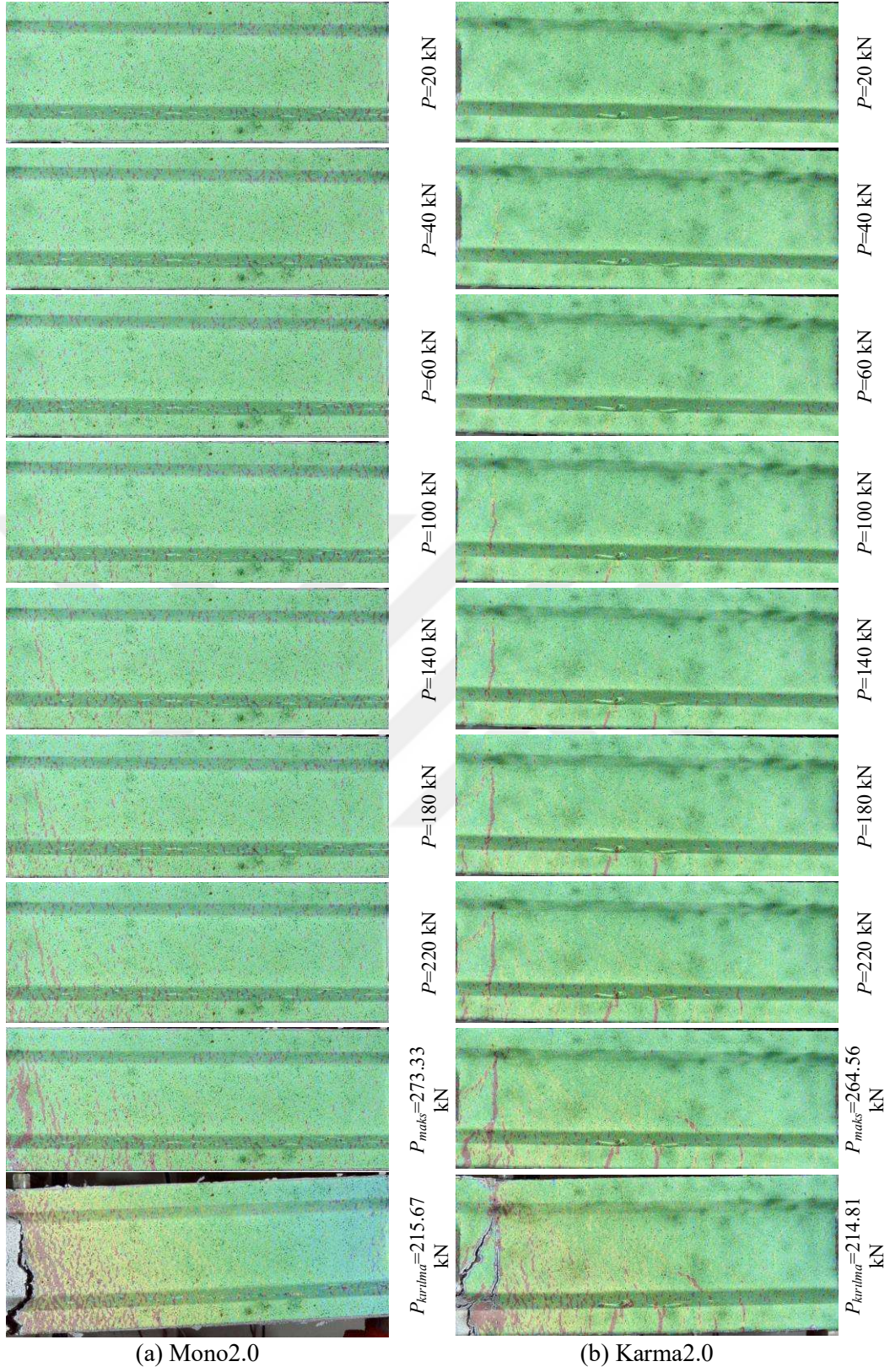
Şekil 3.29: Hacimce %1.0 lif içeren kirişlerin çatlak gelişimi.

