

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



**GELENEKSEL BETON VE ULTRA YÜKSEK PERFORMANSLI  
LİFLİ BETON İÇEREN KOMPOZİT KİRİŞLERİN EĞİLME  
DAVRANIŞININ DENEYSEL İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**İSMAİL BAHA TORUN**

**BALIKESİR, HAZİRAN – 2019**

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



**GELENEKSEL BETON VE ULTRA YÜKSEK PERFORMANSLI**  
**LİFLİ BETON İÇEREN KOMPOZİT KİRİŞLERİN EĞİLME**  
**DAVRANIŞININ DENEYSEL İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**İSMAİL BAHA TORUN**

**Jüri Üyeleri : Dr. Öğr. Üyesi Kaan TÜRKER (Tez Danışmanı)**

**Prof. Dr. Halit YAZICI**

**Dr. Öğr. Üyesi Umut HASGÜL**

**BALIKESİR, HAZİRAN – 2019**

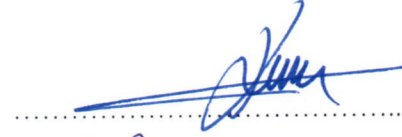
## KABUL VE ONAY SAYFASI

**İsmail Baha TORUN** tarafından hazırlanan “**GELENEKSEL BETON VE ULTRA YÜKSEK PERFORMANSLI LİFLİ BETON İÇEREN KOMPOZİT KİRİŞLERİN EĞİLME DAVRANIŞININ DENEYSEL İNCELENMESİ**” adlı tez çalışmasının savunma sınavı 21.06.2019 tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen jüri tarafından oy birliği ile Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Danışman  
Dr. Öğr. Ü. Kaan TÜRKER



Üye  
Prof. Dr. Halit YAZICI



Üye  
Dr. Öğr. Ü. Umut HASGÜL



Jüri üyeleri tarafından kabul edilmiş olan bu tez Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca onanmıştır.

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Prof. Dr. Necati ÖZDEMİR



## ÖZET

**GELENEKSEL BETON VE ULTRA YÜKSEK PERFORMANSLI  
LİFLİ BETON İÇEREN KOMPOZİT KİRİŞLERİN EĞİLME  
DAVRANIŞININ DENEYSEL İNCELENMESİ  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
İSMAİL BAHA TORUN  
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
(TEZ DANIŞMANI: DR. ÖĞR. ÜYESİ KAAAN TÜRKER)  
BALIKESİR, HAZİRAN 2019**

Çalışmada, betonarme kirişlerde Ultra Yüksek Performanslı Lifli Beton (UYPLB) ve normal dayanımlı Geleneksel Betonun (GB) kompozit olarak kullanımının deneysel incelenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla basınç bölgesinde UYPLB, diğer bölümünde GB içeren kompozit betonarme kirişler üzerinde dört noktalı eğilme testleri gerçekleştirilmiştir. Çalışmada on sekiz dikdörtgen enkesitli (100x150x1500mm) kiriş test edilmiştir. Hacimsel olarak %2.0 oranında mikro çelik lif (0.6mm/13mm) içeren UYPLB kullanılmıştır. Kompozit kirişlerin basınç bölgesinde iki farklı kalınlıkta UYPLB tabakası kalınlığı için inceleme yapılmıştır. %1.22-%5.05 arasında değişen çekme donatısı oranları için parametrik inceleme yapılarak, kirişlerde yeterli sünekliğin sağlanabildiği yüksek donatı oranları belirlenmiştir. Böylece, maliyeti yüksek olan UYPLB'nin az miktarda kullanımı ile yüksek eğilme kapasitesine sahip kirişlerin elde edilmesi hedeflenmiştir. Deneysel çalışmada, kompozit kirişlerle aynı özelliklerde salt GB içeren kirişlerle karşılaştırmalar yapılarak kompozit kirişlerin sağladığı avantajlar (süneklik, kapasite, rijitlik, çatlak dağılımı) ortaya konmuştur. Çalışmada ayrıca, deneysel verilere dayanarak kompozit kirişlerin eğilme tasarımı için geleneksel betonarme esaslarının geçerliliği nümerik olarak irdelenmiştir.

Sonuç olarak, ekonomik miktarda UYPLB kullanımı ile yüksek eğilme kapasitesine sahip sünek UYPLB-GB kompozit kirişlerin üretilebileceği görülmüştür. Çalışmada incelenen kirişlerde, %5'lik donatı oranı için 5 cm'lik UYPLB tabaka kalınlığının yeterli olduğu belirlenmiştir. İncelenen kompozit kirişlerde geleneksel betonarme eğilme tasarımı yaklaşımı yüksek donatı oranları için deney sonuçları ile uyumlu sonuçlar verirken, düşük donatı oranlarında önemli farklar oluşmuştur. Bu nedenle önerilen kompozit uygulama için yeni sayısal yaklaşımların geliştirilmesi gerektiği düşünülmektedir.

**ANAHTAR KELİMELELER:** Ultra yüksek performanslı lifli beton, geleneksel beton, kompozit betonarme kiriş, eğilme davranışı, deneysel çalışma

## **ABSTRACT**

### **EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF FLEXURAL BEHAVIOR OF COMPOSITE REINFORCED CONCRETE BEAMS WITH CONVENTIONAL CONCRETE AND ULTRA HIGH PERFORMANCE FIBER REINFORCED CONCRETE**

**MASTER THESIS**

**İSMAİL BAHA TORUN**

**BALIKESİR UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE**

**CIVIL ENGINEERING**

**(SUPERVIZOR: ASSIST. PROF. DR. KAAAN TÜRKER)**

**BALIKESİR, JUNE 2019**

In the study, it was aimed to experimentally investigate the composite use of Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPFRC) and normal strength Conventional Concrete (CC) in RC beams. For this purpose, four-point bending tests were carried out on the composite RC beams consisting of UHPFRC (at the compression region of the beam) and CC (at the other region of the beam). Eighteen beams with rectangular cross section (100x150x1500 mm) were tested. The straight micro steel fiber (0.6mm/13mm) in the volumetric ratio of 2.0% was used in the UHPFRC layers. Two different thicknesses (3 cm and 5cm) of UHPFRC layer were investigated in the compression region of the composite beams. By making parametric study for the ratio of tensile reinforcements (ranging from 1.22% to 5.05%), high reinforcement ratios where sufficient ductility can be achieved in beams were determined. In this way, it was aimed to obtain beams with high flexural capacity by using the small amount of UHPFRC which has a high cost. In the experimental study, the advantages of composite beams (ductility, flexural capacity, stiffness, cracking pattern) were indicated by comparing the CC beams (reference beams) with the same characteristics. Based on the experimental results, the conventional flexural design approach was evaluated for the composite beams.

As a result, it has been concluded that ductile UHPFRC-CC composite beams with high flexural capacity can be produced with the use of economical amount of UHPFRC. In the investigated beams, it was determined that the thickness of 5 mm (1/3 of the cross-sectional height) UHPFRC layer was sufficient for the 5% reinforcement ratio. In the composite beams, the traditional RC flexural design approach yielded the results consistent with the test results for high reinforcement ratios, while significant differences were obtained in the low reinforcement ratios. Therefore, it is thought that new numerical approaches should be developed for the proposed composite application.

**KEYWORDS:** Ultra-high performance fiber reinforced concrete, normal strength concrete, RC composite beams, flexural behavior, experimental study

# İÇİNDEKİLER

## Sayfa

<b>ÖZET</b> .....	<b>i</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>ii</b>
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	<b>iii</b>
<b>ŞEKİL LİSTESİ</b> .....	<b>iv</b>
<b>TABLO LİSTESİ</b> .....	<b>vii</b>
<b>SEMBOL LİSTESİ</b> .....	<b>viii</b>
<b>ÖNSÖZ</b> .....	<b>ix</b>
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
1.1 Literatür Özeti ve Değerlendirilmesi .....	8
1.2 Çalışmanın Amacı ve Kapsamı .....	14
<b>2. DENEYSEL ÇALIŞMA</b> .....	<b>15</b>
2.1 Test Kirişlerinin Özellikleri.....	15
2.2 Kirişlerde Kullanılan Betonların Özellikleri .....	17
2.3 Test kirişlerinin Hazırlanması .....	18
2.4 Malzeme Testleri .....	22
2.5 Test Düzenegi ve Yapılacak Ölçümler .....	25
2.6 Deneysel Sonuçlar .....	27
2.6.1 Kirişlerin Yük-Düşey Yerdeğiştirme Davranışları.....	27
2.6.2 Kirişlerdeki Çatlak Dağılımları ve Kırılma (Göçme) Şekilleri .....	30
2.6.3 Yerdeğiştirme Süneklikleri .....	38
2.6.4 Kirişlerin Moment-Eğrilik Davranışları .....	40
2.6.5 Eğrilik Süneklikleri ve Etkin Eğilme Rijitlikleri.....	43
2.6.6 Yük/Moment Taşıma Kapasiteleri.....	47
2.6.7 Beton ve Donatı Şekildeğiştirme Davranışları .....	48
<b>3. KOMPOZİT BETONARME KİRİŞLERİN EĞİLME</b> <b>KAPASİTELERİNİN SAYISAL HESABI</b> .....	<b>55</b>
<b>4. SONUÇLAR</b> .....	<b>59</b>
<b>5. KAYNAKLAR</b> .....	<b>62</b>

## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 1.1 : İnce plak ve kent mobilyasında salt UYPLB kullanımına ait örnekler ....	2
Şekil 1.2 : UYPLB'nin prefabrik eleman ve birleşimlerde kullanımına ait örnekler .....	2
Şekil 1.3 : UYPLB'nin onarımlarda kullanımına ait örnekler .....	3
Şekil 1.4 : Türkiye'de UYPLB ile üretilen yağmur suyu ızgaraları ve rögar kapakları .....	3
Şekil 1.5 : Çimento hamurunda silis dumanının doldurma etkisi .....	4
Şekil 1.6 : UYPLB'de kullanılan çelik lif tipi örnekleri .....	5
Şekil 1.7 : UYPLB'nin basınç altındaki gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi .....	6
Şekil 1.8 : UYPLB ve geleneksel lifli betonun eksenel çekme etkisi altındaki gerilme şekildeğiştirme davranışları .....	7
Şekil 2.1 : Kiriş özellikleri ve kodları .....	15
Şekil 2.2 : UYPLB'yi oluşturan bileşenler .....	18
Şekil 2.3 : Kiriş kalıbı ve donatısı .....	19
Şekil 2.4 : UYPLB'de kullanılan bileşenler .....	20
Şekil 2.5 : Akıcı kıvamdaki UYPLB karışımı .....	20
Şekil 2.6 : Geleneksel beton dökümü tamamlanmış kiriş seti .....	21
Şekil 2.7 : Beton basınç dayanımı için alınan küp numuneler .....	21
Şekil 2.8 : Plastik örtü ile sarılmış test kirişleri .....	22
Şekil 2.9 : Kalıptan çıkartılmış test kirişleri .....	22
Şekil 2.10: Numunelerin basınç dayanımlarının belirlenmesi .....	23
Şekil 2.11: Donatıların çekme testi ile mekanik özelliklerinin belirlenmesi .....	24
Şekil 2.12: BAUN-MF Laboratuvarında bulunan mevcut eğilme test düzeneği .....	25
Şekil 2.13: Şematik yükleme ve ölçüm düzeneği .....	26
Şekil 2.14: Test kirişlerindeki şekildeğiştirme ölçer (strain gauge) yerleşimleri .....	27
Şekil 2.15: K1 ( $\rho=0.0122$ ) kirişlerine ait yük-yerdeğiştirme ilişkileri .....	28
Şekil 2.16: K2 ( $\rho=0.0177$ ) kirişlerine ait yük-yerdeğiştirme ilişkileri .....	28
Şekil 2.17: K3 ( $\rho=0.0242$ ) kirişlerine ait yük-yerdeğiştirme ilişkileri .....	28
Şekil 2.18: K4 ( $\rho=0.0319$ ) kirişlerine ait yük-yerdeğiştirme ilişkileri .....	29
Şekil 2.19: K5 ( $\rho=0.0407$ ) kirişlerine ait yük-yerdeğiştirme ilişkileri .....	29
Şekil 2.20: K6 ( $\rho=0.0507$ ) kirişlerine ait yük-yerdeğiştirme ilişkileri .....	29
Şekil 2.21: K3 kirişlerine ait $L/250$ ve $L/70$ yerdeğiştirmeleri .....	30
Şekil 2.22: K1 ( $\rho=0.0122$ ) kirişlerine ait çatlak dağılımları ( $L/250$ yerdeğiştirmesi) .....	31
Şekil 2.23: K1 ( $\rho=0.0122$ ) kirişlerine ait çatlak dağılımları ( $L/70$ yerdeğiştirmesi) .....	31
Şekil 2.24: K1 ( $\rho=0.0122$ ) kirişlerinde kırılma (göçme) durumuna ait çatlak dağılımları .....	31
Şekil 2.25: K2 ( $\rho=0.0177$ ) kirişlerine ait çatlak dağılımları ( $L/250$ yerdeğiştirmesi) .....	32
Şekil 2.26: K2 ( $\rho=0.0177$ ) kirişlerine ait çatlak dağılımları ( $L/70$ yerdeğiştirmesi) .....	32

<b>Şekil 2.27:</b> K2 ( $\rho=0.0177$ ) kirişlerinde kırılma (göçme) durumuna ait çatlak dağılımları .....	32
<b>Şekil 2.28:</b> K3 ( $\rho=0.0242$ ) kirişlerine ait çatlak dağılımları (L/250 yerdeğiştirmesi) .....	33
<b>Şekil 2.29:</b> K3 ( $\rho=0.0242$ ) kirişlerine ait çatlak dağılımları (L/70 yerdeğiştirmesi) .....	33
<b>Şekil 2.30:</b> K3 ( $\rho=0.0242$ ) kirişlerinde kırılma (göçme) durumuna ait çatlak dağılımları .....	33
<b>Şekil 2.31:</b> K4 ( $\rho=0.0319$ ) kirişlerine ait çatlak dağılımları (L/250 yerdeğiştirmesi) .....	34
<b>Şekil 2.32:</b> K4 ( $\rho=0.0319$ ) kirişlerine ait çatlak dağılımları (L/70 yerdeğiştirmesi) .....	34
<b>Şekil 2.33:</b> K4 ( $\rho=0.0319$ ) kirişlerinde kırılma (göçme) durumuna ait çatlak dağılımları .....	34
<b>Şekil 2.34:</b> K5 ( $\rho=0.0407$ ) kirişlerine ait çatlak dağılımları (L/250 yerdeğiştirmesi) .....	35
<b>Şekil 2.35:</b> K5 ( $\rho=0.0407$ ) kirişlerine ait çatlak dağılımları (L/70 yerdeğiştirmesi) .....	35
<b>Şekil 2.36:</b> K5 ( $\rho=0.0407$ ) kirişlerinde kırılma (göçme) durumuna ait çatlak dağılımları .....	35
<b>Şekil 2.37:</b> K6 ( $\rho=0.0507$ ) kirişlerine ait çatlak dağılımları (L/250 yerdeğiştirmesi) .....	36
<b>Şekil 1.38:</b> K6 ( $\rho=0.0507$ ) kirişlerine ait çatlak dağılımları (L/70 yerdeğiştirmesi) .....	36
<b>Şekil 2.39:</b> K6 ( $\rho=0.0507$ ) kirişlerinde kırılma (göçme) durumuna ait çatlak dağılımları .....	36
<b>Şekil 2.40:</b> Kirişlerdeki çatlak genişliklerinin donatı oranına göre değişimi (L/250) .....	37
<b>Şekil 2.41:</b> Kirişlerdeki çatlak genişliklerinin donatı oranına göre değişimi (L/70) .....	37
<b>Şekil 2.42:</b> Yük- düşey yerdeğiştirme ilişkisine ait karakteristik değerler .....	38
<b>Şekil 2.43:</b> Kirişlere ait yerdeğiştirme süneklikleri .....	39
<b>Şekil 2.44:</b> Kompozit kiriş yerdeğiştirme sünekliğinin referans kirişlere göre oranları .....	40
<b>Şekil 2.45:</b> Kiriş orta bölgesindeki ortalama eğrilik ve şekildeğiştirmeler .....	41
<b>Şekil 2.46:</b> K1 ( $\rho=0.0122$ ) kirişlerine ait moment-eğrilik ilişkileri .....	41
<b>Şekil 2.47:</b> K2 ( $\rho=0.0177$ ) kirişlerine ait moment-eğrilik ilişkileri .....	42
<b>Şekil 2.48:</b> K3 ( $\rho=0.0242$ ) kirişlerine ait moment-eğrilik ilişkileri .....	42
<b>Şekil 2.49:</b> K4 ( $\rho=0.0319$ ) kirişlerine ait moment-eğrilik ilişkileri .....	42
<b>Şekil 2.50:</b> K5 ( $\rho=0.0407$ ) kirişlerine ait moment-eğrilik ilişkileri .....	43
<b>Şekil 2.51:</b> K6 ( $\rho=0.0507$ ) kirişlerine ait moment-eğrilik ilişkileri .....	43
<b>Şekil 2.52:</b> Moment- eğrilik bağıntısına ait karakteristik değerler .....	44
<b>Şekil 2.53:</b> Kirişlere ait eğrilik süneklikleri .....	45
<b>Şekil 2.54:</b> Kompozit kiriş eğrilik sünekliklerinin GB'li referans kiriş sünekliklerine oranları .....	45
<b>Şekil 2.55:</b> Kirişlere ait etkin eğilme rijitlikleri .....	46
<b>Şekil 2.56:</b> Kompozit kiriş etkin eğilme rijitliğinin referans kirişlere göre oranları .....	46
<b>Şekil 2.57:</b> Kiriş moment taşıma kapasitelerinin donatı oranı ile değişimi .....	47



<b>Şekil 2.58:</b> Kompozit kiriş moment taşıma kapasitesinin referans kirişlere göre oranları .....	47
<b>Şekil 2.59:</b> K1 ( $\rho=0.0122$ ) kirişlerinde betondan elde edilen birim şekildeğiştirme değerleri .....	48
<b>Şekil 2.60:</b> K2 ( $\rho=0.0177$ ) kirişlerinde betondan elde edilen birim şekildeğiştirme değerleri .....	49
<b>Şekil 2.61:</b> K3 ( $\rho=0.0242$ ) kirişlerinde betondan elde edilen birim şekildeğiştirme değerleri .....	49
<b>Şekil 2.62:</b> K4 ( $\rho=0.0319$ ) kirişlerinde betondan elde edilen birim şekildeğiştirme değerleri .....	49
<b>Şekil 2.63:</b> K5 ( $\rho=0.0407$ ) kirişlerinde betondan elde edilen birim şekildeğiştirme değerleri .....	50
<b>Şekil 2.64:</b> K6 ( $\rho=0.0507$ ) kirişlerinde betondan elde edilen birim şekildeğiştirme değerleri .....	50
<b>Şekil 2.65:</b> Kirişlerdeki maksimum yük/moment değerindeki maksimum beton birim şekildeğiştirmeleri .....	51
<b>Şekil 2.66:</b> Moment taşıma kapasitesine ulaşmış kompozit kirişlerde geleneksel betondaki birim şekildeğiştirmeler .....	51
<b>Şekil 2.67:</b> Kirişlerin orta bölgesinde maksimum moment değerindeki ortalama çekme donatısı birim şekildeğiştirmeleri.....	52
<b>Şekil 2.68:</b> Kompozit kirişlerde maksimum yüke karşılık gelen beton ve donatı birim şekildeğiştirme durumları .....	53
<b>Şekil 3.1 :</b> Sayısal hesapta esas alınan şekildeğiştirme ve gerilme durumları .....	55
<b>Şekil 3.2 :</b> Teorik ve deneysel eğilme kapasitelerinin karşılaştırması .....	56

## TABLO LİSTESİ

### Sayfa

<b>Tablo 1.1 :</b> UYPLB'nin temel mekanik özellikleri için sınır değerler.....	5
<b>Tablo 2.1 :</b> Kirişlerde kullanılan çekme donatıları .....	16
<b>Tablo 2.2 :</b> Geleneksel beton için kullanılan bileşenler ( $\text{kg/m}^3$ ) .....	17
<b>Tablo 2.3 :</b> UYPLB'yi oluşturan bileşen miktarları ( $\text{kg/m}^3$ ) .....	18
<b>Tablo 2.4 :</b> Kirişlerde kullanılan betonun ortalama basınç dayanımları .....	23
<b>Tablo 2.5 :</b> Kirişlerde kullanılan çekme donatılarının mekanik özellikleri .....	24
<b>Tablo 2.6 :</b> Kirişlerin yük-yerdeğiştirme ilişkisine ait karakteristik değerler .....	39
<b>Tablo 2.7 :</b> Kirişlerin moment-eğrilik ilişkisine ait karakteristik değerler .....	44
<b>Tablo 3.1 :</b> Teorik ve deneysel moment kapasitelerinin karşılaştırılması .....	56

## SEMBOL LİSTESİ

$\rho$	: Çekme donatısı oranı
$\rho_d$	: Dengeli donatı oranı
$\rho_{max}$	: Maksimum donatı oranı
$E$	: Elastisite modülü
$f_y$	: Çekme donatısı akma dayanımı
$f_u$	: Çekme donatısı kopma dayanımı
$L$	: Kiriş açıklığı
$\Delta_y$	: Akma düşey yerdeğiştirmesi
$\Delta_u$	: Süneklik hesabında kullanılan maksimum yerdeğiştirme
$P_{max}$	: Maksimum yük
$P_u$	: Süneklik hesabında kullanılan yük
$\mu_\Delta$	: Yerdeğiştirme sünekliği
$\mu_x$	: Eğrilik sünekliği
$M_u$	: Süneklik hesabında kullanılan moment
$M_{maks}$	: Maksimum moment
$\chi_y$	: Akma eğriliği
$\chi_u$	: Maksimum eğrilik
$EI_e$	: Etkin eğilme rijitliği
$\mathcal{E}_c$	: Beton Őekildeđiřtirmesi
$\mathcal{E}_s$	: Donatı Őekildeđiřtirmesi
$f_c$	: Beton basınç gerilmesi
$f_s$	: Donatı gerilmesi
$f_{ck}$	: Beton karakteristik basınç dayanımı
$F_c$	: Beton basınç gerilmesi bileşkesi
$F_s$	: Donatılardaki çekme gerilmesi bileşkesi
$c$	: Basınç bölgesi uzunluğu
$k_1$	: Beton dayanımının eşdeğer gerilme bloğuna etki katsayısı
$M_t$	: Teorik moment kapasitesi
$M_d$	: Deneysel moment kapasitesi

## ÖNSÖZ

Yüksek lisans tezi olarak sunulan bu çalışmada geleneksel beton ve ultra yüksek performanslı lifli beton içeren kompozit kirişlerin eğilme davranışları deneysel olarak incelenmiştir.