Hacimce %2.0 Lif İçeren Kirişler:

Hacimsel lif oranı %2 olan mono ve karma lifli kirişlerin test boyunca belirli yük aşamaları için 2B-DGK analizi ile elde edilen çatlak davranışları karşılaştırmalı olarak Şekil 3.28'de sunulmuştur. Düşük yük seviyelerinde Mono2.0 kirişinde belirgin bir çatlak oluşumu gözlemlenmezken, Karma2.0 kirişinde biri oldukça hızlı ilerleyen üç adet çatlağın oluştuğu görülmektedir. Eğilme çatlaklarının genişlikleri karşılaştırıldığında mono lifli kirişte oluşan çatlakların karma lifli kirişe göre daha sınırlı olduğu görülmektedir (Tablo 3.6). Tepe yüküne ulaşıldığında Mono2.0'daki çatlak gelişiminin hala oldukça sınırlı olduğu ve belirgin bir kesme çatlağının olmadığı görülmektedir. Her iki kirişte de tepe yükü

aşıldıktan sonra deformasyonların tek bir çatlakta toplandığı görülürken diğer çatlakların gelişiminin durduğu belirlenmiştir. Çatlak bölgeleşmesi (*crack localization*) olarak adlandırılan bu aşamadan sonra lif sıyrılmaları ile çatlak genişlikleri giderek artış göstermiştir.





Şekil 3.30: Hacimce %2.0 lif içeren I-enkesitli kirişin çatlak gelişimi.

4. GENEL SONUÇLAR

Bu çalışmada, farklı tipte çelik liflerin karma olarak kullanılmasının UYPB ile üretilen I enkesitli betonarme kirişlerin kesme davranışı üzerindeki etkisi iki aşamadan oluşan deneysel bir programla incelenmiştir. Çalışmada tek tip lif içeren (*mono*) karışımlarda UYPB için yaygın olarak kullanılan yüksek dayanımlı mikro-düz çelik lifler kullanılmıştır. Karma lifli karışımlarda ise toplamda mono lifli karışım toplam oranlarına eşit olacak şekilde mikro-düz ve makro-kancalı çelik lifler eşit oranda birlikte kullanılmıştır. Bunlara ek olarak karşılaştırmalarda kullanılmak üzere lifsiz (*Kontrol*) UYPB karışımı hazırlanmıştır. Deneysel çalışmanın ilk aşamasında UYPB’da karma çelik lif ilavesinin malzeme bazındaki etkisi temel mekanik özellikler için gerçekleştirilen testler ile incelenmiştir. Karışımların basınç ve yarmada çekme dayanımları küp ve silindir numunelerin üzerinde gerçekleştirilen aksel basınç ve yarmada çekme testleri ile belirlenmiştir. Karışımların eğilme davranışları için çentikli prizmatik kiriş numunelerin üç noktalı eğilme testleri gerçekleştirilmiştir. İkinci aşamada kesme davranışını değerlendirmek amacıyla mono ve karma çelik lifli UYPB karışımları kullanılarak I enkesitli betonarme kirişler üretilmiş ve kesme etkin yükleme altında test edilmiştir. Prizma numuneleri ve I enkesitli kirişlerin eğilme testleri sırasında çatlakların oluşumu ve ilerleyişi numunelere yerleştirilen fiziksel ölçerler dışında 2 boyutlu Dijital Görüntü Korelasyon (2B-DGK) tekniği kullanılarak ayrıca incelenmiştir. Deneysel çalışma sonucunda:

- Mono ve karma lifli UYPB karışımları ortalama basınç dayanımı açısından değerlendirildiğinde lif miktarındaki artış ile birlikte dayanımın arttığı görülmektedir. Bununla birlikte basınç dayanımı açısından mono veya hibrit çelik lif kullanımının belirgin bir farkının olmadığı görülmüştür.
- Beklendiği gibi çelik lif kullanımı sonucu lifsiz duruma göre yarmada çekme dayanımları belirgin şekilde artmıştır. Lif miktarının artışına bağlı olarak dayanımlarda artış trendinin olduğu görülürken, karma lifin yarmada çekme dayanımında daha etkin olduğu belirlenmiştir.
- Lif içermeyen Kontrol karışıma ait prizma numunelerinde ilk çatlak oluşuktan hemen sonra ani bir kırılma meydana gelirken, lifli numunelerde tepe noktasına ulaşıldıktan sonra yük kademeli olarak azalmakla birlikte oldukça sünek bir davranış elde edilmiştir. Liflerin çatlakları köprüleme kabiliyeti nedeniyle tüm lifli

numunelerde çatlak sonrası ani göçme meydana gelmemiş, yük taşıma kapasitesine kadar deformasyonlar devam etmiştir.