Çalışmalar sırasında mezun olduğum Balıkesir Üniversitesi bünyesinde bulunan tüm hocalarıma kattıkları bilgiler için teşekkür ederim. Teoride ve pratikte maddi ve manevi yardımları bulunan başta tez danışmanım Sayın Dr. Öğr. Ü. Kaan TÜRKER'e, deneysel çalışmalarda mesaisinden ödün verip katkı sağlayan Sayın Dr. Öğr. Ü. Tamer BİROL'a, tez çalışmasının bitmesi için yıllar boyu şahsımı motive eden Sayın Dr. Öğr. Ü. Altuğ YAVAŞ'a ve lisans eğitimimle birlikte bilgi birikimime değerli katkılar veren Sayın Dr. Öğr. Ü. Umut HASGÜL'e şükranlarımı sunuyorum.

Bugünlere gelmemde emeği olan ve desteklerini benden esirgemeyen aileme, her zaman yanımda olduklarını bildiğim ve biri bu dünyada, diğeri öbür dünyada olan Türkan'lara ve namütenahi ilgisiyle lütuflar sunan eşime nihayetinde minnet ve şükranla teşekkür ederim.

BALIKESİR, 2019

İsmail Baha TORUN

# 1. GİRİŞ

Her geçen gün daha büyük açıklıklı ve daha yüksek yapılara olan ihtiyaçlar artmakta, bu da beraberinde bilim insanlarını daha yüksek dayanımlı yapı malzemeleri arayışına motive etmektedir. Bu bağlamda özellikle 1980’li yıllardan sonra beton teknolojisinde önemli gelişmeler yaşanmıştır [1]. Betonda silis dumanı ve özel akışkanlaştırıcılar kullanılmaya başlanması ile çok sıkı iç yapıya sahip betonların üretilmesi mümkün olmuş ve ultra yüksek basınç dayanımları (140 MPa – 200 MPa) elde edilebilmiştir [2-5]. Özel karıştırıcılar ve kür koşulları ile bu dayanımlar daha da arttırılabilir hale gelmiştir [6-9]. Ultra yüksek dayanımlara sahip bu tür betonlarda sünekliği arttırmak amacıyla karışıma çeşitli lifler (çelik, karbon, sentetik vb.) eklenerek, lif takviyeli betonlar elde edilmekte ve bunlar Ultra Yüksek Performanslı Lifli Beton (UYPLB) veya Yüksek Performanslı Lif Takviyeli Çimento Kompoziti olarak tanımlanmaktadır [1, 10-15]. UYPLB içindeki lifler, çatlakları sınırlandırarak çevre koşullarına karşı betonun durabilitesini arttırmakta ve ayrıca geleneksel normal veya yüksek dayanımlı betonlara göre üstün mekanik özellikler (çekme dayanımı, süneklik vb.) sağlamaktadır [2-5, 15-17]. Bu özellikleri nedeniyle UYPLB’nin yapısal elemanlarda kullanımı, dayanım, rijitlik, süneklik ve durabilite bakımından önemli avantajlar sağlayarak, daha ekonomik, estetik ve uzun ömürlü yapılara imkân verecek potansiyele sahiptir.

2000’li yıllardan itibaren ABD, Kanada, Japonya, Avustralya ve bazı Avrupa ülkelerinde UYPLB’nin çeşitli pratik uygulamaları ile karşılaşılmalıdır [11-13]. UYPLB yüksek mekanik özellikleri sayesinde donatısız olarak (salt), donatılı betonarme betonu olarak veya yüksek durabilite özelliği nedeniyle betonarme elemanları koruma amaçlı kaplama olarak kullanılmaktadır. İnce plaklar, paneller, kabuklar ve çeşitli kent mobilyaları salt UYLPB kullanılarak üretilen elemanlara örnek olarak gösterilebilmektedir (Şekil 1.1). UYPLB’nin sünekliği ve yüksek durabilite özelliği nedeniyle diğer bir kullanım alanı da büyük açıklıklı prefabrik kirişler ve prefabrik yapılardaki ıslak birleşimler ve özel birleşim elemanlarıdır. (Şekil 1.2).

Yüksek durabilite özellikleri nedeniyle, çevre koşullarına maruz betonarme köprü, viyadük, iskele, liman, baraj vb. yapıların onarım ve takviyesi de UYPLB'nin en çok kullanıldığı alanlardan birisidir (Şekil 1.3). Ayrıca patlamalara dayanıklı yapılar, yüksek yapılar, deniz yapıları vb. kullanım alanları bulunmaktadır.



Şekil 1.1: İnce plak ve kent mobilyasında salt UYPLB kullanımına ait örnekler.



Şekil 1.2: UYPLB'nin prefabrik eleman ve birleşimlerde kullanımına ait örnekler.



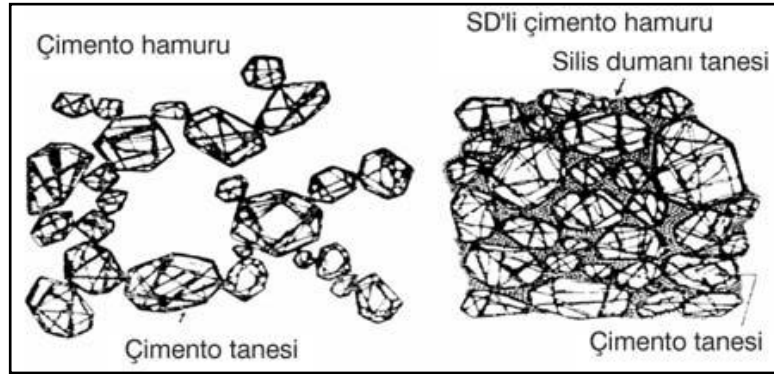
**Şekil 1.3:** UYPLB'nin onarımlarda kullanımına ait örnekler.

Ülkemizde UYPLB'nin pratikte kullanımına örnek olarak, İstanbul Teknik Üniversitesi – İSTON firması ortak çalışması olan yağmur suyu ızgarası ve rögar kapakları gösterilebilmektedir [18]. Yapısal olmayan bu elemanlar salt UYPLB ile üretilmiştir (Şekil 1.4).



**Şekil 1.4:** Türkiye'de UYPLB ile üretilen yağmur suyu ızgaraları ve rögar kapakları [18].

UYPLB genel olarak, çimento, silis dumanı, ince agrega, su, süper akışkanlaştırıcı katkı ve liflerden oluşmaktadır. Yüksek basınç dayanımının elde edilebilmesi için normal dayanımlı betonlara göre daha yüksek oranda çimento kullanılmaktadır. Çimento hamurundaki boşluklu yapının azaltılması ve maksimum sıklık oranına sahip içyapının oluşturulabilmesi için, yüksek inceliğe sahip silis dumanı kullanılmaktadır. Silis dumanı içeren çimento hamurunda silis dumanı çok etkili olmakta ve sıkı bir diziliş sağlamaktadır (Şekil 1.5) [19].



**Şekil 1.5:** Çimento hamurunda silis dumanının doldurma etkisi [19].

UYPLB'de, çimento miktarını ve boşluk miktarını azaltmak, işlenebilirliği artırmak amacıyla yüksek fırın cürufu da kullanılabilir. UYPLB'de sıkı bir içyapı oluşturmak amacıyla çok ince ve yüksek dayanımlı agregalar (kuvars, bazalt vb.) kullanılmaktadır. Yüksek dayanımın sağlanması için çok düşük su/çimento oranları ile üretilen UYPLB'de işlenebilirliğin sağlanabilmesi amacıyla süper akışkanlaştırıcı katkı kullanılması gerekmektedir. Betonun sünekliğini arttırmak ve mekanik özelliklerini iyileştirmek için genellikle çelik olmak üzere, sentetik, bazalt vb. lifler kullanılmaktadır.

Çelik lif tipleri büyük çeşitlilik göstermekle birlikte geometrik boyutlar bakımından genel olarak ikiye ayrılabilirler. Bunlar mikro boyutlu lifler ve makro boyutlu liflerdir. Mikro lifler çok ince ve kısa, makro lifler ise daha kalın ve uzun boyutlarda üretilmektedir. Mikro lifler genellikle düz, makro lifler ise dalgalı, kancalı formlarda üretilmektedir. Kullanılan bazı lif tipleri Şekil 1.6'da gösterilmiştir.





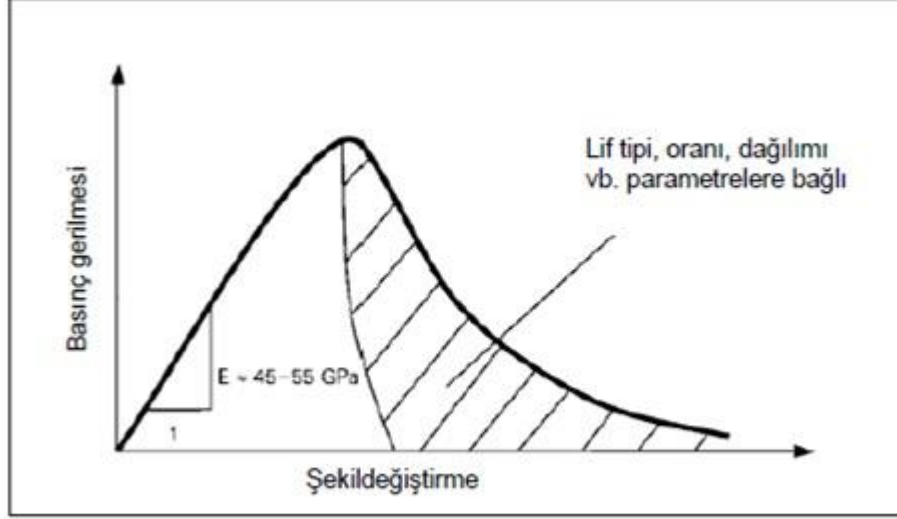
**Şekil 1.6:** UYPLB’de kullanılan çelik lif tipi örnekleri.

UYPLB’lerde genel olarak yüksek dayanımlı çelik lifler tercih edilmektedir. UYPLB’nin mekanik özellikleri, kullanılan lifin tipine, boyutlarına ve hacimsel oranına bağlı olarak değişiklik göstermekle birlikte genel olarak Tablo 1.1’de verilen sınır değerler arasında değişmektedir [13].

**Tablo 1.1:** UYPLB’nin temel mekanik özellikleri için sınır değerler [13].

Mekanik özellikler	Basınç dayanımı (MPa)	Çekmede çatlama dayanımı (MPa)	Elastisite Modülü (GPa)	Poisson Oranı	Termal Genleşme Katsayısı ( $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ )
Sınır Değerler	140-200	6-10	40-70	0.2	10-15

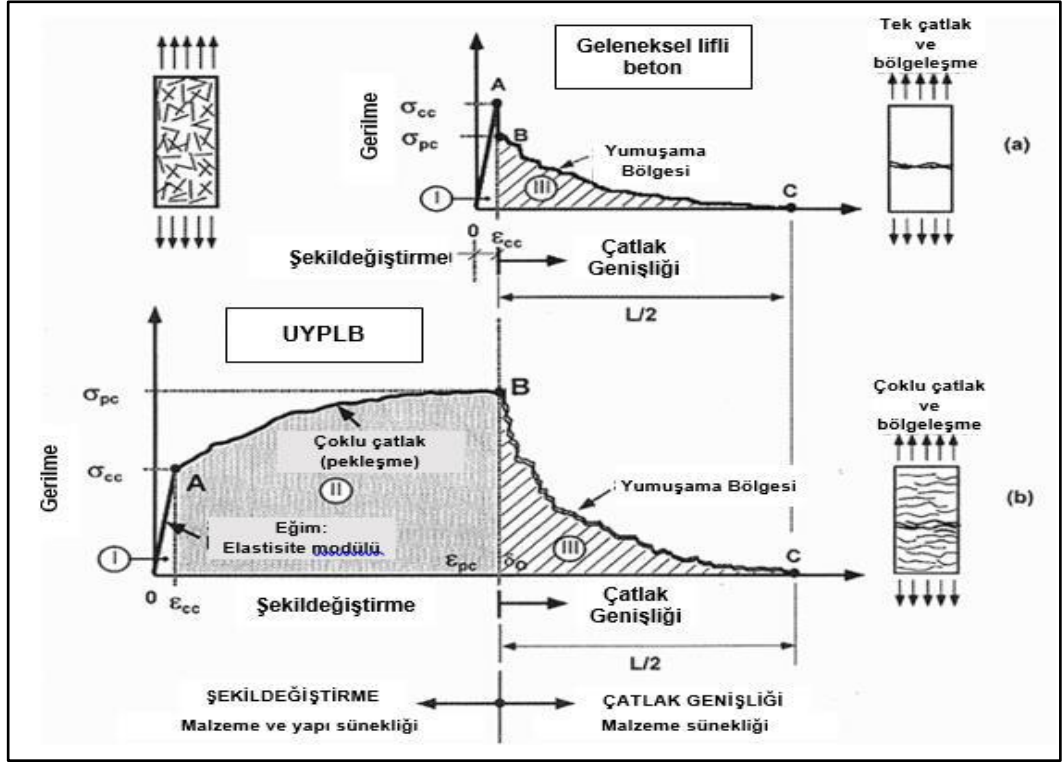
UYPLB eksenel basınç altında dayanımının %70-%80’ine kadar lineer elastik davranış göstermekte, tepe noktasına ulaşıldığında betondaki birim kısaltmalar 0.003-0.005 arasında değişmektedir [11]. Tepe noktasından sonra lif tipi, oranı, dağılımı ve yönlenmesine bağlı olarak belirli bir eğimle azalan davranış göstermektedir (Şekil 1.7) [11].



**Şekil 1.7:** UYPLB'nin basınç altındaki gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi [11].

UYPLB'nin geleneksel lifli veya lifsiz betonlardan en önemli farkı çekme altındaki davranışdır. UYPLB eksenel çekme etkisi altında ilk çatlak sonrası artan pekleşme davranışı (strain-hardening) göstererek yük taşıma kapasitesinde artış gösterir. Şekil 1.8'de UYPLB ve geleneksel lifli betonun eksenel çekme etkisi altındaki şematik davranışı görülmektedir [15]. Kullanılan lifler ilk çatlak sonrası mikro düzeydeki çatlakları sınırlayarak betonun yük taşımaya devam etmesini sağlamaktadır. Bu aşamada çok sayıda mikro düzeyde çatlak oluşmaktadır. Tepe yüküne ulaşıldığında ise çatlak genişliklerinin artması ile lifler sıyrılmaya başlamakta ve çatlaklar bir bölgede yoğunlaşarak büyük bir çatlak oluşturmaktadır. Maksimum yük sonrası yük düşüşü (yumuşama) başlamaktadır (Şekil 1.8). UYPLB'da kullanılan lifin hacimsel oranı ve mekanik özelliklerine baēlı olarak betonun kapasitesi, rijitliēi, sünekliēi (tokluēu) büyük farklılık göstermektedir. Şekil 1.8'de görüldüēu gibi geleneksel betona lif katıldığında maksimum yük sonrası pekleşme oluşmamakta, doğrudan yumuşama davranışı gözlenmektedir [15]. Bu fark, UYPLB'un sıkı iç yapısı nedeniyle liflerle saēlanan yüksek aderanstan kaynaklanmaktadır.

Salt UYPLB'nin eğilme altındaki davranışında ise çekme dayanımı belirleyici olmakta, bu nedenle eksenel çekmede olduēu gibi ilk çatlak sonrası pekleşmeli ve sonrasında yumuşamalı bir davranış elde edilmektedir.



**Şekil 1.8:** UYPLB ve geleneksel lifli betonun aksenal çekme etkisi altındaki gerilme şekil değiştirme davranışları [15].

UYPLB'nin içeriğindeki lifler betonarme elemanların davranışını önemli ölçüde değiştirmektedir. Bu nedenle mevcut betonarme standartları bu betonu içeren yapı elemanlarının tasarımı için yetersiz kalmaktadır. Bazı ülkelerde UYPLB içeren betonarme elemanların eğilme, kesme vb. tasarımı için kılavuzlar hazırlanmıştır [10-14]. Bu kılavuzlarda önerilen yöntemler, lif içeriğine ve pratikte uygulanması zor olan malzeme testlerine (eğilme, aksenal çekme vb.) bağlı olarak kullanılmaktadır. Bunun sonucunda, UYPLB'nin kullanımı daha çok özel projelerle sınırlı kalmaktadır.

UYPLB'nin pratikteki kullanımının yaygınlaşması için üretim prosedürlerinin, test metodlarının ve tasarım esaslarının standartlaşmasına yönelik deneysel çalışmalara ihtiyaç duyulmaktadır. Potansiyel avantajları nedeniyle çalışmaların yoğunlaştığı yapısal elemanlardan biri betonarme kirişlerdir. Kirişlerde UYPLB kullanımı ile işletme yükleri altındaki sehim ve çatlaklar sınırlandırarak betonun durabilitesi arttırılmaktadır [20-25]. UYPLB'de lifler tarafından sağlanan çekme dayanımı, kirişlerin eğilme dayanımına önemli katkı sağlamaktadır [20, 22-24, 26]. UYPLB'nin yüksek basınç dayanımı ve şekil değiştirme kapasitesi sayesinde,

kirişlerde yüksek çekme donatısı oranlarında dahi yeterli sünekliğin sağlanabildiği belirlenmiştir [23, 24, 27]. UYPLB'nin kirişlerde sağladığı bir diğer avantaj kesme kapasitesine olan katkısıdır. Birçok çalışmada, UYPLB içeriğindeki liflerin kesme donatısını azaltacak veya kaldıracak potansiyele sahip olduğu rapor edilmiştir [28-34].

Literatürdeki UYPLB içeren kiriş eğilme çalışmaları incelendiğinde; sadece düşük çekme donatısı içeren kirişlerde kapasite artışı sağlanabildiği, çekme donatısı arttıkça sağlanan avantajın azaldığı görülmektedir [23, 24]. UYPLB ile sağlanan bu kapasite artışı da ilave donatı ile çok daha ekonomik olarak sağlanabilecek düzeyde olmaktadır. Bununla birlikte, düşük çekme donatısı içeren kirişlerde çekme bölgesinde oluşan çatlak lokalleşmesi (crack localization) nedeniyle sünekliklerin önemli ölçüde azaldığı ve eğilme davranışlarının erken donatı kopması ile sonuçlandığı bilinmektedir [20, 26, 35-38]. Bu durumda UYPLB'nin yüksek basınç dayanımından ve şekildeğiştirme kapasitesinden yeterince yararlanılamamaktadır. Bu sonuçlara göre, kirişlerin çekme bölgesinde UYPLB bulunmasının bazı avantajlar sağlamakla birlikte eğilme davranışına önemli olumsuz etkisinin de olduğu anlaşılmaktadır.

Kirişlerin eğilme kapasitesi bakımından, UYPLB'nin Geleneksel (normal dayanımlı) Beton (GB) ile birlikte (kompozit olarak) kullanımının daha etkin ve ekonomik çözümler sağlama potansiyeli bulunmaktadır. Basınç bölgesinde UYPLB kullanımı ile basınç dayanımından ve liflerin sağladığı şekildeğiştirme kapasitesinden etkin şekilde yararlanmak ve ayrıca, çekme bölgesinde GB kullanımı ile çatlak lokalleşmelerinin önüne geçilerek sünekliğin sağlanması mümkün olacaktır. Böylece, kirişlerde çok yüksek çekme donatısı oranlarına çıkılabilecek ve maliyeti yüksek olan UYPLB'nin çok daha az miktarda kullanılması sayesinde çok daha narin ve ekonomik tasarımlara olanak sağlanacağı düşünülmektedir.

## **1.1 Literatür Özeti ve Değerlendirilmesi**

Bu bölümde, UYPLB'nin GB ile birlikte kullanıldığı kompozit kirişler ile ilgili literatür incelemesinin sonuçları sunulmuş ve değerlendirilmiştir.