- Karışımların kırılma enerjileri karşılaştırıldığında beklenildiği gibi çelik lif kullanımı sonucu lif içermeyen Kontrol karışımına kıyasla tüm UYPB karışımlarında sünekliğin belirgin şekilde arttığı görülmektedir. Lif oranındaki artış nedeniyle mono lifli karışımlarda kırılma enerjisinde yükseliş elde edilirken karma lifli karışımlarda bu etkinin sınırlı olduğu belirlenmiştir.
- Karışımların eğilmede çekme dayanımları incelendiğinde hacimce %1 lifli mono ve karma lifli karışımlar için maksimum dayanımda belirgin bir fark gözlenmezken hacimce %2.0 lif oranı için mono lif kullanımının karma life göre 1.2 kat daha iyi performans gösterdiği belirlenmiştir.
- I enkesitli kirişlerin eğilme testleri sonucunda lifsiz kiriş ile hacimce %1.0 lif içeren kirişlerin testleri kesme kırılması ile sonuçlanmıştır. Bununla birlikte hem mono hem de karma lifli kirişlerde kesme dayanımının lifsiz kirişe göre belirgin şekilde arttığı görülmektedir. Mono ve karma lif kullanımı kesme dayanımı açısından değerlendirildiğinde mono lif kullanımının daha iyi sonuç verdiği görülmüştür.
- Hacimce %2.0 lif içeren hem mono hem de karma lifli kirişlerde kesme kırılması önlenmiş ve sünek eğilme davranışı elde edilmiştir. Mono ve karma lif kullanımları karşılaştırıldığında dayanım açısından herhangi bir farkın olmadığı görülmüştür.

Deneysel çalışma sonucunda önceki çalışmalarda karma çelik lif kullanımı ile ilgili belirtilen lifler arası sinerjik etkinin avantajları çalışmada göz önüne alınan lif tipleri ve oranları için belirlenememiştir. Çalışmada ele alınan parametrelerin büyük bir bölümünde tek başına mikro-düz lif kullanımının daha etkin olduğu belirlenmiştir. Bu sonuçlar, farklı tipte ve oranda çelik lifler içeren karma lifli karışımlar kullanılarak yeni çalışmalara gerek olduğuna işaret etmektedir.

5. KAYNAKLAR

- Abbas, S., Soliman, A. M., & Nehdi, M. L. (2015). Exploring mechanical and durability properties of ultra-high performance concrete incorporating various steel fiber lengths and dosages. *Construction and Building Materials*, 75, 429–441. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.11.017>
- ACI 318 (2019). Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-19), American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, USA.
- ACI 318 (2008). Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-08), American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, USA.
- Afroughsabet, V., & Ozbakkaloglu, T. (2015). Mechanical and durability properties of high-strength concrete containing steel and polypropylene fibers. *Construction and Building Materials*, 94, 73–82. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.06.051>
- Ahmad, S., Bahij, S., Al-Osta, M. A., Adekunle, S. K., & Al-Dulaijan, S. U. (2019). Shear Behavior of Ultra-High-Performance Concrete (UHPC) Beams Reinforced with High-Strength Steel Bars. *Aci Structural Journal*, 116(4). <https://doi.org/10.14359/51714484>
- Al-Osta, M. A., Sharif, A., Ahmad, S., Adekunle, S. K., Al-Huri, M. A., & Sharif, A. M. (2021). Effect of hybridization of straight and hooked steel fibers and curing methods on the key mechanical properties of UHPC. *Journal of Materials Research and Technology*, 15, 3222–3239. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.10.005>
- Arslan, G. (2014). Shear strength of Steel Fiber Reinforced Concrete (SFRC) slender beams. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 18(2), 587–594. <https://doi.org/10.1007/s12205-014-0320-x>
- Banthia, N., & Gupta, R. (2004). Hybrid fiber reinforced concrete (HyFRC): fiber synergy in high strength matrices. *Materials and Structures*, 37(10), 707–716. <https://doi.org/10.1007/bf02480516>

- Banthia, N., & Sappakittipakorn, M. (2007). Toughness enhancement in steel fiber reinforced concrete through fiber hybridization. *Cement and Concrete Research*, 37(9), 1366–1372. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.05.005>
- Bermudez, M., Wen, K., & Hung, C. (2022). A Comparative Study on the Shear Behavior of UHPC Beams with Macro Hooked-End Steel Fibers and PVA Fibers. *Materials*, 15(4), 1485. <https://doi.org/10.3390/ma15041485>
- Bhowmik, S., & Ray, S. (2019). An experimental approach for characterisation of fracture process zone in concrete. *Engineering Fracture Mechanics*, 211, 401–419. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2019.02.026>.
- Caggiano, A., Gambarelli, S., Martinelli, E., Nisticó, N., & Pepe, M. (2016). Experimental characterization of the post-cracking response in Hybrid Steel/Polypropylene Fiber-Reinforced Concrete. *Construction and Building Materials*, 125, 1035–1043. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.068>
- Cao, M., Zhang, C., & Lv, H. (2014). Mechanical response and shrinkage performance of cementitious composites with a new fiber hybridization. *Construction and Building Materials*, 57, 45–52. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.01.088>
- Cao, X., He, D., Qian, K., Fu, F., Deng, X., & Wang, L. (2022). Shear behavior of glass FRP bars-reinforced ultra-high performance concrete I-shaped beams. *Structural Concrete*, 24(1), 1503–1520. <https://doi.org/10.1002/suco.202100801>
- Chen, B., Zhou, J., Zhang, D., Su, J., Nuti, C., & Sennah, K. (2022). Experimental study on shear performances of ultra-high performance concrete deep beams. *Structures*, 39, 310–322. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.03.019>
- Choi, K., Park, H. G., & Wight, J. K. (2007). Shear Strength of Steel Fiber-Reinforced Concrete Beams without Web Reinforcement. *Aci Structural Journal*, 104(1). <https://doi.org/10.14359/18428>
- Ding, Y., You, Z., & Jalali, S. (2011). The composite effect of steel fibres and stirrups on the shear behaviour of beams using self-consolidating concrete. *Engineering Structures*, 33(1), 107–117. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2010.09.023>

- Dinh, H. H., Parra-Montesinos, G. J., & Wight, J. K. (2011). Shear Strength Model for Steel Fiber Reinforced Concrete Beams without Stirrup Reinforcement. *Journal of Structural Engineering-ASCE*, 137(10), 1039–1051. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)st.1943-541x.0000362](https://doi.org/10.1061/(asce)st.1943-541x.0000362)
- EN 12390-1. (2021). Testing hardened concrete - Part 1: Shape, dimensions and other requirements for specimens and moulds, European Committee for Standardization, Brussels.
- EN 12390-3. (2019). Testing Hardened Concrete—Part 3: Compressive Strength of Test Specimens, European Committee for Standardization, Brussels.
- EN 12390-6. (2009). Testing hardened concrete - Part 6: Tensile splitting strength of test specimens, European Committee for Standardization, Brussels.
- EN 14651+A1. (2007). Test method for Metallic Fibre Concrete Measuring the Flexural Tensile Strength (Limit of Proportionality (LOP), Residual), European Committee for Standardization, Brussels.
- Graybeal B., & Davis, M. (2008). Cylinder or Cube: Strength Testing of 80 to 200 MPa (11.6 to 29 ksi) Ultra-High-Performance Fiber-Reinforced Concrete. *ACI Materials Journal*, 105(6), 603-609. <https://doi.org/10.14359/20202>
- GOM Correlate. Versiyon 2019. Zeiss GOM Metrology.
- Guo, Y.-Q., Wang, J.-Y., & Gu, J.-B. (2022). Nonlinear Inverse Analysis for predicting the tensile Properties of Strain-Softening and Strain-Hardening UHPFRC. *Materials*, 15(9), 3067. <https://doi.org/10.3390/ma15093067>
- Hannawi, K., Bian, H., Prince-Agbodjan, W., & Raghavan, B. (2016). Effect of different types of fibers on the microstructure and the mechanical behavior of Ultra-High Performance Fiber-Reinforced Concretes. *Composites Part B: Engineering*, 86, 214–220. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.09.059>
- Hasgül, U., Yavaş, A., Birol, T., & Türker, K. (2019). Steel fiber use as shear reinforcement on I-Shaped UHP-FRC beams. *Applied Sciences*, 9(24), 5526. <https://doi.org/10.3390/app9245526>