**Alaee ve Karihaloo (2003)'de** [39]; UYPLB'den üretilmiş ince plakalar (şeritler) ile geleneksel betonarme elemanların güçlendirildiği deneysel ve nümerik bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, 100x150 mm enkesitinde, 1200 mm boyunda ve düşük donatı oranına (1φ12) sahip kirişler kullanılmıştır. Güçlendirilen kirişlerin basınç dayanımları 45-47MPa, plakaların üretiminde kullanılan UYPLB 185-207MPa'dır. CARDIFRC olarak tanımlanan ve % 6 oranında hibrit çelik lif içeren UYPLB'den 16 ve 20 mm kalınlığında plakalar üretilmiştir. Bu plakalar dört farklı şekilde uygulanarak eğilme ve kesme bakımından güçlendirmeler yapılmıştır. Plakaların uygulanacağı beton yüzeylerde pürüzlendirme ve belirli aralıklarla çentikleme yapılmış ve plakalar epoksi yapıştırıcı ile yapıştırılmıştır. İki grup halinde üretilen kirişlerden birinci grubu oluşturan 32 kirişte salt eğilme donatısı kullanılmış ve bunlara dört noktalı eğilme testi uygulanmıştır. Diğer grupta bulunan 14 kirişte eğilme ve kesme donatısı kullanılmış ve bunlara üç noktalı eğilme testi uygulanmıştır. Her bir gruptan belirli sayıda referans kirişi hazırlanmış ve diğer kirişlere kapasitelerinin yaklaşık % 75'ine kadar bir ön yükleme yapılarak belirli düzeyde hasar oluşturulmuştur. Daha sonra, UYPLB plakalarla güçlendirme uygulaması yapılarak kırılma yüküne kadar tekrar yükleme yapılmıştır. Uygulanan güçlendirme tekniğinin hasarlı kirişlerde kesme ve eğilme davranışında önemli iyileştirme sağladığı ve önerilen nümerik model ile deney sonuçlarıyla uyumlu sonuçlar elde edilebildiği rapor edilmiştir.

**Habel vd. (2006)'da** [16]; çekme bölgesi UYPLB tabakası ile güçlendirilen betonarme eğilme elemanları ile ilgili parametrik bir nümerik çalışma yapılmıştır. Daha önce doğrulanmış malzeme modelleri kullanılan ve kesit analizine dayanan çalışmada üç farklı güçlendirme tipi incelenmiştir. Birinci tipte, mevcut betonarme elemanı sadece dış etkilerden koruma amaçlı ince bir UYPLB tabakası göz önüne alınmıştır. İkinci tipte, hem koruma hem de dayanıma katkı amacıyla daha kalın ve donatılı bir UYPLB tabakası göz önüne alınmıştır. Üçüncü tipte ise, dayanımı arttırmak amacıyla farklı donatılar (yüksek dayanımlı çelik ve cam lifli kompozit) ve daha kalın UYPLB tabakaları (4-10cm arasında değişen) göz önüne alınmıştır. Genel olarak, incelenen tüm alternatiflerin betonarme elemana rijitlik ve dayanım kattığı ve çatlak oluşumunu geciktirerek işletme yükleri altında dış etkilere karşı koruma görevini başardığı belirtilmiştir. UYPLB tabakası içinde donatı kullanılmasının kompozit elemanın dayanımını arttırmada en etkili yol olduğu rapor edilmiştir.

Çalışmada ayrıca, çekme donatısı oranının, UYPLB'deki pekleşme ve yumuşama büyüklüğünün ve sekant modülü değişiminin davranışa etkileri de incelenmiştir. %1-5 arasında değişen çekme donatısı oranları için moment kapasitelerinin yaklaşık 2-4 kat arttığı belirlenmiş ve yüksek donatı oranlarına rağmen yeterli sünekliklerin sağlandığı görülmüştür.

**Noshirvani ve Brühwiler (2013)**'de [40]; belirli kalınlıkta UYPLB ile takviye edilerek kompozit hale getirilen geleneksel betonlu kirişlerin eğilme ve kesme davranışları deneysel olarak incelenmiştir. UYPLB takviyesi, kirişlerin çekme bölgesine yapılmış ve deneyler tek noktadan yüklü konsol kirişler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, 50 mm kalınlığında UYPLB tabakası içeren 150x300 mm enkesitinde üç farklı boyda kompozit kiriş incelenmiştir. Yapılan testlerle 2.3-4.2 arasında değişen a/d oranları göz önüne alınmıştır. Geleneksel beton olarak, C30/37 sınıfı, UYPLB olarak 160 MPa ortalama basınç dayanımına sahip beton kullanılmıştır. UYPLB tabakası içinde 8 mm çapında boyuna donatılar kullanılmış bunlar mesnet bölgesinde kaynaklı bağlantılar ile ankrajlanmıştır. Ayrıca, bu donatıların bulunmadığı iki kompozit kiriş ve 3 adet kompozit olmayan referans kirişi de test edilerek sonuçlar karşılaştırılmıştır. Yapılan UYPLB takviyesi ile betonarme kirişlerin hem eğilme hem de kesme dayanımında önemli artışlar sağlanmıştır. İki beton tabakası arasında herhangi bir donatı kullanılmadığı için bu bölgede oluşan deformasyonlar kiriş davranışını önemli ölçüde etkilemiş ve düzlem kesit teorisinin sağlanamadığı gözlenmiştir. Bununla birlikte, yetersiz etriyeli elemanlarda gözlenen kesme kırılmasının UYPLB takviyesi ile önlenemediği ve davranışın eğilmeye çevrilebildiği görülmüştür.

**Husein ve Amleh (2015)**'de [41]; enkesit yüksekliğinin yarısı UYPLB, diğer yarısı normal dayanımlı beton ile üretilen kompozit kirişlerin eğilme/kesme davranışları deneysel olarak incelenmiştir. Çekme bölgesi UYPLB içeren kirişlerde üç noktalı eğilme testi uygulanmıştır. Çalışmada, 50 mm kalınlığında UYPLB tabakası içeren 150x300 mm enkesitinde, 1584 mm boyunda ve yüksek donatı oranına (yaklaşık % 6.5) sahip kirişler test edilmiştir. Kompozit kirişlerde, basınç dayanımları 51-70MPa arasında olan geleneksel beton ve 159-191MPa arasında olan UYPLB kullanılmıştır. İki referans kiriş (salt normal beton ile), 14 kompozit kiriş olmak üzere toplam 16 kiriş üretilmiştir. UYPLB'da üç farklı lif oranı (%0.5, 1.0,

1.5) kullanılarak lif oranı etkisi de incelenmiştir. Kirişlerde, iki beton tabakası arasında ankrajsız durum, kesme çivileri ile ankraj ve U şeklinde donatılarla ankraj olmak üzere üç farklı uygulama yapılmıştır. Ayrıca kiriş boyunun sadece yarısında etriye uygulaması yapıp, ankrajların yapıldığı diğer yarısında kesme kırılması oluşması sağlanmıştır. Kirişlerde asal basınç gerilmelerinin sebep olduğu kesme kırılması gözlenmiş, kesme kapasitesinin normal betonlu kirişlere göre önemli ölçüde arttığı belirlenmiştir. Uygulanan ankraj tiplerinin kesme kapasitesine önemli bir etkisinin olmadığı görülmüştür.

**Safdar vd. (2016)'da** [42]; farklı kalınlıklarda UYPLB tabakası ile güçlendirilen betonarme kirişlerin eğilme davranışı deneysel ve nümerik olarak incelenmiştir. Çekme ve basınç bölgesinde üçer farklı kalınlıkta (20, 40, 60 mm) UYPLB tabakasının uygulandığı kirişlerde dört noktalı eğilme testleri gerçekleştirilmiştir. 250x400 mm enkesitinde, 3000mm boyunda 7 kiriş kullanılan çalışmada, ortalama basınç dayanımı 29.7 MPa olan geleneksel beton ve 156.3 MPa olan UYPLB kullanılmıştır. Kiriş dökümleri iki aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk olarak geleneksel beton dökümü yapılmış, 24 saat beklendikten sonra beton yüzeyine yüksek basınçlı su uygulanarak temizlenmiştir. Daha sonra UYPLB dökümü gerçekleştirilmiştir. 20 mm kalınlığındaki uygulamada iki beton arasındaki etkileşim sadece sürtünme aderansı ile sağlanırken, diğer iki uygulamada UYPLB tabakası kalınlıklarının fazla olması nedeniyle kesme amacıyla yerleştirilen etriyeler ve boyuna donatılar da etkili olmuştur. Basınç ve çekme bölgesine yapılan takviyelerde benzer dayanım artışları elde edilirken, çekme bölgesindeki uygulamalarda sünekliklerin çok azaldığı gözlenmiştir. Çekme bölgesinde 40 ve 60mm'lik UYPLB takviyelerin işletme yüklerindeki çatlakları sınırlayarak betonu koruma görevini sağladığı, 20 mm'lik takviyenin ise aderans yetersizliği nedeniyle mevcut betondan ayrılarak yetersiz kaldığı rapor edilmiştir. Çalışmada ayrıca, UYPLB takviyeli kirişlerin eğilme davranışları için sonlu elemanlar yöntemi ile analitik modeller oluşturulmuş ve çekme donatısında akma dayanımının etkisi ve UYPLB çatlama dayanımının etkisi parametrik olarak incelenmiştir.

**Osta vd. (2017)'de** [43]; farklı şekillere uygulanan UYPLB tabakası ile güçlendirilen betonarme kirişlerin eğilme davranışı deneysel ve nümerik olarak incelenmiştir. Alternatif uygulamaların yapıldığı çalışmada, kirişlerde dört noktalı

eğilme testleri gerçekleştirilmiştir. 30 mm kalınlığında olan ve hibrit lif ile üretilen UYPLB tabakaları, önceden hazırlanmış plakaların yapıştırılması ve yerinde dökme olmak üzere iki farklı şekilde uygulanmıştır. Yerinde dökme uygulaması öncesinde kiriş yüzeyinde kumlama yapılarak 2 mm derinliğinde pürüzlendirme yapılmıştır. 140x230 mm enkesitinde 1600 mm boyunda 8 kiriş kullanılan çalışmada, ortalama beton dayanımları geleneksel beton için 54 MPa, UYPLB için 128 MPa elde edilmiştir. Yapılan güçlendirmenin eğilme rijitliğini ve kapasitesini önemli ölçüde arttırdığı belirlenmiştir. Takviye yapılan kenar sayısı arttıkça katkının arttığı, kirişin üç kenarından takviye yapılan durumda yeterli sünekliğin elde edilemediği gözlenmiştir. UYPLB takviyenin uygulama şeklinin (yerinde dökme ve epoksi ile yapıştırma) davranışta önemli bir fark yaratmadığı gözlenmiştir.

**Tanarşlan (2017)'de** [44]; UYPLB plakalar ile güçlendirilen betonarme kirişlerin eğilme davranışı deneysel olarak incelenmiştir. % 3 mikro lif içeren UYPLB plakaların 3 farklı şekilde uygulandığı kirişlerde dört noktalı eğilme testleri gerçekleştirilmiştir. 4 adet kirişte sadece çekme bölgesinde güçlendirme uygulanmış ve bunlarda 50mm kalınlığında UYPLB plaka kullanılmıştır. Bu kirişlerin ikisinde UYPLB içinde donatı da eklenmiştir. 1 adet kirişte, çekme bölgesindeki 50mm kalınlığında UYPLB plaka ile birlikte basınç bölgesine 30 mm kalınlığında plaka uygulanmıştır. Ayrıca 1 adet kirişte, mesnet bölgesinde yan yüzlerine karbon fiber şeritler yapıştırılmıştır. Çalışmada UYPLB plakaların kirişe bağlanmasında epoksi ile yapıştırma ve çelik bulonla ankrajlama alternatifleri uygulanmıştır. 150x250 mm enkesitinde 3200mm boyunda toplam 7 kiriş kullanılan çalışmada, ortalama beton dayanımları geleneksel beton için 20.3 MPa, UYPLB için 204 MPa elde edilmiştir. Yapılan güçlendirmenin eğilme rijitliğini ve kapasitesini önemli ölçüde arttırdığı belirlenmiştir. UYPLB plakaların bulonlu ankrajlanmasının yapıştırmaya göre daha iyi sonuçlar verdiği rapor edilmiştir. Dayanım ve rijitlik bakımından en iyi performans çekme ve basınç bölgelerinde plaka eklenen kirişte elde edilmiştir.

**Tanarşlan vd. (2017)'de** [45]; UYPLB plakalar ile güçlendirilen betonarme kirişlerin eğilme davranışı deneysel olarak incelenmiştir. Çalışmada öncelikle farklı oranlarda lif içeriklerine (%0-%4 arasında) sahip UYPLB karışımları üzerinde malzeme ölçeğinde testler yapılarak eğilme ve basınç dayanımı bakımından uygun lif içeriği (% 3.0) belirlenmiştir. Bu lif içeriği kullanılarak 30x150x3000mm



boyutlarında donatılı ve donatısız UYPLB plakalar üretilerek dört noktalı eğilme testleri yapılmıştır. Yapılan düşey deplasman ölçümü sınırları içinde donatılı plakada elastik davranış gözlenirken, donatısız plakada daha düşük yüklerde kırılma gözlenmiştir. Bu donatılı ve donatısız plakalar bulonla ankrajlama ve epoksi ile yapıştırma teknikleri kullanılarak betonarme kirişlerin çekme bölgesindeki yüzüne uygulanmış ve dört noktalı eğilme testleri gerçekleştirilmiştir. Birisi salt normal dayanımlı referans kirişi, diğer dördü UYPLB plaka ile takviye edilmiş kiriş olmak üzere toplam 5 kiriş test edilmiştir. İki boyuna donatılı diğer ikisi donatısız olan kirişlerde, donatılı ve ankrajlama ile birleştirilen kirişler rijitlik ve dayanım bakımından en iyi performansı göstermiştir. UYPLB plakanın epoksi ile yapıştırıldığı boyuna donatılı kirişte, maksimum yükte tabakanın birleşim yüzeyinden ayrılması sonucu gevrek bir davranış gözlenmiştir.

**Paschalis vd.(2018)'de** [46]; belirli kalınlıkta UYPLB tabakası ile takviye edilen geleneksel betonarme kirişlerin eğilme davranışları deneysel ve nümerik olarak incelenmiştir. UYPLB takviyesi, kirişlerin çekme bölgesine yapılmış ve kirişlerde dört noktalı eğilme testi uygulanmıştır. Çalışmada, 50 mm kalınlığında UYPLB tabakası içeren 150x250 mm enkesitinde 2150 mm boyunda kirişler test edilmiştir. Ortalama basınç dayanımları 39.5MPa olan geleneksel beton ve 136.5MPa olan UYPLB kullanılmıştır. Çalışmada, ikisi referans kirişi, dördü UYPLB takviyeli olmak üzere toplam 6 kiriş test edilmiştir. Takviyeli kirişlerin ikisinde ayrıca boyuna donatılar da ilave edilmiştir. İki beton tabakası arasında herhangi bir ankraj uygulanmamıştır. Donatısız UYPLB takviyesinin dayanımda önemli bir artış sağlamadığı, donatılı takviyenin ise oldukça yüksek kapasite artışı sağladığı belirlenmiştir. Her iki takviye türü de eğilme rijitliğinde belirli bir artış sağlamıştır. Çalışmada, kompozit kirişlerdeki iki beton yüzeyi arasındaki kayma miktarı ölçümleri de yapılmış ve aderansın geleneksel betonlardakine göre daha iyi olduğu rapor edilmiştir.

İncelenen çalışmalarda genel olarak UYPLB ile GB arasında iyi bir aderans olduğu ve beraber kullanılabileceği sonucuna varılmıştır. Çalışmaların büyük çoğunluğunda UYPLB tabakası mevcut kirişleri güçlendirme amacıyla çekme bölgesine uygulanmış ve sağladığı kapasite artışları ortaya konmuştur. Bu şekilde yapılan kompozit eleman testlerinde UYPLB içerisinde donatı bulunmasının ve

UYPLB tabakası kalınlığının eğilme kapasitesine etkisi gösterilmiştir. İki beton arasındaki aderans için GB üzerinde yapılan pürüzlendirmelerin/diş uygulamalarının eğilme performansına olumlu etkileri rapor edilmiştir. Bunlardan farklı olarak, önceden dökülmüş UYPLB plakaların mevcut GB kirişe yapıştırılarak veya bulonla ankrajlanarak bağlandığı kompozit kiriş uygulamaları da yapılmış ve eğilme kapasitelerine katkıları olduğu gösterilmiştir. Basınç bölgesinde UYPLB uygulaması içeren çok az çalışmaya rastlanmış, bunlarda da düşük donatı oranları kullanıldığından UYPLB'nin basınç performansları gözlenememiştir.

## **1.2 Çalışmanın Amacı ve Kapsamı**

Çalışmada UYPLB ve GB'nin kompozit olarak birlikte kullanıldığı betonarme kirişlerin eğilme davranışlarının deneysel olarak incelenmesi amaçlanmıştır. Buna göre üst (basınç) bölgesinde belirli kalınlıkta UYPLB, diğer bölümünde GB içeren kirişler üretilerek test edilmiştir. Böylece maliyeti yüksek olan UYPLB'nin az miktarda ve etkin şekilde kullanılarak yüksek eğilme kapasitesine sahip kirişlerin elde edilmesi hedeflenmiştir. Ayrıca çekme bölgesinde GB kullanılması sayesinde UYPLB'nin neden olduğu çatlak lokalleşmeleri ve buna bağlı gevrek davranışın engellenmesi hedeflenmiştir. Çalışmada farklı çekme donatısı oranları üzerinde parametrik inceleme yapılarak, yeterli sünekliğin sağlandığı yüksek donatı oranları belirlenmiştir. Deneysel verilere dayanarak incelenen kompozit kirişlerin eğilme tasarımı için geleneksel betonarme esaslarının geçerliliği nümerik olarak irdelenmiş ve yeni yaklaşımların gerekliliği değerlendirilmiştir.

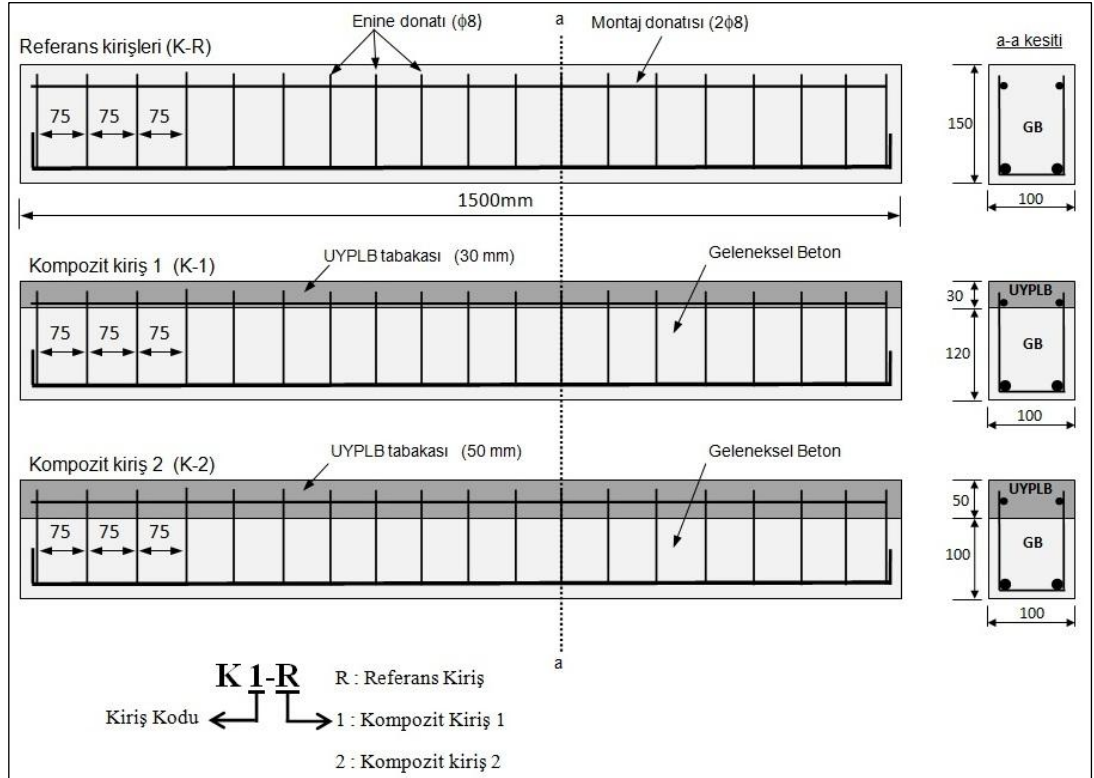
Çalışma kapsamında 6 farklı çekme donatısı oranına sahip toplam 18 adet (3 set) dikdörtgen enkesitli kiriş test edilmiştir. Birinci setteki kirişler GB'li olarak üretilmiş ve bunlar kompozit kirişlerle karşılaştırmak amacıyla (referans kiriş olarak) kullanılmıştır. Diğer iki setteki kirişlerde farklı kalınlıkta UYPLB tabakası kompozit olarak uygulanmış ve tabaka kalınlıklarının etkisi ortaya konmuştur.

## 2. DENEYSEL ÇALIŞMA

Deneysel çalışmada kirişler dört noktalı eğilme testine tabi tutularak yük-düşey yerdeğiştirme davranışları, kırılma şekilleri, yerdeğiştirme ve eğrilik süneklikleri, eğilme kapasiteleri ve rijitlikleri, elastik ve plastik bölgelerdeki maksimum çatlak genişlikleri ve dağılımları incelenmiştir. Ayrıca, kirişlerdeki betonun ve çekme donatısının şekildeğiştirme davranışları belirlenmiştir.