- Hasgül, U., Yavaş, A., & Birol, T. (2023). Replacement of stirrups by steel fibers in shear dominant UHPFRC beams. *Turkish Journal of Civil Engineering*, 34(2), 103–124. <https://doi.org/10.18400/tjce.1237663>
- Jiao, C., Ta, J., Niu, Y., Meng, S., Chen, X., He, S., & Ma, R. (2022). Analysis of the flexural properties of ultra-high-performance concrete consisting of hybrid straight steel fibers. *Case Studies in Construction Materials*, 17, e01153. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01153>
- Jin, L., Zhang, R., Tian, Y., T., Dou, G., & Du, X. (2018). Experimental investigation on static and dynamic mechanical properties of steel fiber reinforced ultra-high-strength concretes. *Construction and Building Materials*, 178, 102–111. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.152>
- Joshi, S. S., Thammishetti, N., & Prakash, S. S. (2020). Flexure-Shear behavior of hybrid Fiber-Reinforced prestressed concrete beams. *Aci Structural Journal*, 117(1). <https://doi.org/10.14359/51718076>
- Kani, G. N. J. (1967). How Safe are Our Large Reinforced Concrete Beams?. *Journal of American Concrete Institute*, 64(3), 128-141. <https://doi.org/10.14359/7549>
- Khayat, K. H., Meng, W., Vallurupalli, K., & Teng, L. (2019). Rheological properties of ultra-high-performance concrete — An overview. *Cement and Concrete Research*, 124, 105828. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105828>
- Khuntia, M., Stojadinovic, B. & Goel, S. C. (1999). Shear Strength of Normal and High-Strength Fiber Reinforced Concrete Beams without Stirrups. *ACI Structural Journal*, 96(2). <https://doi.org/10.14359/620>
- Kim, D., Park, S. H., Ryu, G., & Koh, K. T. (2011). Comparative flexural behavior of Hybrid Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete with different macro fibers. *Construction and Building Materials*, 25(11), 4144–4155. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.04.051>
- Kodur, V., Solhmirzaei, R., Agrawal, A., Aziz, E. M., & Soroushian, P. (2018). Analysis of flexural and shear resistance of ultra high performance fiber reinforced concrete beams without stirrups. *Engineering Structures*, 174, 873–884. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.08.010>

- Kwak, Y.-K., Eberhard, M. O., Kim, W.-S., & Kim, J. (2002). Shear Strength of Steel Fiber-Reinforced Concrete Beams without Stirrups. (2002). *ACI Structural Journal*, 99(4). <https://doi.org/10.14359/12122>
- Kwon, S., Nishiwaki, T., Kikuta, T., & Mihashi, H. (2014). Development of Ultra-High-Performance hybrid Fiber-Reinforced Cement-Based composites. *American Concrete Institute, Journal Of*, 111(3). <https://doi.org/10.14359/51686890>
- Lantsoght, E. O. L. (2019). How do steel fibers improve the shear capacity of reinforced concrete beams without stirrups? *Composites Part B: Engineering*, 175, 107079. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107079>
- Li, V.C., Ward, R., & Hamza, A.M. (1992). Steel and synthetic fibers as shear reinforcement. *ACI Material Journal*, 89(5):499–508.
- Li, Y., Tan, K. H., & Yang, E. (2019). Synergistic effects of hybrid polypropylene and steel fibers on explosive spalling prevention of ultra-high performance concrete at elevated temperature. *Cement and Concrete Composites*, 96, 174–181. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.11.009>
- Lim, D.H., & Oh, B.H. (1999). Experimental and theoretical investigation on the shear of steel fiber reinforced concrete beams. *Engineering Structures*, 21, 937–44.
- Ma, K., Qi, T., Liu, H., & Wang, H. (2018). Shear behavior of hybrid fiber reinforced concrete deep beams. *Materials*, 11(10), 2023. <https://doi.org/10.3390/ma11102023>
- Ma, K., Ma, Y., & Liu, B. (2022). Experimental investigation on ultra high performance fiber reinforced concrete beams. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 30(6), 1155–1171. <https://doi.org/10.1080/15376494.2022.2028947>
- Markovic, I. (2006). *High-Performance Hybrid-Fibre Concrete: development and utilisation* (Ph. D. thesis). <http://resolver.tudelft.nl/uuid:44ed51cd-fc27-4353-ab81-cf8348f52443>
- Meng, W., & Khayat, K. H. (2018). Effect of hybrid fibers on fresh properties, mechanical properties, and autogenous shrinkage of Cost-Effective UHPC. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30(4). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0002212](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0002212)