### 2.1 Test Kirişlerinin Özellikleri

Çalışma kapsamında %1.22 ile %5.07 arasında değişen 6 farklı çekme donatısı oranına sahip 3 set kiriş test edilmiştir. Kirişlerin geometrik özellikleri ve donatı detayları Şekil 2.1’de ve Tablo 2.1’de verilmiştir.



Şekil 2.1: Kiriş özellikleri ve kodları.

**Tablo 2.1** Kirişlerde kullanılan çekme donatıları.

Kiriş Kodu	K1		K2		K3		K4		K5		K6	
	R	$\frac{1}{2}$	R	$\frac{1}{2}$	R	$\frac{1}{2}$	R	$\frac{1}{2}$	R	$\frac{1}{2}$	R	$\frac{1}{2}$
Çekme donatısı	2 $\phi$ 10		2 $\phi$ 12		2 $\phi$ 14		2 $\phi$ 16		2 $\phi$ 18		2 $\phi$ 20	
Çekme donatısı oranı $\rho$ (%)	1.22		1.77		2.42		3.19		4.07		5.07	
$\rho/\rho_d$	0.24	0.12	0.35	0.18	0.48	0.25	0.63	0.32	0.81	0.41	1.00	0.52
$\rho_d$ : dengeli donatı oranıdır. Dengeli donatı oranının hesabında geleneksel betonarme esasları kullanılmış ve beton basınç dayanımı GB için 50 MPa, UYPLB için 136 MPa alınmıştır.												

Referans kirişi olarak adlandırılan 1. set kirişleri normal dayanımlı Geleneksel Beton (GB) ile üretilmiştir. Diğer iki seti oluşturan kirişlerde basınç bölgelerine UYPLB tabakası ile birlikte GB kompozit olarak uygulanmıştır. İlk kompozit kiriş setinde (K-1) UYPLB kalınlığı kiriş yüksekliğinin beşte biri kadar uygulanmıştır. İkinci kompozit kiriş setinde (K-2) UYPLB kalınlığı kiriş yüksekliğinin üçte biri kadar uygulanmıştır. Böylece farklı kalınlıkta UYPLB tabakası içeren kompozit kirişler, farklı donatı oranları için incelenmiştir. Tüm kirişlerde (2 $\phi$ 8) montaj donatısı ve U şeklinde etriyeler ( $\phi$ 8) kullanılmıştır. 75 mm aralıkla yerleştirilen U etriyelerin iki farklı beton tabakası arasında dikiş donatısı olarak işlev görmesi düşünülmüş ve salt eğilme bölgesinde de uygulanmıştır.

K1 ve K2 kirişlerinde donatı oranı TS 500'deki [47] maksimum donatı oranının ( $\rho_{max}=0.02$ ) altında seçilmiş, diğer kirişlerde ise bu sınır aşılarak  $\rho=0.05$ 'e kadar çıkarılmıştır. Böylece UYPLB'nin yüksek basınç dayanımı ve şekil değiştirme kapasitelerinden faydalanmak için yüksek donatı oranlarının kullanılabilirliği araştırılmıştır. K6 kirişlerindeki donatı oranı GB için dengeli donatıya karşılık gelirken, kompozit kirişlerde dengeli donatı oranının yaklaşık yarısına karşılık gelmektedir (Tablo 2.1).

## 2.2 Kirişlerde Kullanılan Betonların Özellikleri

Çalışmada GB ve UYPLB olmak üzere iki farklı beton kullanılmıştır. Referans kirişleri salt geleneksel beton ile, kompozit kirişler ise Bölüm 2.1’de belirtildiği gibi alt kısmı GB, üst (basınç) kısmı UYPLB ile üretilmiştir.

GB için 40-50 MPa basınç dayanımına sahip beton kullanılması planlanmıştır. Bunun için Tablo 2.2’de verilen bileşenler kullanılmış ve standart bir panmikser ile üretim yapılmıştır. Betonun kalıp içerisindeki yerleşimini sağlamak amacıyla vibrasyon uygulaması ve şişleme yapılmıştır.

**Tablo 2.2:** Geleneksel beton için kullanılan bileşenler (kg/m<sup>3</sup>).

Çimento	Agrega			Su	Akışkanlaştırıcı
	0-3 mm	0-4 mm	5-12 mm		
375	547	547	729	170	3.375

UYPLB’de bağlayıcı olarak CEM I 42.5 sınıf portland çimentosu, silis dumanı ve yüksek fırın cürufu kullanılmıştır. Agregası olarak iki farklı boyutta kuvars ve betonun işlenebilirliğini arttırmak için süperakışkanlaştırıcı katkı kullanılmıştır. Çalışmada 0.16 mm çapında, 13 mm boyunda, çekme dayanımı 2500 MPa, elastisite modülü E=210000 MPa olan düz çelik lif kullanılmıştır. Betonda işlenebilirlik ile birlikte mekanik özelliklerde yüksek performans elde edilebilmek amacıyla % 2.0 oranında (hacimsel olarak) lif kullanılması öngörülmüştür [10, 48-50]. UYPLB’yi oluşturan bileşenler Şekil 2.2’de, kullanım miktarları Tablo 2.3’de verilmiştir.



**Şekil 2.2:** UYPLB'yi oluşturan bileşenler (Ayrıca su kullanılmıştır).

**Tablo 2.3:** UYPLB'yi oluşturan bileşen miktarları ( $\text{kg/m}^3$ ).

Çimento	Silis Dumanı	Yüksek Fırın Cürufu	Süper Akışkanlaştırıcı	0-0.8 mm Kuvars	1-3 mm Kuvars	Çelik Lif	Su/ Bağlayıcı
690	138	276	17.25	525	525	156	0.18

### 2.3 Test Kirişlerinin Hazırlanması

Test kirişlerine ait boyuna ve enine donatıların hazırlanmasının ardından donatılar çelik kalıplara yerleştirilerek beton dökümüne hazır hale getirilmiştir (Şekil 2.3). Kirişlerin dökümü üçlü gruplar halinde yapılmıştır. Donatıları aynı olan her bir gruptaki referans kirişleri ve UYPLB tabaka kalınlıkları farklı olan iki kompozit kiriş birlikte dökülmüştür.



**Şekil 2.3:** Kiriş kalıbı ve donatısı.

UYPLB'nin panmikserde üretimi üç aşamada gerçekleşmiştir. Üretim için tartılan ve hazırlanan malzemeler Şekil 2.4'te gösterilmiştir. Öncelikle su ve akışkanlaştırıcı dışındaki malzemeler 2 dakika kuru olarak karıştırılmış, daha sonra su ve akışkanlaştırıcı ilave edilerek 5 dakika daha karıştırılmıştır. Son olarak çelik lifler ilave edilip 5 dakika daha karıştırılarak akıcı kıvamda beton elde edilmiştir (Şekil 2.5).





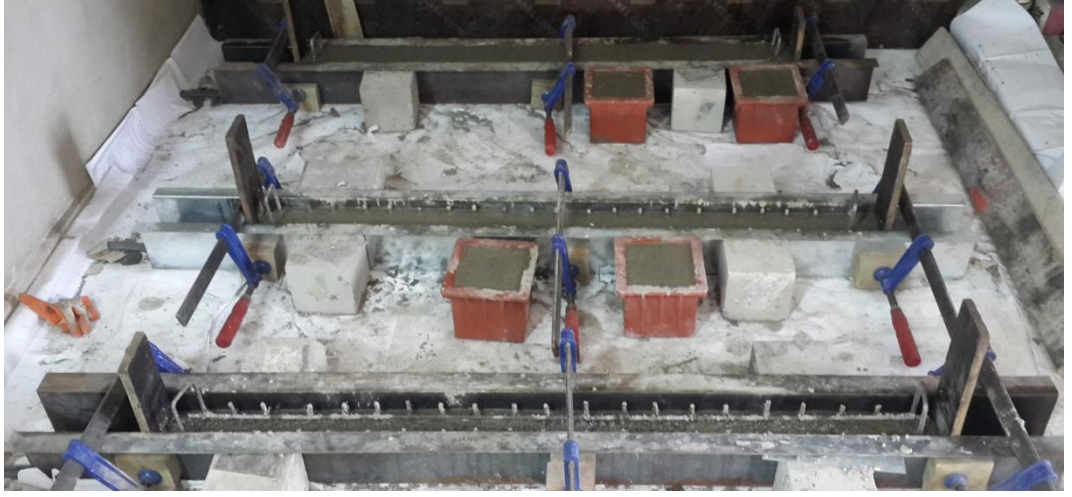
**Şekil 2.4:** UYPLB’de kullanılan bileşenler (1 set için).



**Şekil 2.5:** Akıcı kıvamdaki UYPLB karışımı.

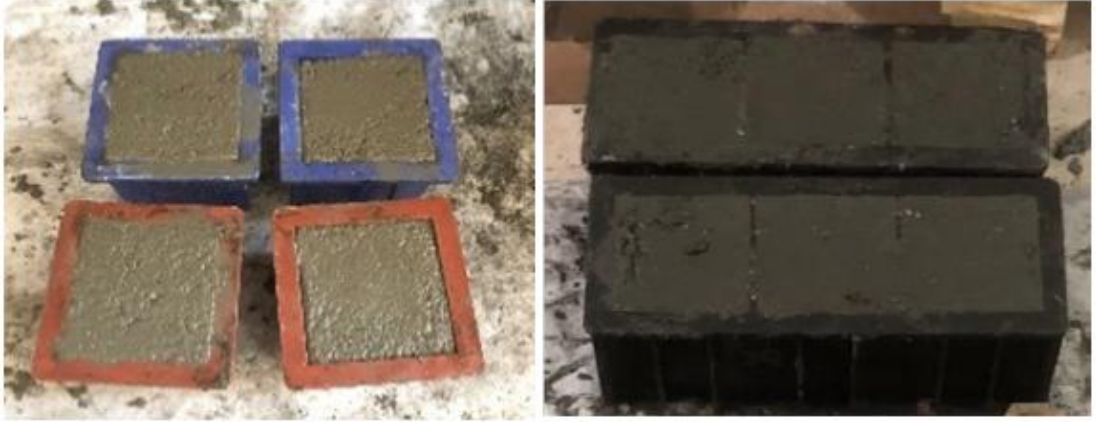
Kompozit kirişlerin dökümü iki aşamada gerçekleşmiştir. İlk aşamada alt kısımdaki geleneksel beton dökülmüş (Şekil 2.6), yaklaşık 1 saat priz alması beklendikten sonra UYPLB tabakası dökülmüştür.





**Şekil 2.6:** Geleneksel beton dökümü tamamlanmış kiriş seti.

Beton basınç dayanımlarının belirlenmesi için hazırlanan geleneksel beton karışımından 4 adet 150x150x150 mm'lik küp numune, UYPLB karışımından ise 6 adet 100x100x100 mm'lik küp numune alınmıştır (Şekil 2.7).



**Şekil 2.7:** Beton basınç dayanımı için alınan küp numuneler.

Dökümü tamamlanan kirişler kalıptan alınıncaya kadar su kaybını önlemek amacıyla plastik bir örtü ile sarılarak korunmuştur (Şekil 2.8).



**Şekil 2.8:** Plastik örtü ile sarılmış test kirişleri.

Kirişler kalıptan alındıktan sonra test gününe kadar yaklaşık 20°C sıcaklığındaki laboratuvar ortamında bekletilmiştir (Şekil 2.9).



**Şekil 2.9:** Kalıptan çıkartılmış test kirişleri.

#### **2.4 Malzeme Testleri**

Beton numuneler üzerinde yapılan aksenal basınç testleri ile basınç dayanımları belirlenmiştir. Testler Balıkesir Üniversitesi Yapı Mekaniği

Laboratuvarı'nda bulunan 3000 kN kapasiteli basınç presi ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 2.10). Elde edilen ortalama basınç dayanımları Tablo 2.4'te verilmiştir.

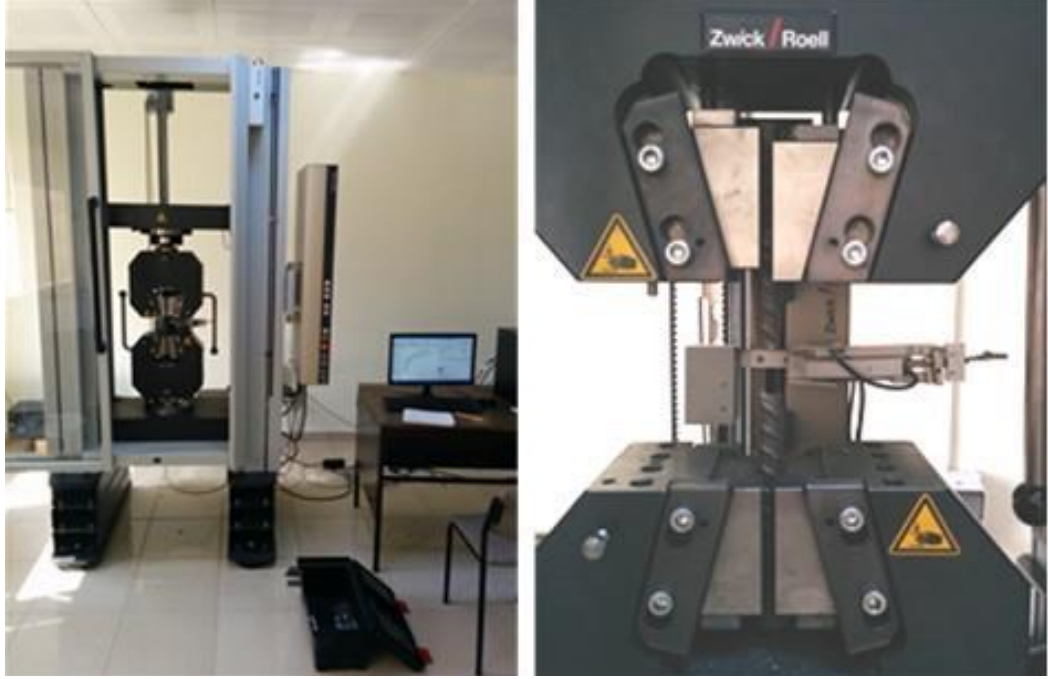


**Şekil 2.10:** Numunelerin basınç dayanımlarının belirlenmesi.

**Tablo 2.4** Kirişlerde kullanılan betonun ortalama basınç dayanımları.

Kiriş Kodu	28 Günlük Basınç Dayanımı (MPa)		UYPLB için	
	Geleneksel beton	UYPLB	Numune yaşı (gün)	Test dayanımı (MPa)
K1-R	47.46	125.31	-	-
K1-1			87	138.18
K1-2				
K2-R	50.58	127.44	-	-
K2-1			160	137.15
K2-2				
K3-R	48.07	129.88	-	-
K3-1			40	132.75
K3-2				
K4-R	52.83	125.96	-	-
K4-1			144	134.97
K4-2				
K5-R	50.95	126.12	-	-
K5-1			78	136.00
K5-2				
K6-R	49.79	128.83	-	-
K6-1			195	136.50
K6-2				
Ortalama	49.95	127.26		135.93

Betonarme kirişlerde kullanılan boyuna donatıların mekanik özellikleri için 300 mm'lik çelik donatılar üzerinde çekme deneyi yapılmıştır. Testler, Balıkesir Üniversitesi Merkez Laboratuvarı'ndaki çekme cihazı ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 2.11). Elde edilen donatı mekanik özellikleri Tablo 2.5'te verilmiştir.



**Şekil 2.11:** Donatıların çekme testi ile mekanik özelliklerinin belirlenmesi.

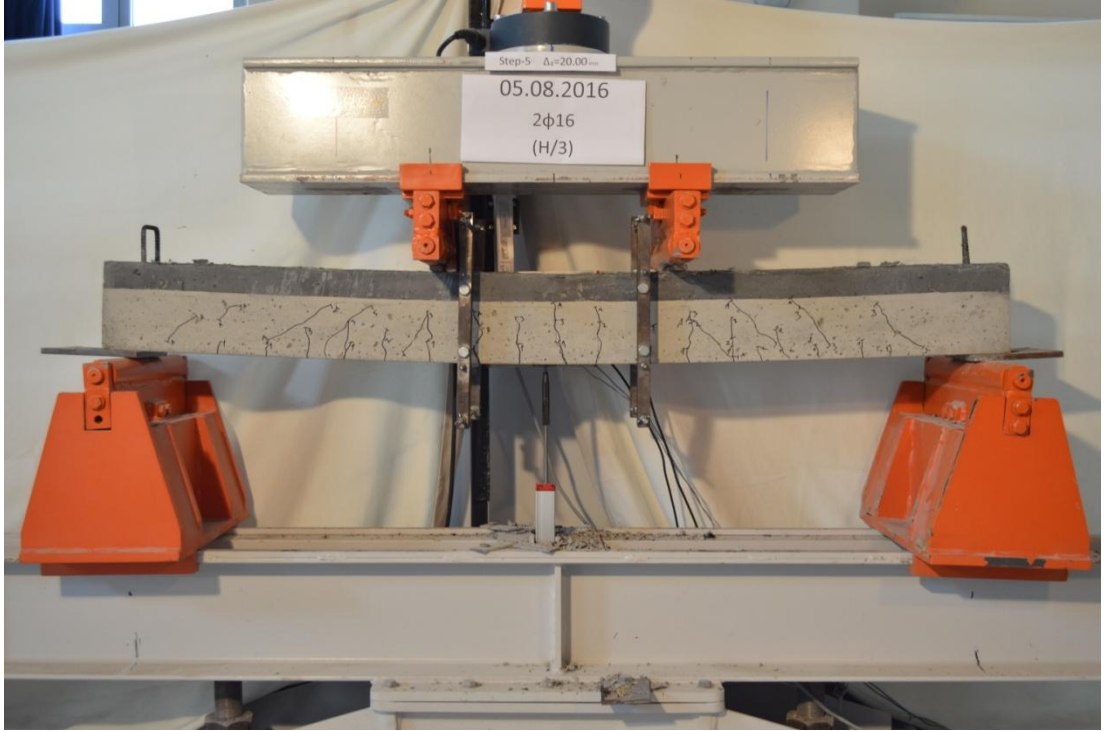
**Tablo 2.5** Kirişlerde kullanılan çekme donatılarının mekanik özellikleri.

Kiriş Kodu	K1	K2	K3	K4	K5	K6
Çekme donatısı	2φ10	2φ12	2φ14	2φ16	2φ18	2φ20
Çekme donatısı akma dayanımı ( $f_y$ ) (MPa)	484	475	481	487	472	480
Çekme donatısı kopma dayanımı ( $f_u$ ) (MPa)	565	631	651	688	683	661



## 2.5 Test Düzeneği ve Yapılacak Ölçümler

Betonarme kirişlerin eğilme davranışlarının incelenmesi amacıyla, kirişlerde salt eğilme bölgesinin oluşturulduğu dört noktali eğilme testi uygulanmıştır. Testler, Balıkesir Üniversitesi Yapı Mekaniği Laboratuvarındaki yerdeğiştirme kontrollü test düzeneği ile yapılmıştır (Şekil 2.12).

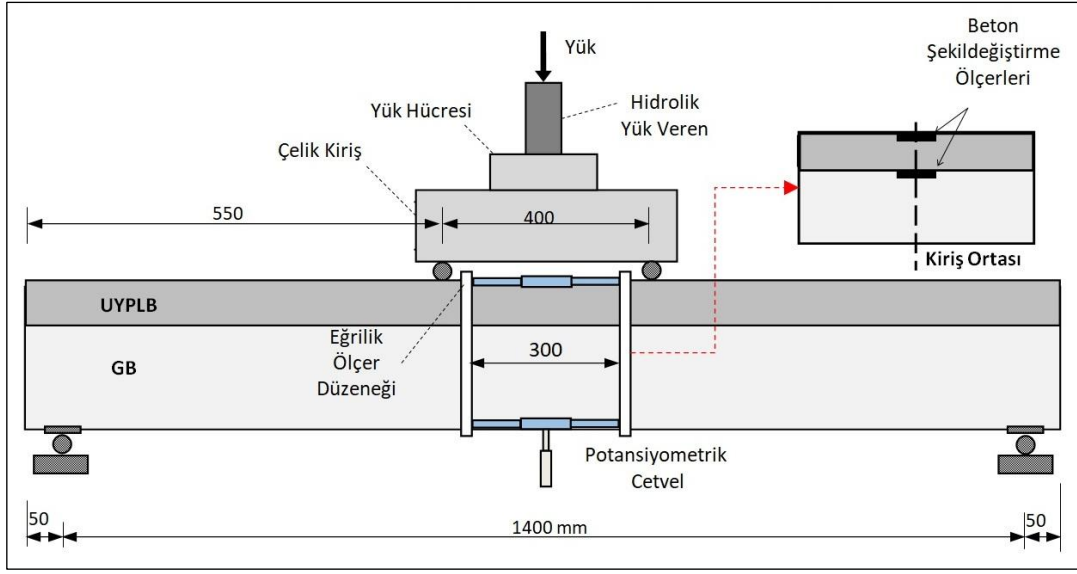


Şekil 2.12: BAUN-MF Laboratuvarında bulunan mevcut eğilme test düzeneği.

Test sırasında kiriş ortasında düşey yerdeğiştirmeyi ölçmek için alttan bir potansiyometrik cetvel ve yükü ölçmek için yük verenin altında bir yük hücresi yerleştirilmiştir. Hidrolik pistondan etkileyen yük arasında 400 mm olan iki tekil yüke dönüştürülerek uygulanmıştır (Şekil 2.13). Deney esnasında alınan yük ve yerdeğiştirme değerleri kullanılarak kirişlere ait yük-düşey yerdeğiştirme ilişkileri elde edilmiştir.