- Mészöly, T., & Randl, N. (2018). Shear behavior of fiber-reinforced ultra-high performance concrete beams. *Engineering Structures*, 168, 119–127. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.04.075>
- Model Code 2010. (2013). In Fib Model Code 2010; Structural Concrete: Lausanne, Switzerland.
- Narayanan, R. & Darwish, I. Y. S. (1987). Use of steel fibers as shear reinforcement. *ACI Structural Journal*, 84(3). <https://doi.org/10.14359/2654>
- Nosheen, H., Qureshi, L. A., Tahir, M. F., & Rashid, M. U. (2018). An investigation on shear behavior of prestressed concrete beams cast by fiber reinforced concrete. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 43(10), 5605–5613. <https://doi.org/10.1007/s13369-018-3243-x>
- Pansuk, W., Nguyen, T. N., Sato, Y., Uijl, J. D., & Walraven, J. (2017). Shear capacity of high performance fiber reinforced concrete I-beams. *Construction and Building Materials*, 157, 182–193. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.057>
- Parra-Montesinos, G. J. (2006). Shear Strength of Beams with Deformed Steel Fibers. *Concrete International*, 28(11), 57–66.
- Prisco, M., Plizzari, G., & Vandewalle, L. (2009). Fiber-reinforced concrete-new design perspectives. *Materials and Structures*, 42(9), 1261–1281.
- Pourbaba, M., Joghataie, A., & Mirmiran, A. (2018). Shear behavior of ultra-high performance concrete. *Construction and Building Materials*, 183, 554–564. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.117>
- Pyo, S., Kim, H., & Lee, B. Y. (2017). Effects of coarser fine aggregate on tensile properties of ultra high performance concrete. *Cement and Concrete Composites*, 84, 28–35. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.08.014>
- Rasheed, M. A., & Prakash, S. S. (2018). Behavior of hybrid-synthetic fiber reinforced cellular lightweight concrete under uniaxial tension – Experimental and analytical studies. *Construction and Building Materials*, 162, 857–870. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.095>

- RILEM TC-50 FMC (Draft Recommendation). (1985). Determination of the fracture energy of mortar and concrete by means of three-point bend tests on notched beams. *Materials and Structures*, 18, 287–290. <https://doi.org/10.1007/BF02472918>
- Rossi, P., Arca, A., Parant, E. and Fakhri, P. (2005). Bending and Compressive Behaviors of A New Cement Composite. *Cement and Concrete Research*, 35(1), 27-33.
- Shaaban, I. G., Said, M., Khan, S. U., Eissa, M., & Elrashidy, K. (2021). Experimental and theoretical behaviour of reinforced concrete beams containing hybrid fibres. *Structures*, 32, 2143–2160. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.04.021>
- Singh, B., & Jain, K. (2014). An appraisal of steel fibers as minimum shear reinforcement in concrete beams. *Aci Structural Journal*, 111(5). <https://doi.org/10.14359/51686969>
- Sorelli, L., Meda, A., & Plizzari, G. (2005). Bending and Uniaxial Tensile Tests on Concrete Reinforced with Hybrid Steel Fibers. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 17(5), 519–527. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0899-1561\(2005\)17:5\(519\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0899-1561(2005)17:5(519))
- Srikar, G., Anand, G., & Prakash, S. S. (2016). A study on residual compression behavior of structural fiber reinforced concrete exposed to moderate temperature using digital image correlation. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 10, 75–85. <https://doi.org/10.1007/s40069-016-0127-x>.
- Susetyo, J., Gauvreau, P., & Vecchio, F. J. (2011). Effectiveness of steel fiber as minimum shear reinforcement. *ACI Structural Journal*, 108(4), 488–96.
- Wang, R., & Gao, X. (2016). Relationship between Flowability, Entrapped Air Content and Strength of UHPC Mixtures Containing Different Dosage of Steel Fiber. *Applied Sciences*, 6(8), 216. <https://doi.org/10.3390/app6080216>
- Wille, K., Naaman, A. E. and Parra-Montesinos, G. J. (2011). Ultra-High Performance Concrete with Compressive Strength Exceeding 150 MPa (22 ksi): A Simpler Way. *ACI Material Journal*, 108, 46-54.

- Wu, C., Oehlers, D. J., Rebenrost, M., Leach, J., & Whittaker, A. S. (2009). Blast testing of ultra-high performance fibre and FRP-retrofitted concrete slabs. *Engineering Structures*, 31(9), 2060–2069. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2009.03.020>
- Wu, Z. M., Rong, H., Zheng, J. J., Xu, F., & Dong, W. (2011). An experimental investigation on the FPZ properties in concrete using digital image correlation technique. *Engineering Fracture Mechanics*, 78, 2978–2990. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2011.08.016>
- Wu, Z., Shi, C., He, W., & Wu, L. (2016). Effects of steel fiber content and shape on mechanical properties of ultra high performance concrete. *Construction and Building Materials*, 103, 8–14. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.11.028>
- Wu, Z., Shi, C., & Khayat, K. H. (2019). Investigation of mechanical properties and shrinkage of ultra-high performance concrete: Influence of steel fiber content and shape. *Composites Part B: Engineering*, 174, 107021. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107021>
- Yang, J. M., Yoo, D., Kim, Y. C., & Yoon, Y. S. (2017). Mechanical Properties of Steam Cured High-Strength Steel Fiber-Reinforced Concrete with High-Volume Blast Furnace Slag. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 11(2), 391–401. <https://doi.org/10.1007/s40069-017-0200-0>
- Yavaş, A., Hasgül, U., Türker, K., & Birol, T. (2019). Effective fiber type investigation on the shear behavior of ultrahigh-performance fiber-reinforced concrete beams. *Advances in Structural Engineering*, 22(7), 1591–1605. <https://doi.org/10.1177/1369433218820788>
- Yıldırım, G. (2018). Dimensional stability of deflection-hardening hybrid fiber reinforced concretes with coarse aggregate: Suppressing restrained shrinkage cracking. *Structural Concrete*, 20(2), 836–850. <https://doi.org/10.1002/suco.201800096>
- Yoo, D.Y.; Lee, J.H.; Yoon, Y.S. (2013). Effect of fiber content on mechanical and fracture properties of ultra-high performance fiber reinforced cementitious composites. *Composite Structures*, 106, 742–753.

- Yoo, D., Yuan, T., Yang, J. M., & Yoon, Y. S. (2017). Feasibility of replacing minimum shear reinforcement with steel fibers for sustainable high-strength concrete beams. *Engineering Structures*, *147*, 207–222. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.06.004>
- Yu, R., Spiesz, P. P., & Brouwers, H. J. (2015). Development of Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPFRC): Towards an efficient utilization of binders and fibres. *Construction and Building Materials*, *79*, 273–282. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.01.050>
- Zhang, Y., Zhu, Y., Qu, S., Kumar, A., & Shao, X. (2020). Improvement of flexural and tensile strength of layered-casting UHPC with aligned steel fibers. *Construction and Building Materials*, *251*, 118893. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118893>

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı : Aytaç AYGEN

Doğum tarihi ve yeri :

e-posta :

Öğrenim Bilgileri

Derece	Okul/Program	Yıl
Y. Lisans	Balıkesir Üniversitesi / İnşaat Mühendisliği	2024
Y. Lisans	Balıkesir Üniversitesi / İş Sağlığı ve Güvenliği	2021
Lisans	Afyon Kocatepe Üniversitesi / İnşaat Mühendisliği	2019
Lisans	Afyon Kocatepe Üniversitesi / Yapı Öğretmenliği	2012
Ön Lisans	Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi / İklimlendirme ve Soğutma	2007
Lise	Bandırma Anadolu Lisesi	2003