Kirişin salt eğilme bölgesinde kurulan bir düzenek ile eğrilik (birim dönme) ölçümleri yapılmıştır. Bunun için kirişin en dış basınç ve çekme liflerine iki adet potansiyometrik cetvel yerleştirilmiştir. Aralarında 300 mm'lik boşluk kalacak

şekilde yerleştirilen cetvellerle en üst beton lifindeki kısalma ve en alt beton lifindeki uzamalar ölçülmüştür. Bu yerdeğişirmelerden yararlanarak, salt eğilme bölgesindeki 300 mm'lik bölümün ortalama eğriliği belirlenmiştir (Şekil 2.13). Bu veriler ile kirişlerin Moment-Eğrilik (birim dönme) ilişkileri, eğilme rijitlikleri ve eğrilik süneklikleri elde edilmiştir.



**Şekil 2.13:** Şematik yükleme ve ölçüm düzenekleri.

Betondaki şekil değişirmeleri ölçmek amacıyla Şekil 2.13-2.14'te gösterildiği gibi kirişin orta kesitine iki farklı konuma şekil değişirme ölçerler (strain gauge) yerleştirilmiştir. Kompozit kesitli kirişlerde yapılan bu uygulamada şekil değişirme ölçerlerden biri UYPLB'nin en üst lifine, diğeri geleneksel betonun en üst lifine yerleştirilmiştir (Şekil 2.14). Bu ölçümler eğilme tasarımındaki değerlendirmelerde kullanılmıştır.



**Şekil 2.14:** Test kirişlerindeki şekildeğiştirme ölçer (strain gauge) yerleşimleri.

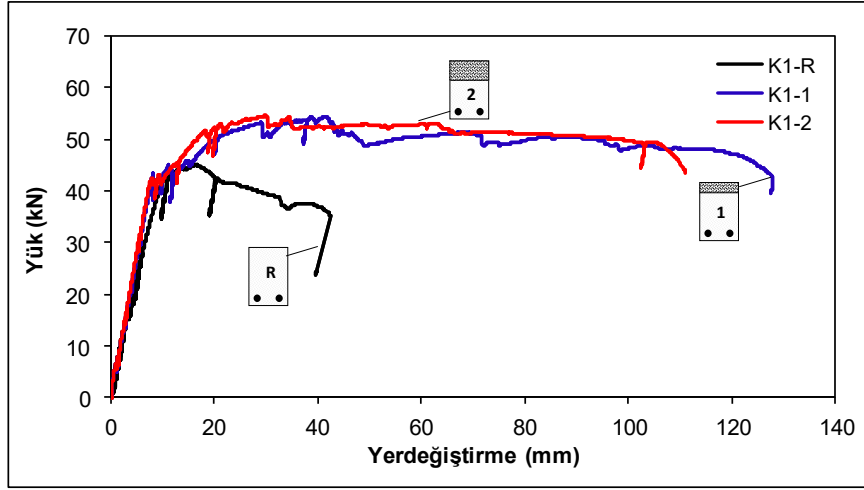
Kirişlerde çatlak davranışını belirlemek amacıyla testler esnasında belirli yerdeğiştirme değerlerinde gözle görülebilen çatlak dağılımları işaretlenmiş ve çatlak genişlikleri çatlak mikroskobu ile ölçülmüştür.

## **2.6 Deneysel Sonuçlar**

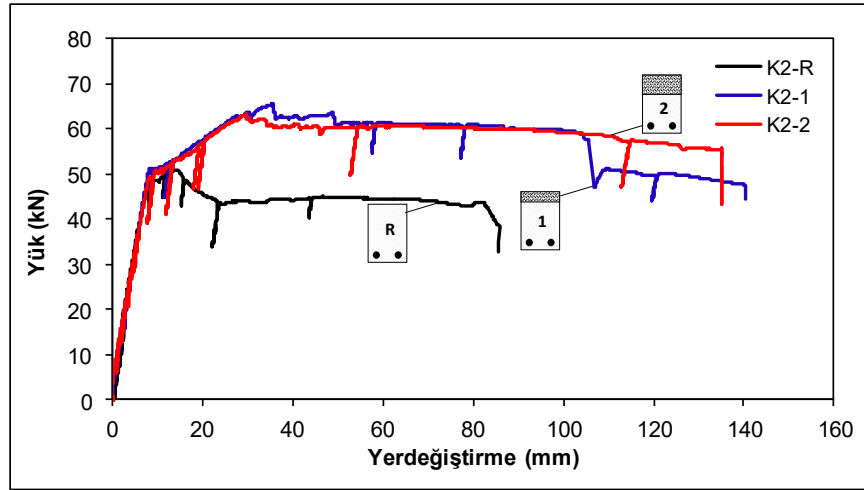
### **2.6.1 Kirişlerin Yük-Düşey Yerdeğiştirme Davranışları**

Çalışma kapsamında üretilen kirişler kırılma (göçme) yüklerine ulaşıncaya kadar yükleme yapılmış ve elde edilen yük-yerdeğiştirme ilişkileri, her bir donatı oranı için ayrı ayrı olmak üzere Şekil 2.15-2.20’de verilmiştir.

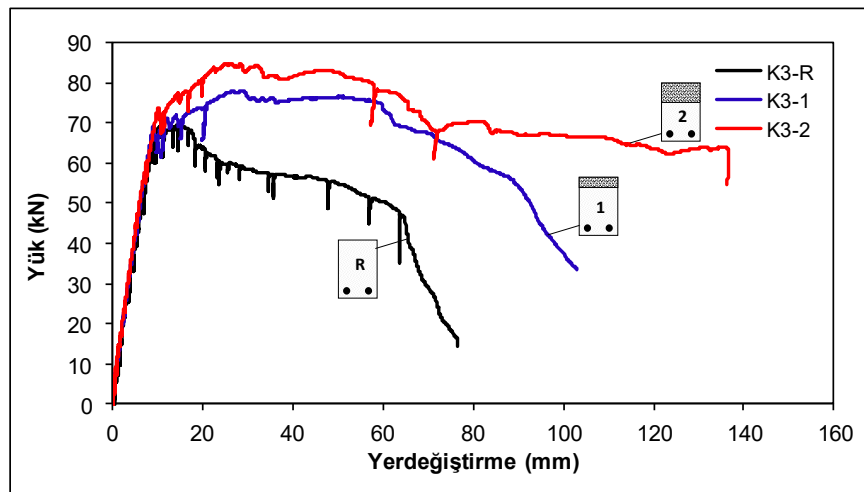
Kompozit kirişlere ait kırılma yerdeğiştirmesi değerleri ve yük taşıma kapasiteleri GB’li referans kirişlerine göre genel olarak artış göstermiştir. Bunlarda kirişlerin basınç bölgesinde kullanılan UYPLB’nin basınç dayanımının ve şekildeğiştirme kapasitesinin geleneksel betona göre yüksek olması etkili olmuştur.



Şekil 2.15: K1 ( $\rho=0.0122$ ) kirişlerine ait yük-yerdeğiştirme ilişkileri.

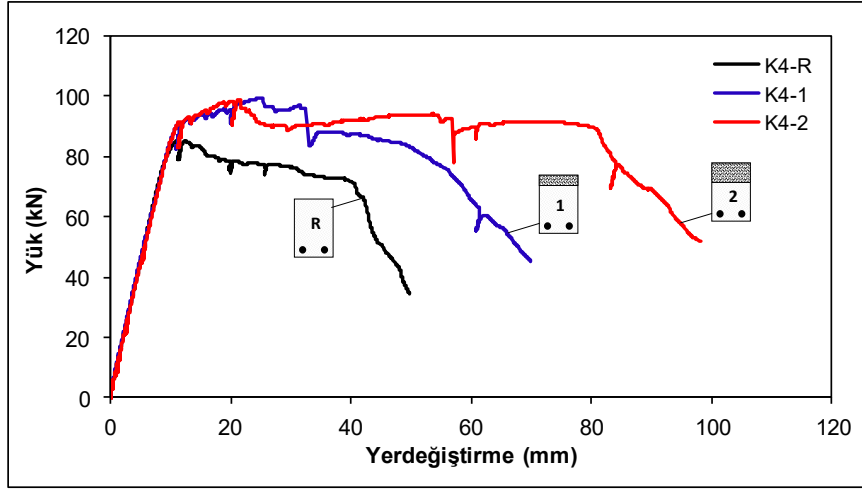


Şekil 2.16: K2 ( $\rho=0.0177$ ) kirişlerine ait yük-yerdeğiştirme ilişkileri.

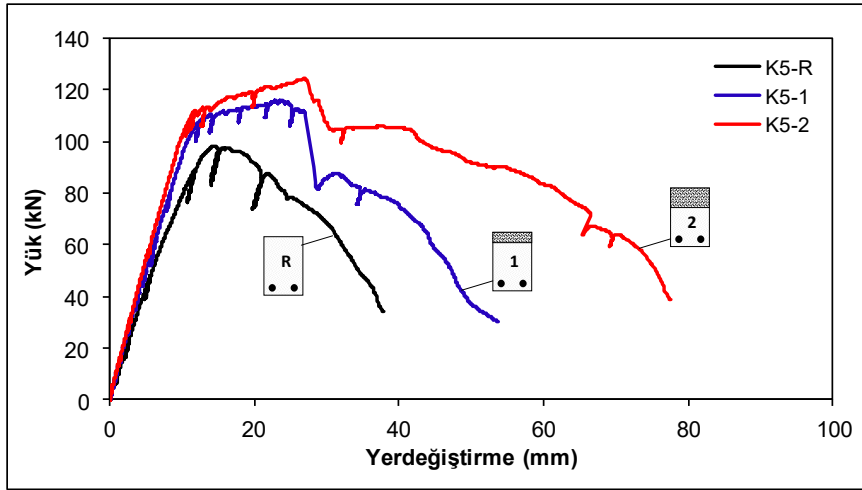


Şekil 2.17: K3 ( $\rho=0.0242$ ) kirişlerine ait yük-yerdeğiştirme ilişkileri.

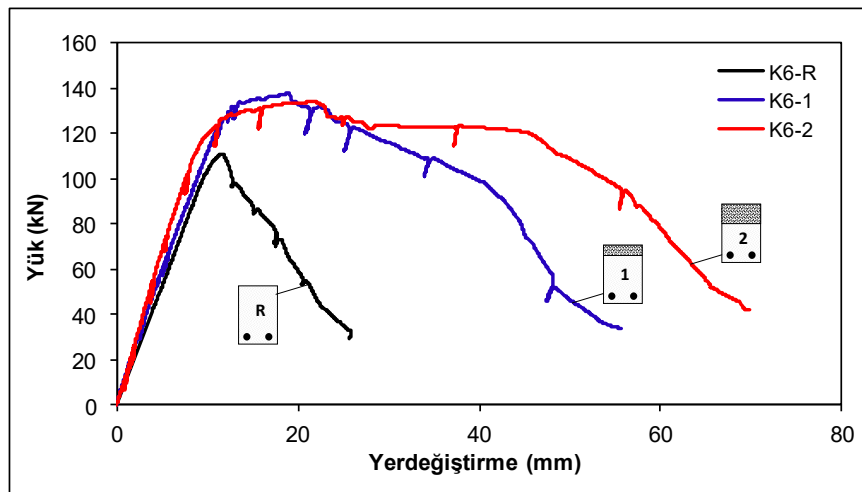




Şekil 2.18: K4 ( $\rho=0.0319$ ) kirişlerine ait yük-yerdeğiştirme ilişkileri.



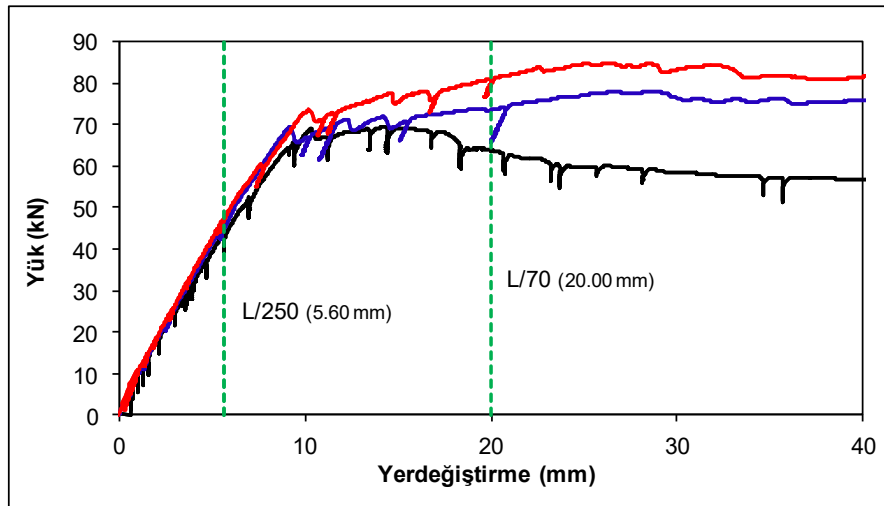
Şekil 2.19: K5 ( $\rho=0.0407$ ) kirişlerine ait yük-yerdeğiştirme ilişkileri.



Şekil 2.20: K6 ( $\rho=0.0507$ ) kirişlerine ait yük-yerdeğiştirme ilişkileri.

## 2.6.2 Kirişlerdeki Çatlak Dağılımları ve Kırılma (Göçme) Şekilleri

GB'li referans kirişleri ile kompozit kirişlerdeki çatlak dağılımlarını ve kırılma şekillerini karşılaştırmak amacıyla, kiriş testleri esnasında yük durdurularak belirli yerdeğiştirme değerlerinde oluşan çatlaklar işaretlenmiş ve çatlak mikroskobu ile en büyük çatlak genişlikleri belirlenmiştir. Çatlak dağılımları  $L$  kiriş açıklığını ifade etmek üzere,  $L/250$ 'lik ve  $L/70$ 'lik düşey yerdeğiştirme değerlerinde yapılmıştır.  $L/250$  değeri tüm kirişlerde elastik bölgeye karşılık gelmekte,  $L/70$  değeri ise plastik şekildeğiştirmelerin olduğu bölgeye karşılık gelmektedir. K3 kirişlerine ait grafiklerde  $L/250$  ve  $L/70$  yerdeğiştirmeleri örnek olarak gösterilmiştir (Şekil 2.21). Her bir kirişe ait çatlak dağılımları ve kırılma durumlarına ait fotoğraflar Şekil 2.22-2.39'da gösterilmiştir. GB'li referans kirişlerinde kırılma yüklerine ulaşıldığında geniş bir bölgeye yayılan ve büyük dayanım azalmasına sebep olan beton ezilmeleri gözlenmiştir. Kompozit kirişlerde ise, UYPLB tabakası basınç donatılı / sargılı betona benzer davranış göstermiş ve beton ezilmelerinin daha lokal olması sağlanmıştır. Buna bağlı olarak, hafif dayanım azalmaları ile birlikte büyük şekildeğiştirme kapasitesi sağlanmıştır.

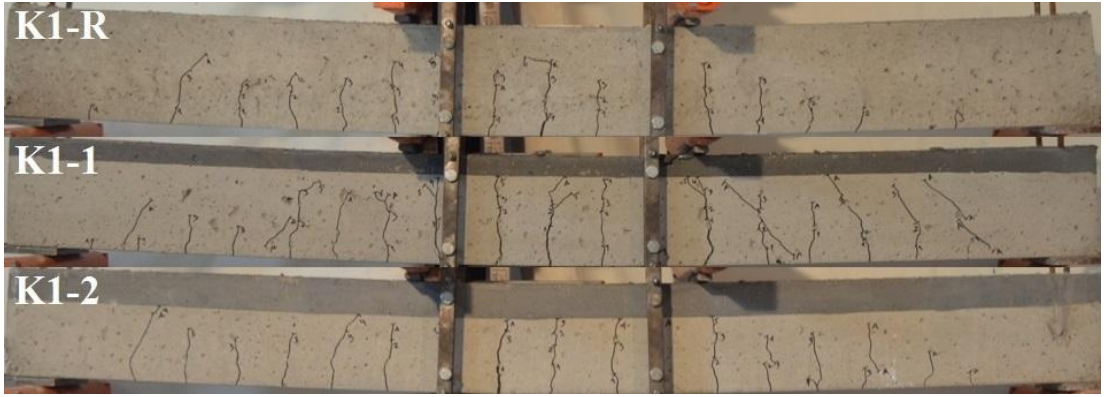


Şekil 2.21: K3 kirişlerine ait  $L/250$  ve  $L/70$  yerdeğiştirmeleri.

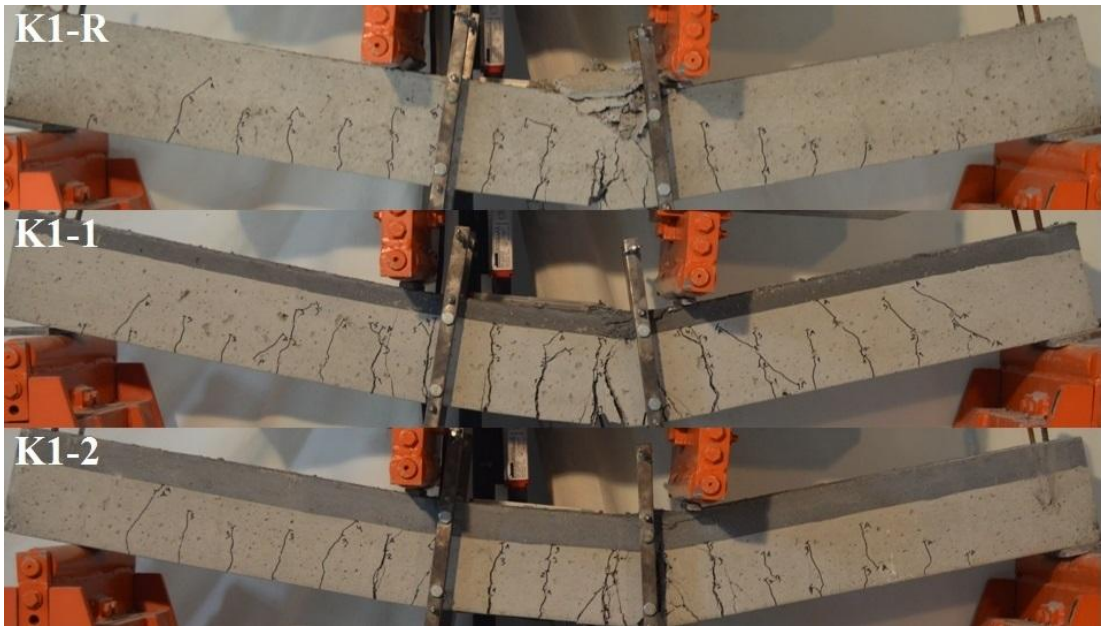
Çatlak dağılımları genel olarak GB'li referans kirişlerinde ve kompozit kirişlerde benzer elde edilmiştir. Kompozit kirişlerdeki çatlaklar çekme bölgesinde (GB bölgesinde) sınırlı kalmış ve UYPLB tabakasında dikkate değer çatlaklar gözlenmemiştir.



Şekil 2.22: K1 ( $\rho=0.0122$ ) kirişlerine ait çatlak dağılımları ( $L/250$  yerdeğiştirmesi).



Şekil 2.23: K1 ( $\rho=0.0122$ ) kirişlerine ait çatlak dağılımları ( $L/70$  yerdeğiştirmesi).

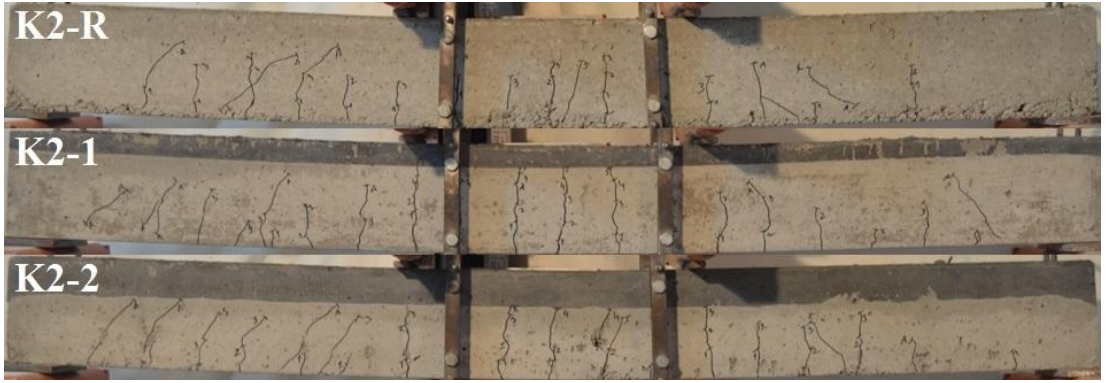


Şekil 2.24: K1 ( $\rho=0.0122$ ) kirişlerinde kırılma (göçme) durumuna ait çatlak dağılımları.

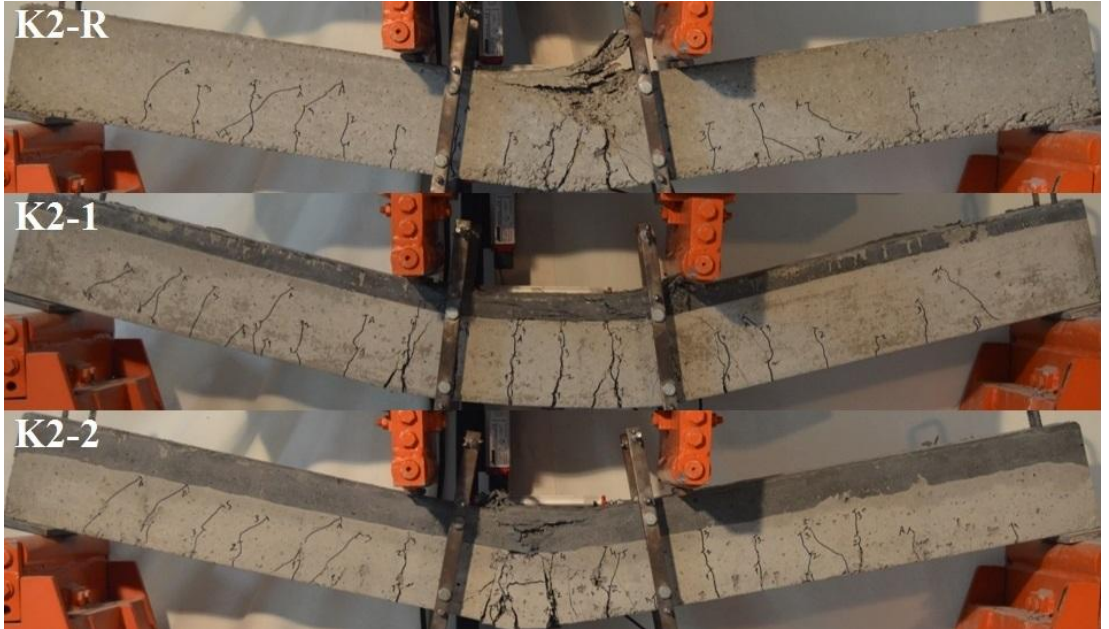




Şekil 2.25: K2 ( $\rho=0.0177$ ) kirişlerine ait çatlak dağılımları ( $L/250$  yerdeğiştirmesi).



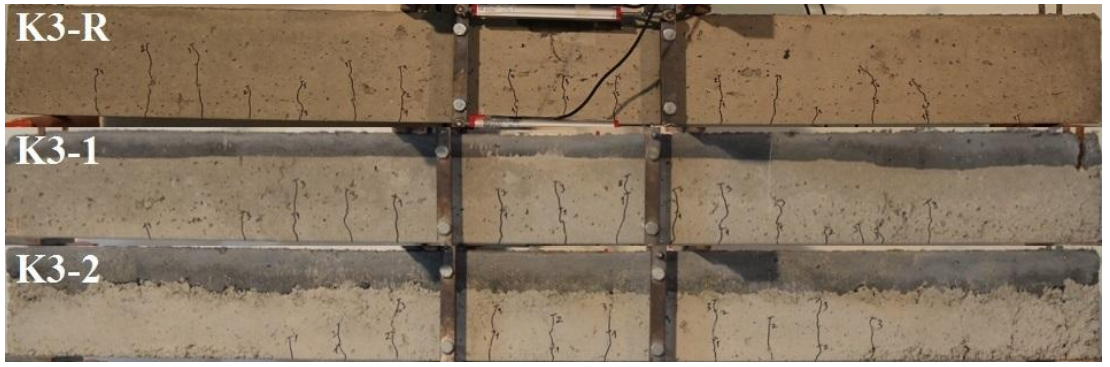
Şekil 2.26: K2 ( $\rho=0.0177$ ) kirişlerine ait çatlak dağılımları ( $L/70$  yerdeğiştirmesi).



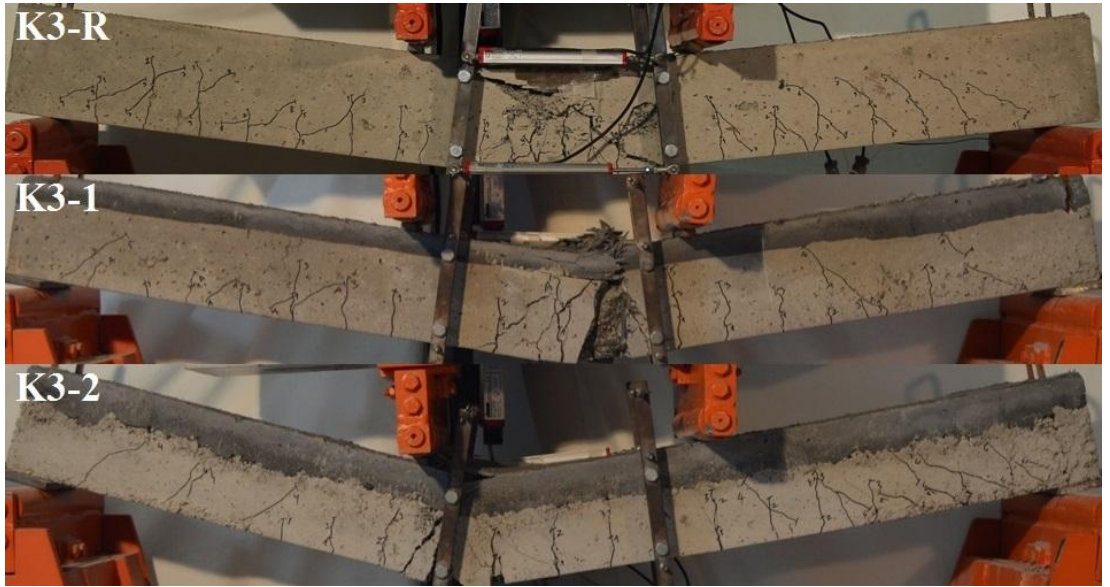
Şekil 2.27: K2 ( $\rho=0.0177$ ) kirişlerinde kırılma (göçme) durumuna ait çatlak dağılımları.



Şekil 2.28: K3 ( $\rho=0.0242$ ) kirişlerine ait çatlak dağılımları ( $L/250$  yerdeğiştirmesi).

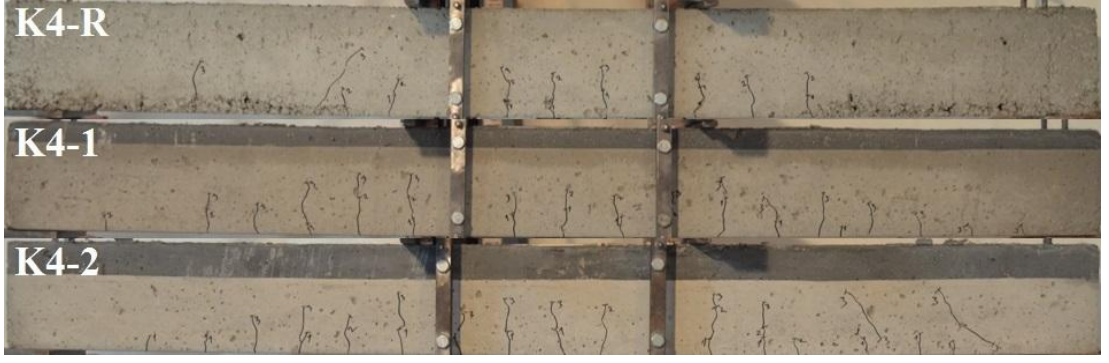


Şekil 2.29: K3 ( $\rho=0.0242$ ) kirişlerine ait çatlak dağılımları ( $L/70$  yerdeğiştirmesi).

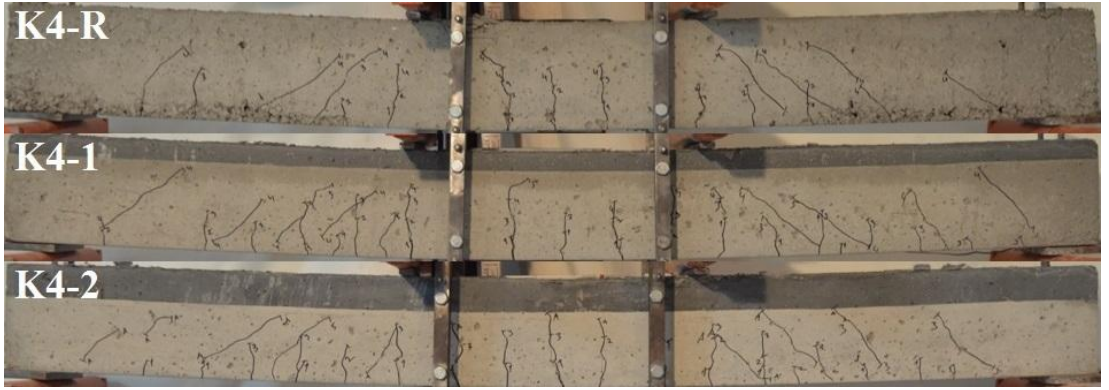


Şekil 2.30: K3 ( $\rho=0.0242$ ) kirişlerinde kırılma (göçme) durumuna ait çatlak dağılımları.

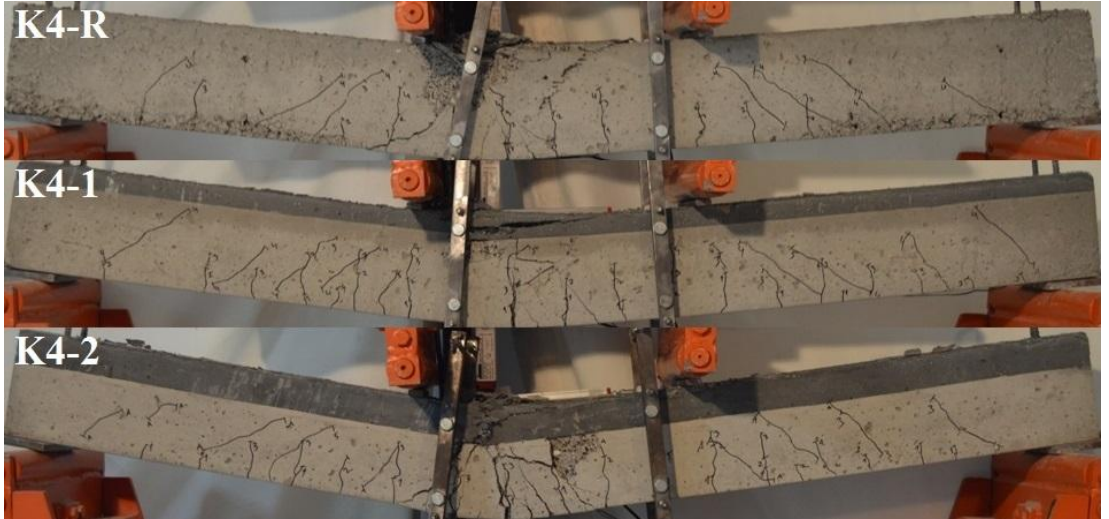




Şekil 2.31: K4 ( $\rho=0.0319$ ) kirişlerine ait çatlak dağılımları ( $L/250$  yerdeğiştirmesi).



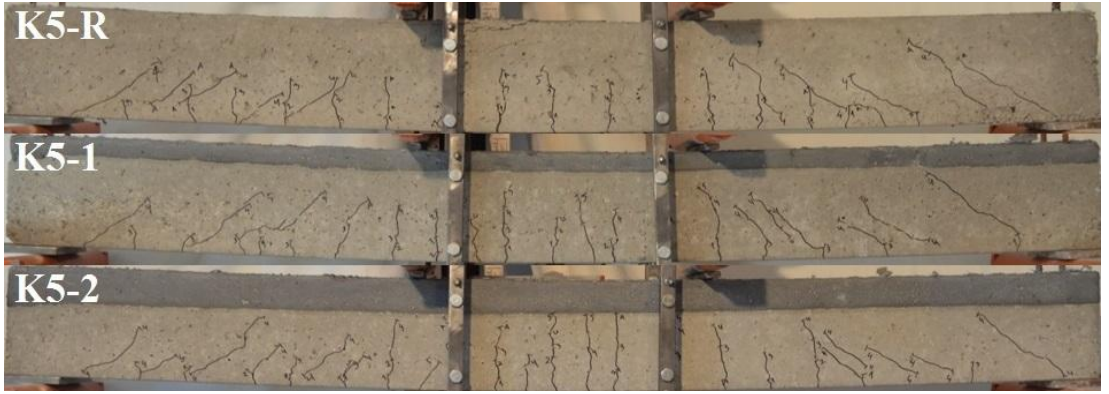
Şekil 2.32: K4 ( $\rho=0.0319$ ) kirişlerine ait çatlak dağılımları ( $L/70$  yerdeğiştirmesi).



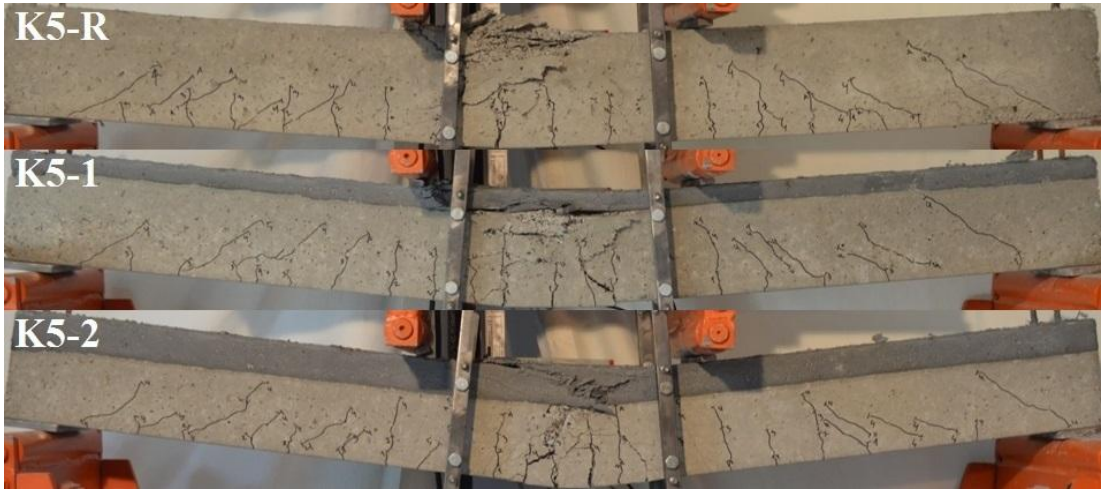
Şekil 2.33: K4 ( $\rho=0.0319$ ) kirişlerinde kırılma (göçme) durumuna ait çatlak dağılımları.



Şekil 2.34: K5 ( $\rho=0.0407$ ) kirişlerine ait çatlak dağılımları ( $L/250$  yerdeğiştirmesi).



Şekil 2.35: K5 ( $\rho=0.0407$ ) kirişlerine ait çatlak dağılımları ( $L/70$  yerdeğiştirmesi).



Şekil 2.36: K5 ( $\rho=0.0407$ ) kirişlerinde kırılma (göçme) durumuna ait çatlak dağılımları.





Şekil 2.37: K6 ( $\rho=0.0507$ ) kirişlerine ait çatlak dağılımları ( $L/250$  yerdeğiştirmesi).



Şekil 2.38: K6 ( $\rho=0.0507$ ) kirişlerine ait çatlak dağılımları ( $L/70$  yerdeğiştirmesi).

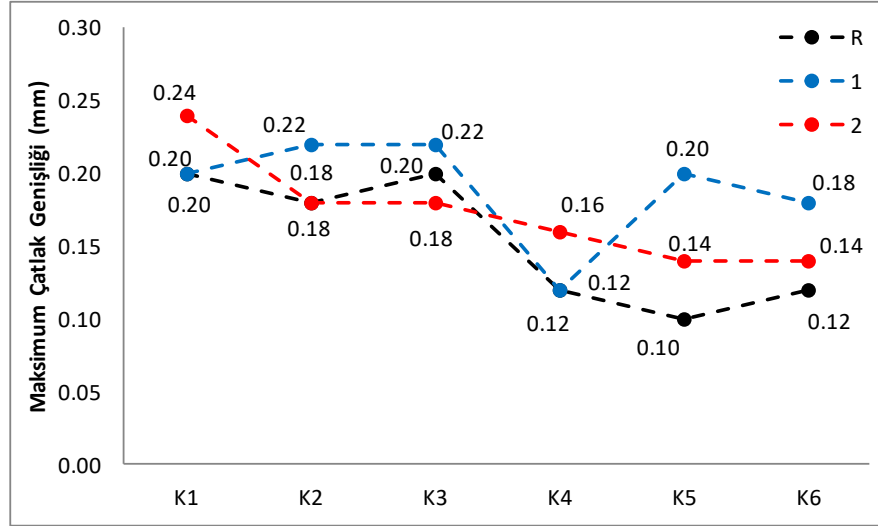


Şekil 2.39: K6 ( $\rho=0.0507$ ) kirişlerinde kırılma (göçme) durumuna ait çatlak dağılımları.

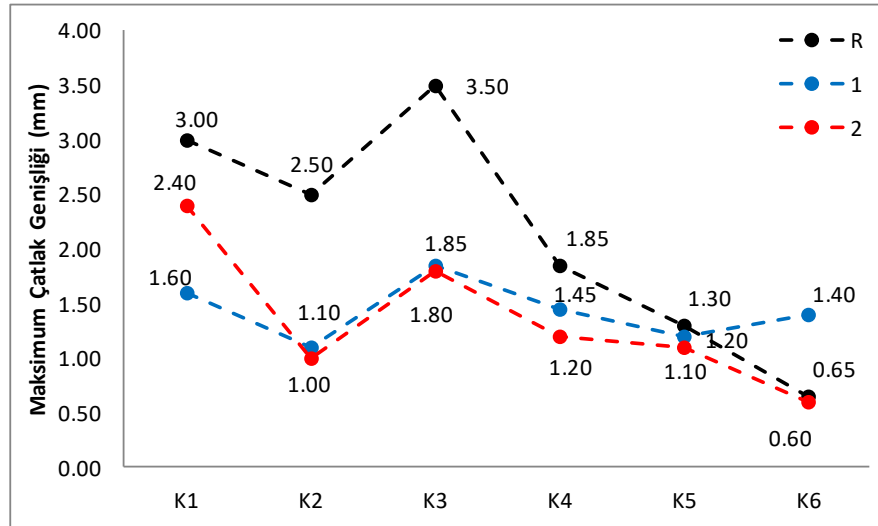
Kirişlerin maksimum çatlak genişliklerinin donatı oranına göre değişimleri  $L/250$  yerdeğiştirmesi için Şekil 2.40'da,  $L/70$  yerdeğiştirmesi için Şekil 2.41'de



verilmiştir. Çatlak genişlikleri L/250 yerdeğiştirme değerinde kompozit kirişlerde ve GB'li referans kirişlerinde genel olarak benzer elde edilmiştir. L/70 yerdeğiştirme değerinde de çatlak genişliklerinde benzer değerler elde edilmekle birlikte düşük donatı oranına sahip kirişlerde, çekme bölgesinin UYPLB tabakasının içine girmesi nedeniyle kompozit kirişlerin çatlak genişlikleri daha düşük elde edilmiştir.



Şekil 2.40: Kirişlerdeki çatlak genişliklerinin donatı oranına göre değişimi (L/250).

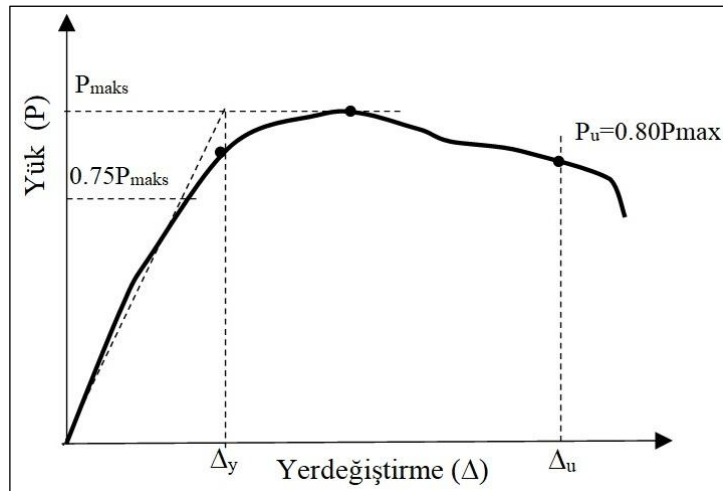


Şekil 2.41: Kirişlerdeki çatlak genişliklerinin donatı oranına göre değişimi (L/70).

### 2.6.3 Yerdeğiştirme Süneklikleri

Kirişlerde çekme donatısı miktarını sınırlayan en önemli davranış büyüklüğü sünekliktir. Bu çalışmada GB'li kirişler için TS 500'de [47] verilen donatı sınırlarının ( $\rho_{\max}=0.02$ ) çok üzerinde donatı oranları kullanıldığı için yeterli sünekliklerin sağlandığının kontrol edilmesi gerekmektedir. Deneysel verilerden sünekliklerin belirlenmesinde çeşitli yaklaşımlar bulunmaktadır [51]. Bu çalışmada yük-yerdeğiştirme ilişkisinde azaltılmış rijitliği esas alan yaklaşım kullanılmıştır [51]. Bu yaklaşıma göre yük-yerdeğiştirme ilişkisinin karakteristik değerleri Şekil 2.42'de gösterildiği gibi belirlenmiştir.

Şekil 2.42'de  $\Delta_y$  akma yerdeğiştirmesini,  $\Delta_u$  süneklik hesabında kullanılan maksimum yerdeğiştirmeyi,  $P_{\max}$  maksimum yükü,  $P_u$  süneklik hesabında kullanılan yükü göstermektedir. Betonarme elemanlarda ilk beton ezilmesi sonrası dayanım azalmaları oluşmasına rağmen basınç donatısı ve lifler arası yeniden dağılım sayesinde yük taşıma kapasitesi büyük oranda korunmaktadır. Bu nedenle süneklik hesabında, maksimum yerdeğiştirme için belirli dayanım azalmaları kabul edilerek maksimum yük sonrası bir yerdeğiştirme kullanılabilir. Ancak dayanım azalmasının sınırlandırılması gerekmektedir. Bu çalışmada UYPLB'nin basınç altındaki yüksek şekildeğiştirme kapasitesi göz önüne alınarak maksimum yerdeğiştirme için %20'lik dayanım azalması kabul edilmiştir.

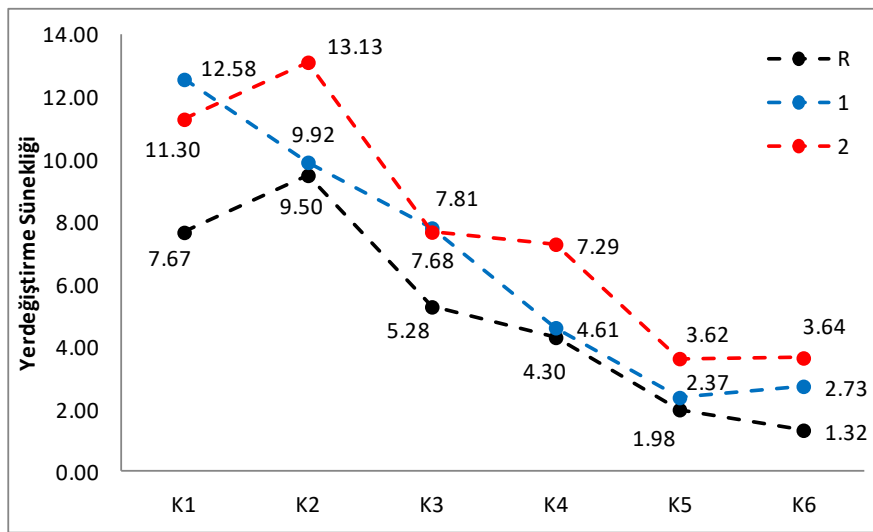


Şekil 2.42: Yük- düşey yerdeğiştirme ilişkisine ait karakteristik değerler [51].

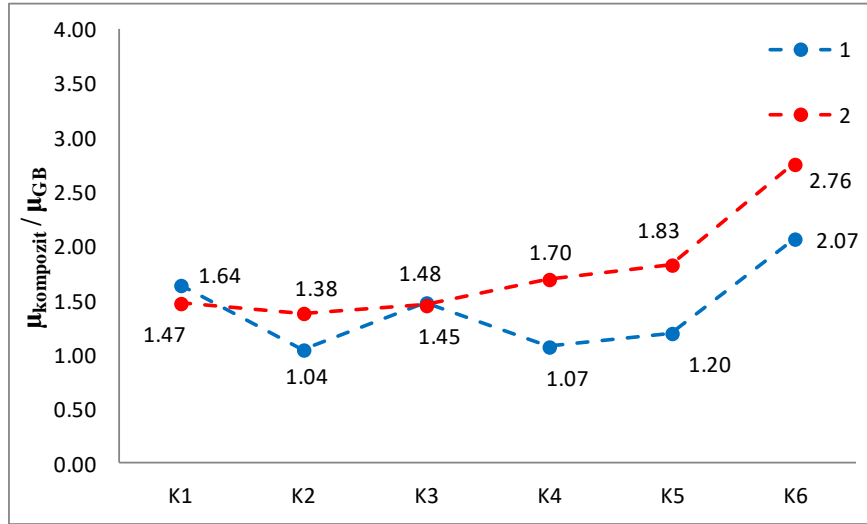
Kirişlerin yerdeğiştirme süneklikleri ile ilgili elde edilen karakteristik değerler Tablo 2.6’da verilmiştir. Kirişlerin yerdeğiştirme sünekliklerinin donatı oranına göre değişimleri Şekil 2.43’te, kompozit kirişler için elde edilen yerdeğiştirme sünekliklerinin referans kirişleri için elde edilen yerdeğiştirme sünekliklerine oranı da Şekil 2.44’te verilmiştir.

**Tablo 2.6:** Kirişlerin yük-yerdeğiştirme ilişkisine ait karakteristik değerler.

Kiriş Kodu	$\Delta_y$ (mm)	$P_{maks}$ (kN)	$P_u$ (kN)	$\Delta_u$ (mm)	$\mu_{\Delta} = \Delta_u / \Delta_y$	$P_u / P_{maks}$
K1-R	8.01	44.64	35.70	61.46	7.67	0.80
K1-1	10.11	54.26	43.40	127.13	12.58	0.80
K1-2	9.82	54.59	43.50	111.00	11.30	0.80
K2-R	9.35	48.78	39.03	88.83	9.50	0.80
K2-1	10.30	65.32	59.34	102.15	9.92	0.91
K2-2	10.28	63.08	50.46	134.98	13.13	0.80
K3-R	9.27	69.41	55.54	48.87	5.28	0.80
K3-1	9.97	78.08	62.50	77.86	7.81	0.80
K3-2	11.22	84.88	67.89	86.13	7.68	0.80
K4-R	9.53	85.60	68.59	40.95	4.30	0.80
K4-1	11.43	99.53	79.63	52.68	4.61	0.80
K4-2	11.47	98.99	79.23	83.60	7.29	0.80
K5-R	12.32	98.39	78.76	24.43	1.98	0.80
K5-1	12.14	115.91	90.15	28.18	2.37	0.80
K5-2	12.01	124.29	99.42	43.48	3.62	0.80
K6-R	12.35	110.60	88.47	16.39	1.32	0.80
K6-1	12.18	137.52	110.02	33.21	2.73	0.80
K6-2	14.80	133.02	106.39	53.90	3.64	0.80



**Şekil 2.43:** Kirişlere ait yerdeğiştirme süneklikleri.

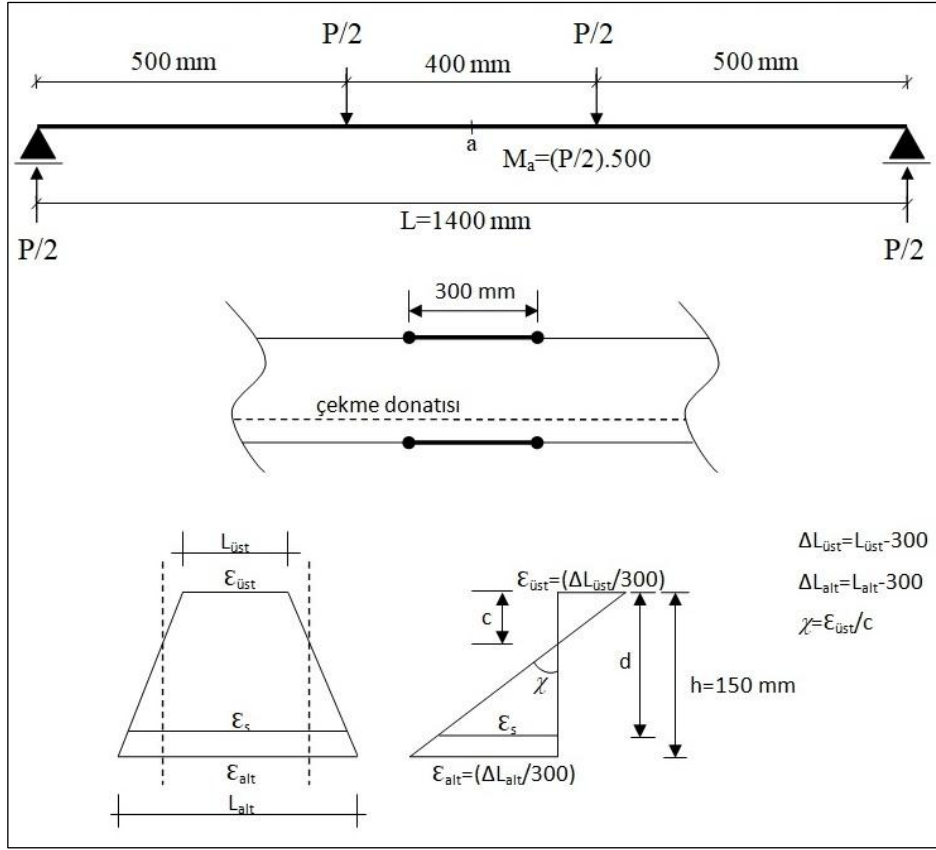


**Şekil 2.44:** Kompozit kiriş yerdeğiştirme sünekliğinin referans kirişlere göre oranları.

Yerdeğiştirme süneklikleri beklendiği gibi donatı artışına bağlı olarak azalmıştır. GB'li referans kirişlerde süneklikler; 9.50 - 1.32 arasında, 3 cm UYPLB tabakalı kompozit kirişlerde 12.58 - 2.37 arasında, 5 cm UYPLB tabakalı kompozit kirişlerde ise 11.30 - 3.62 arasında elde edilmiştir (Şekil 2.43). Kirişlerin basınç bölgesinde UYPLB tabakası kullanılması süneklikte genel olarak artış sağlamıştır (Şekil 2.44). Süneklikte sağlanan artış donatı oranı yüksek olan kirişlerde daha fazla gözlenmiştir. UYPLB tabakası kalınlığının fazla olması yüksek donatı oranına sahip kirişlerde (K4, K5, K6) süneklikte artış sağlamıştır. Daha düşük donatı oranına sahip K1, K2 ve K3 kirişlerinde UYPLB tabakasının kalın olması önemli bir avantaj sağlamadığı görülmüş ve 3 cm'lik tabaka kalınlığı yeterli olmuştur.

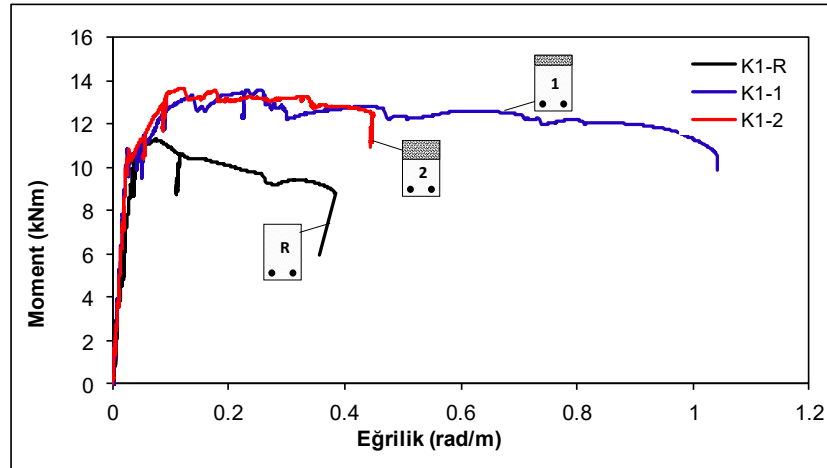
#### 2.6.4 Kirişlerin Moment-Eğrilik Davranışları

Kirişlerin orta bölgesinde 300 mm'lik bir kiriş diliminde, alt ve üst liflere yerleştirilen yerdeğiştirme ölçerden alınan veriler kullanılarak ortalama üst ve alt lif şekildeğiştirmeleri ile kesit birim dönmeleri (eğrilik) belirlenmiştir. Sistem ve yükleme özelliklerine bağlı olarak kiriş orta bölgesine (kesitine) etkiyen moment ve eğrilik Şekil 2.45'te gösterildiği gibi belirlenmiştir.

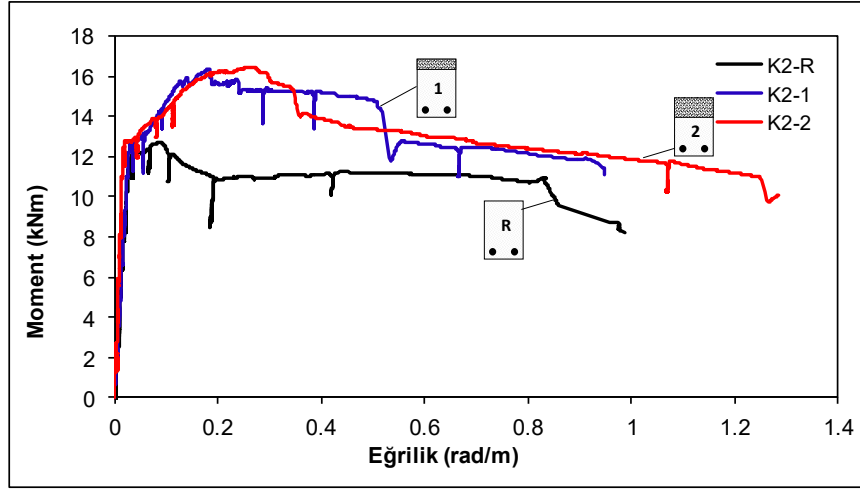


Şekil 2.45: Kiriş orta bölgesindeki ortalama eğrilik ve şekildeğişimler.

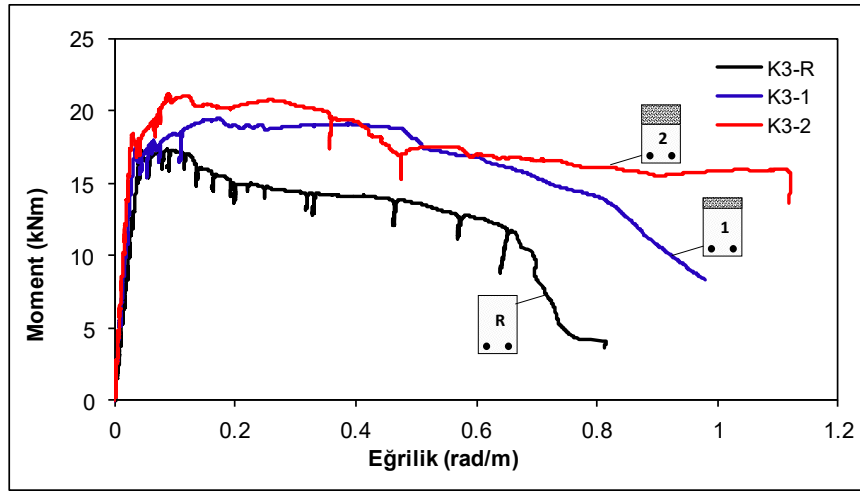
Çalışma kapsamında test edilen 18 adet kiriş için elde edilen moment-eğrilik ilişkileri, her bir donatı oranı için ayrı ayrı olmak üzere Şekil 2.46-2.51’de verilmiştir. Moment-eğrilik ilişkilerinin karakteristiği beklenildiği gibi yük-yerdeğiştirme ilişkisine benzer elde edilmiştir.



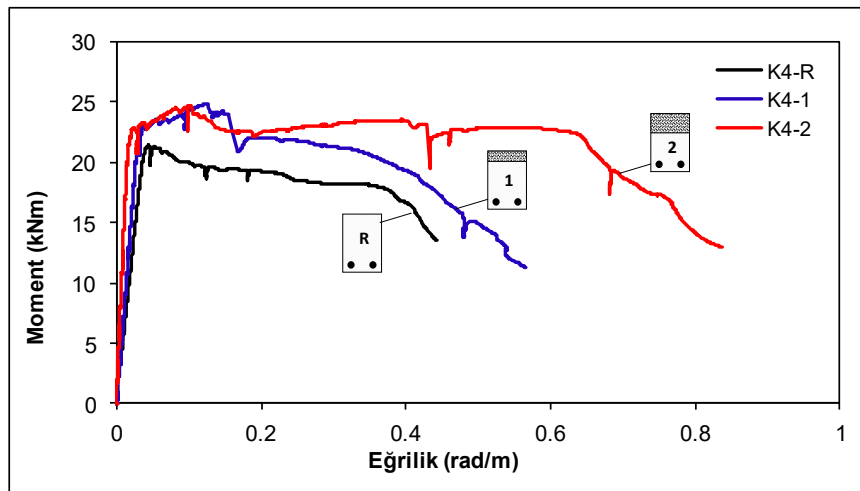
Şekil 2.46: K1 ( $\rho=0.0122$ ) kirişlerine ait moment-eğrilik ilişkileri.



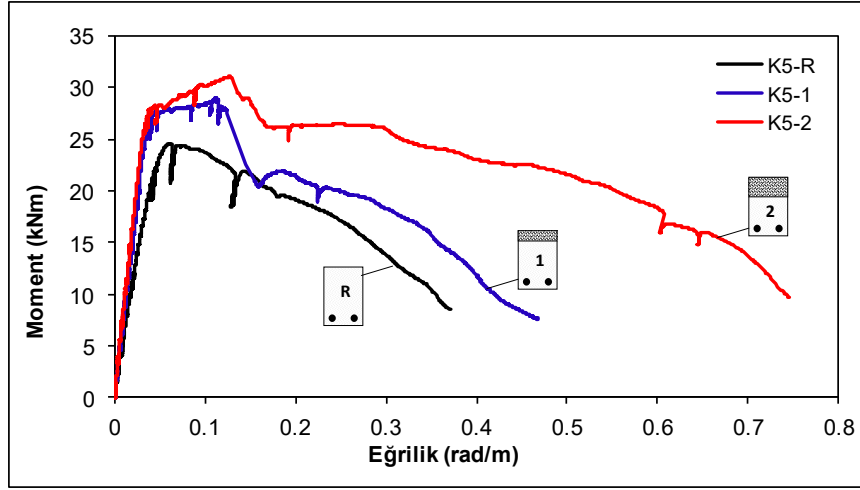
Şekil 2.47: K2 ( $\rho=0.0177$ ) kirişlerine ait moment-eğrilik ilişkileri.



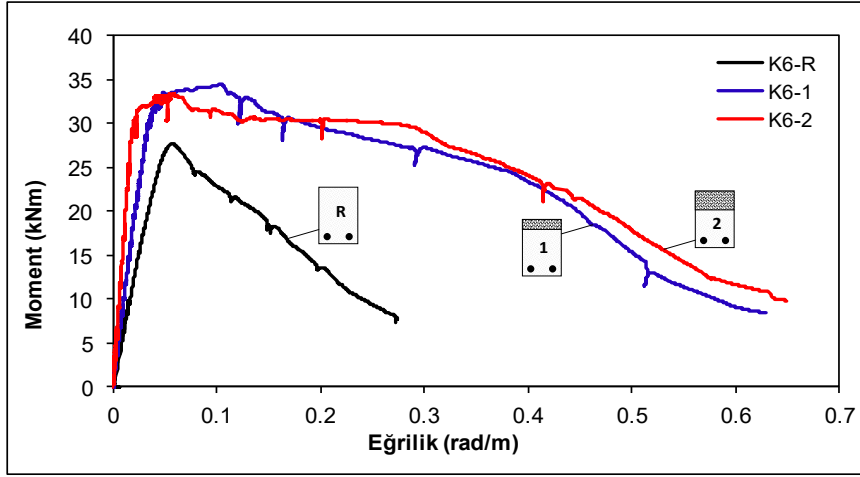
Şekil 2.48: K3 ( $\rho=0.0242$ ) kirişlerine ait moment-eğrilik ilişkileri.



Şekil 2.49: K4 ( $\rho=0.0319$ ) kirişlerine ait moment-eğrilik ilişkileri.



Şekil 2.50: K5 ( $\rho=0.0407$ ) kirişlerine ait moment-eğrilik ilişkileri.



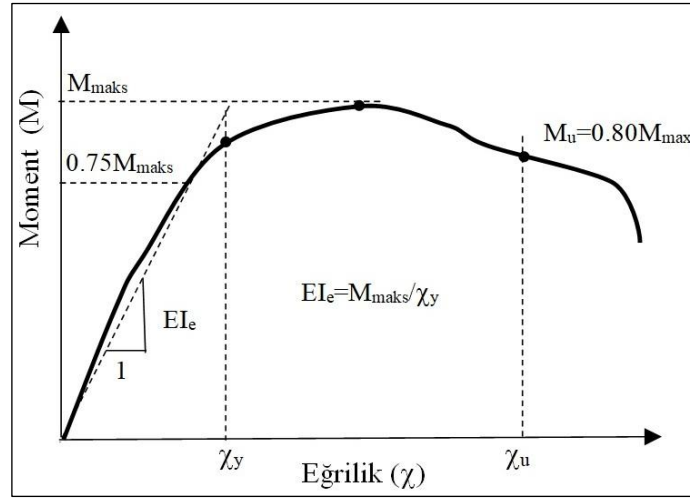
Şekil 2.51: K6 ( $\rho=0.0507$ ) kirişlerine ait moment-eğrilik ilişkileri.

### 2.6.5 Eğrilik Süneklilikleri ve Etkin Eğilme Rijitlikleri

Çalışmada yerdeğiştirme süneklilikleri dışında ayrıca plastikleşen kesitlerin dönme kapasitelerini ifade eden eğrilik süneklilikleri ve eğilme rijitlikleri belirlenmiştir.

Süneklilik hesabında kullanılan moment ( $M_u$ ), akma eğriliği ( $\chi_y$ ) ve maksimum eğrilik ( $\chi_u$ ) değerleri Bölüm 2.6.3'te detayları verilen yaklaşım esasları kullanılarak belirlenmiştir [51]. Etkin eğilme rijitliği ( $EI_e$ ) olarak, akma eğriliği ve maksimum momentin belirlediği başlangıç rijitliği esas alınmıştır (Şekil 2.52). Kirişler için elde

edilen eğrilik süneklikleri, eğilme rijitlikleri ve ilgili diğer karakteristik değerler Tablo 2.7’de verilmiştir.



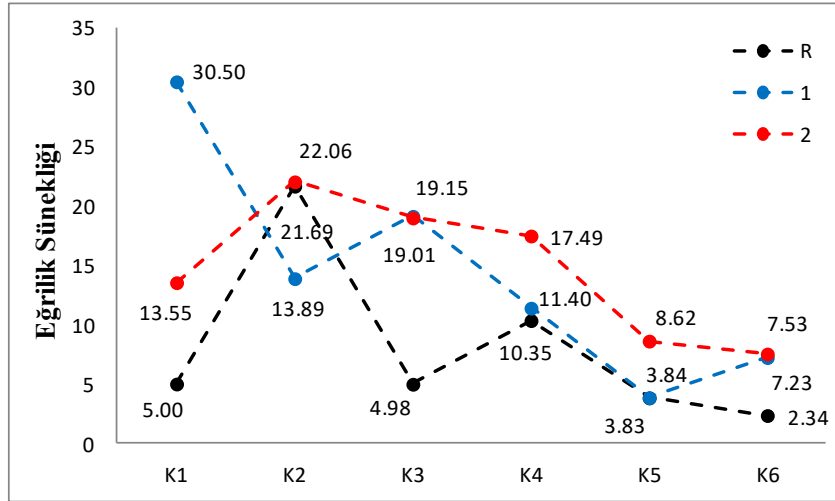
Şekil 2.52: Moment- eğrilik bağıntısına ait karakteristik değerler [51].

Tablo 2.7: Kirişlerin moment-eğrilik ilişkisine ait karakteristik değerler.

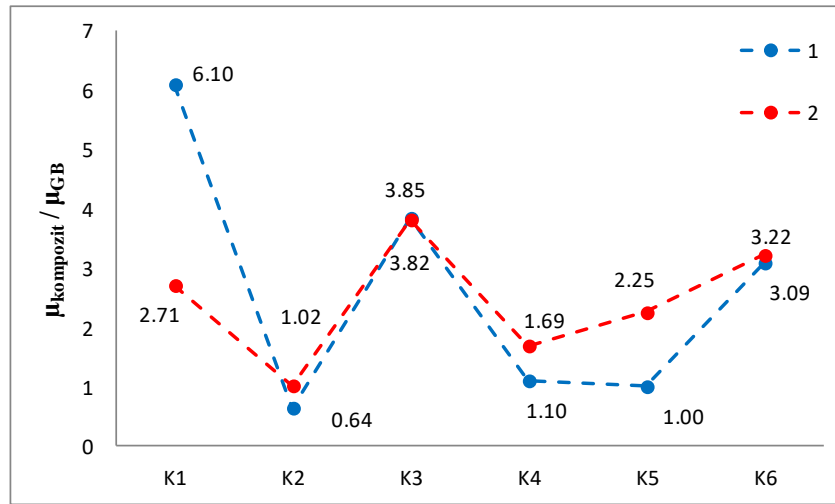
Kiriş Kodu	$\chi_y$ (rad/m)	$M_{maks}$ (kNm)	$M_u$ (kNm)	$\chi_u$ (rad/m)	$\mu_x = \chi_u / \chi_y$	$EI_e = M_{maks} / \chi_y$ (kNm <sup>2</sup> )
K1-R	0.0294	11.16	10.90	0.1350	5.00	379.59
K1-1	0.0338	13.57	10.85	1.0308	30.50	401.48
K1-2	0.0332	13.65	12.39	0.4498	13.55	411.15
K2-R	0.0407	12.20	9.76	0.8829	21.69	299.75
K2-1	0.0361	16.33	14.77	0.5016	13.89	452.36
K2-2	0.0267	16.47	13.17	0.5892	13.01	616.85
K3-R	0.0397	17.35	13.88	0.1977	4.98	437.03
K3-1	0.0359	19.52	15.63	0.6874	19.15	543.73
K3-2	0.0321	21.22	16.97	0.6102	19.01	661.06
K4-R	0.0373	21.40	17.15	0.3859	10.35	573.73
K4-1	0.0332	24.88	19.90	0.3783	11.40	749.40
K4-2	0.0305	24.75	19.81	0.6945	17.49	811.48
K5-R	0.0464	24.60	19.68	0.1779	3.83	530.17
K5-1	0.0378	28.98	22.54	0.1451	3.84	766.67
K5-2	0.0373	31.07	24.86	0.3215	8.62	832.98
K6-R	0.0469	27.65	22.12	0.1096	2.34	589.55
K6-1	0.0377	34.38	27.50	0.2726	7.23	911.94
K6-2	0.0302	33.26	26.61	0.3678	7.53	1101.32

Kirişlere ait eğrilik sünekliklerinin donatı oranına göre değişimleri Şekil 2.53’te, kompozit kirişler için elde edilen eğrilik sünekliklerin referans kirişleri için elde edilen eğrilik sünekliklerine oranı da Şekil 2.54’te verilmiştir.





Şekil 2.53: Kirişlere ait eğrilik süneklikleri.



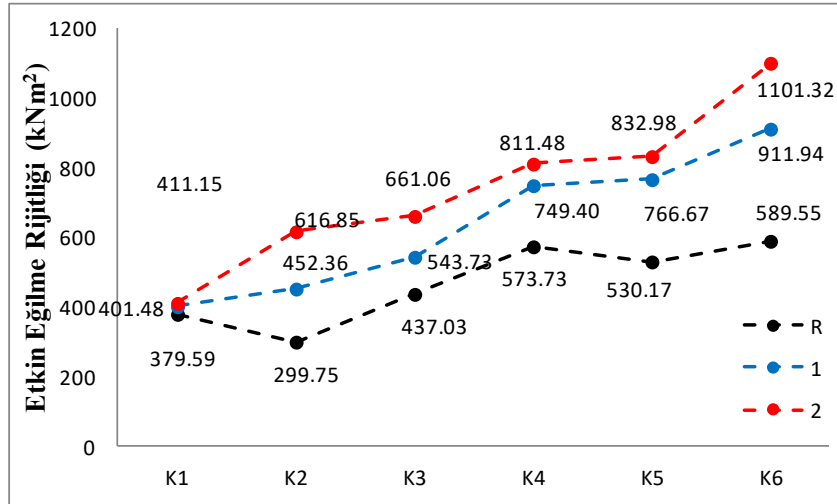
Şekil 2.54: Kompozit kiriş eğrilik sünekliklerinin GB'li referans kiriş sünekliklerine oranları.

Kompozit kirişlerdeki eğrilik süneklikleri genel olarak GB'li referans kirişlerine göre daha yüksek elde edilmiştir. Kompozit kirişlerdeki UYPLB tabaka kalınlığının artması, özellikle yüksek donatı oranlarında sünekliği arttırmıştır.

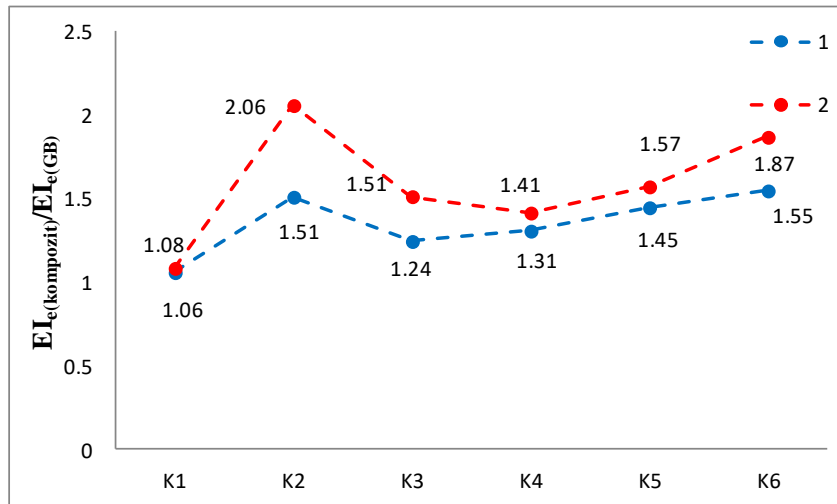
Geleneksel betonarme kirişlerde çekme donatısı dengeli donatıya bağlı olarak sınırlandırılmaktadır ( $\rho \leq 0.85\rho_b$ ) [47]. Bu sayede çekme kırılması oluşturularak en az 2-3'lük eğrilik sünekliğinin sağlanması hedeflenmektedir [52, 53]. Deprem etkisindeki elemanlarda daha büyük sünekliklere ihtiyaç duyulmakla birlikte, düşey yükler etkisindeki elemanlarda bu değerlerin yeterli olduğu kabul edilmektedir. Buna

göre en yüksek donatı oranına sahip kompozit kirişlerde dahi yeterli eğrilik sürekliliğinin sağlandığı söylenebilmektedir.

Kirişlerin etkin eğilme rijitliklerinin donatı oranına göre değişimleri Şekil 2.55’de, kompozit kirişler için elde edilen etkin eğilme rijitliklerinin referans kirişleri için elde edilen etkin eğilme rijitliklerine oranı da Şekil 2.56’da verilmiştir.



Şekil 2.55: Kirişlere ait etkin eğilme rijitlikleri.

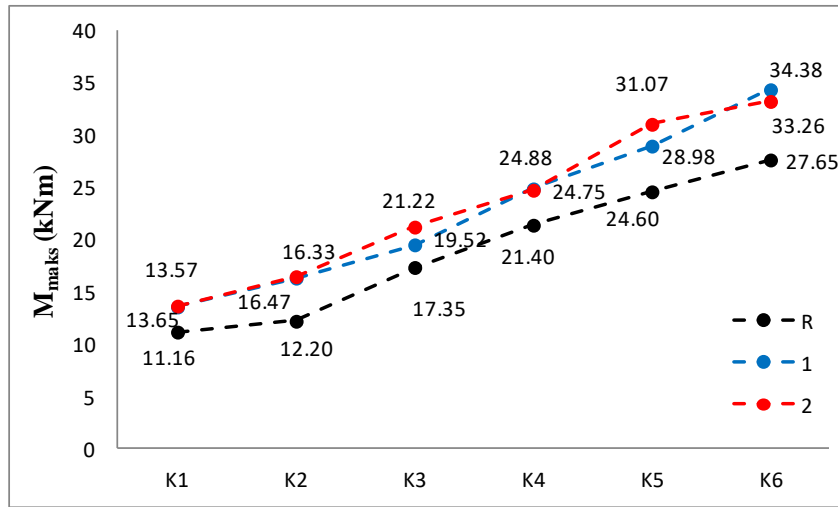


Şekil 2.56: Kompozit kiriş etkin eğilme rijitliğinin referans kirişlere göre oranları.

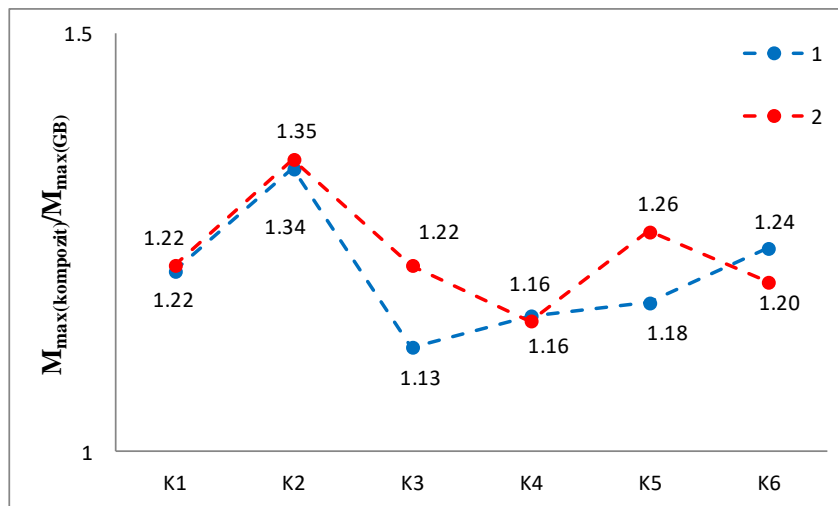
Kompozit kirişlerde eğilme rijitlikleri GB kirişlere göre ortalama %46 oranında artmıştır. Genel olarak tabaka kalınlığının fazla olması rijitlikleri arttırmıştır.

## 2.6.6 Yük/Moment Taşıma Kapasiteleri

UYPLB tabakasının kiriş yük/moment taşıma kapasitesine olan etkisini belirlemek amacıyla GB'li referans kirişleri ile kompozit kirişlerin moment taşıma kapasiteleri karşılaştırılmıştır. Kirişler için elde edilen moment taşıma kapasitelerinin ( $M_{maks}$ ) donatı oranlarına göre değişimleri Şekil 2.57'de, kompozit kiriş kapasitelerinin GB'li referans kiriş kapasitelerine oranları Şekil 2.58'de grafik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.57: Kiriş moment taşıma kapasitelerinin donatı oranı ile değişimi.

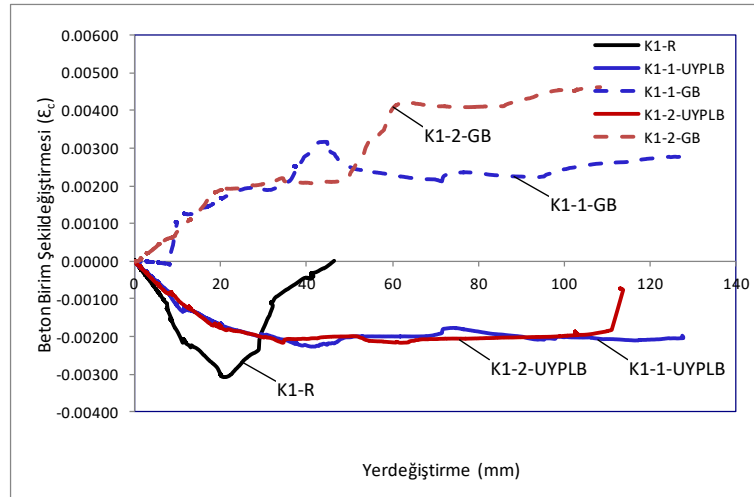


Şekil 2.58: Kompozit kiriş moment taşıma kapasitesinin referans kirişlere göre oranları.

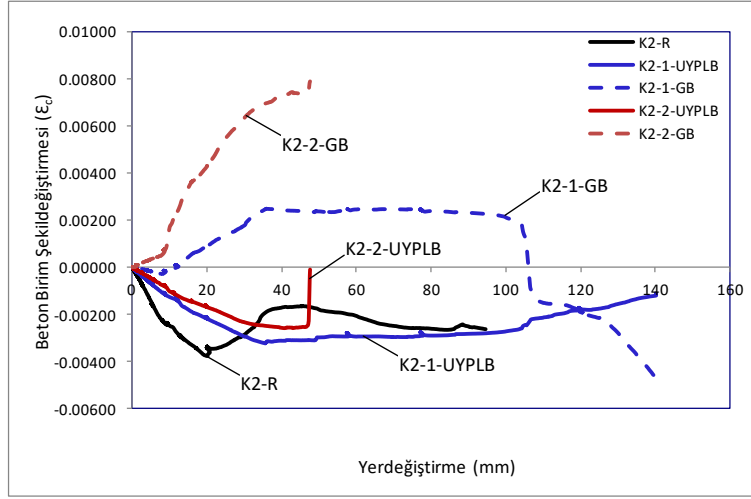
Moment taşıma kapasiteleri beklendiği gibi donatı artışına bağlı olarak artmıştır. Kompozit kirişlerde GB'li referans kirişlerine göre ortalama %22'ye varan oranlarda kapasite artışları elde edilmiştir. UYPLB tabakası kalınlığının değişimi moment taşıma kapasiteleri üzerinde etkili olmamıştır.

### 2.6.7 Beton ve Donatı Şekildeğiştirme Davranışları

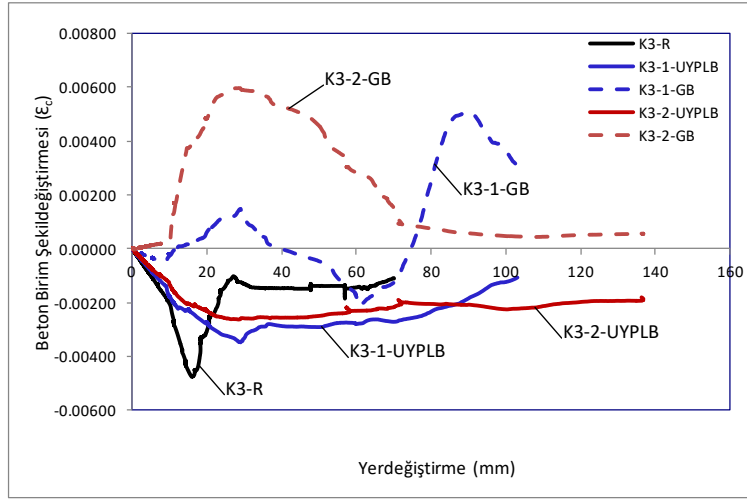
Kirişlerde beton ve çekme donatısındaki şekildeğiştirme durumlarını belirlemek amacıyla kiriş yan yüzlerine yerleştirilen şekildeğiştirme ölçerlerden ve eğrilik ölçer düzeneğinden elde edilen veriler kullanılmıştır (Şekil 2.59 - 2.64).



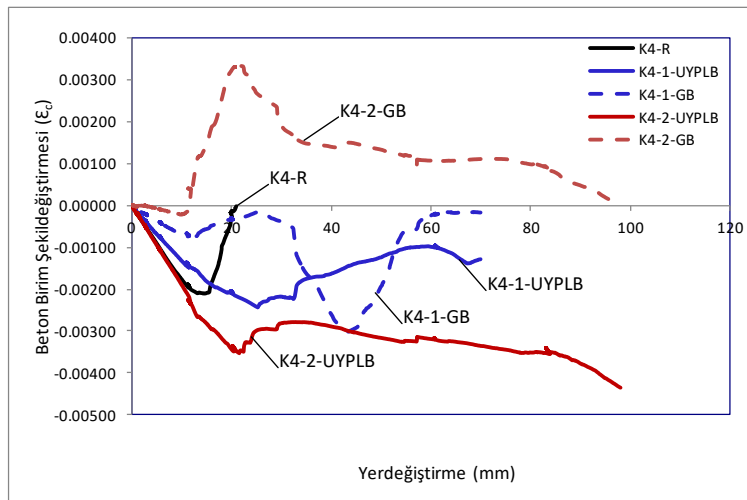
Şekil 2.59: K1 ( $\rho=0.0122$ ) kirişlerinde betondan elde edilen birim şekildeğiştirme değerleri.



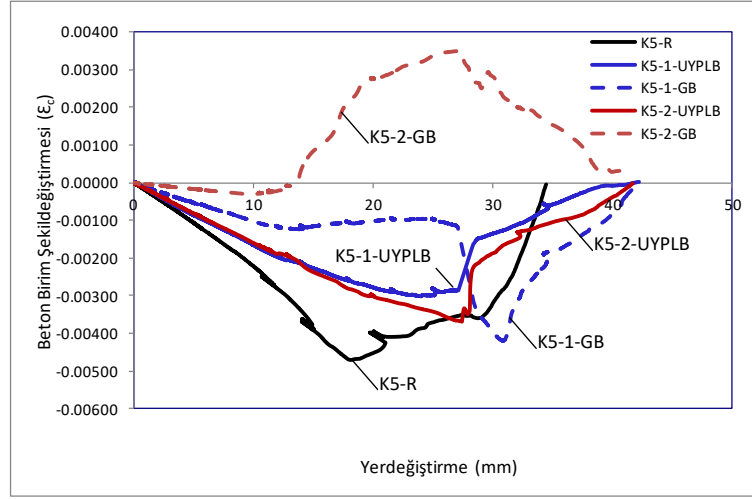
Şekil 2.60: K2 ( $\rho=0.0177$ ) kirişlerinde betondan elde edilen birim şekildeğiştirme değerleri.



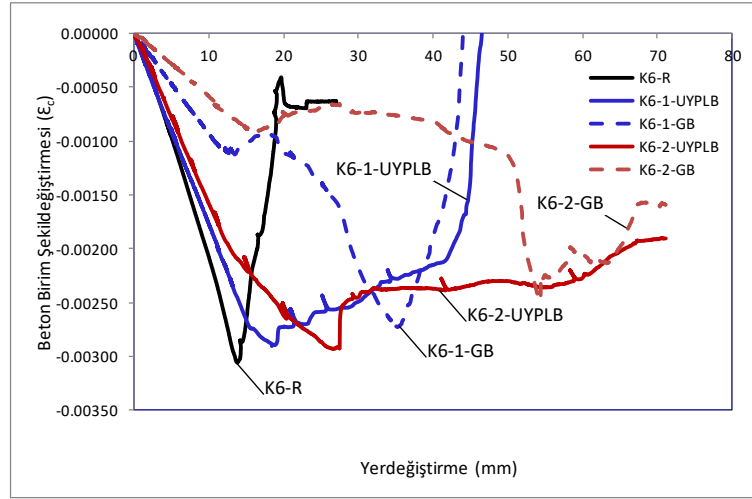
Şekil 2.61: K3 ( $\rho=0.0242$ ) kirişlerinde betondan elde edilen birim şekildeğiştirme değerleri.



Şekil 2.62: K4 ( $\rho=0.0319$ ) kirişlerinde betondan elde edilen birim şekildeğiştirme değerleri.

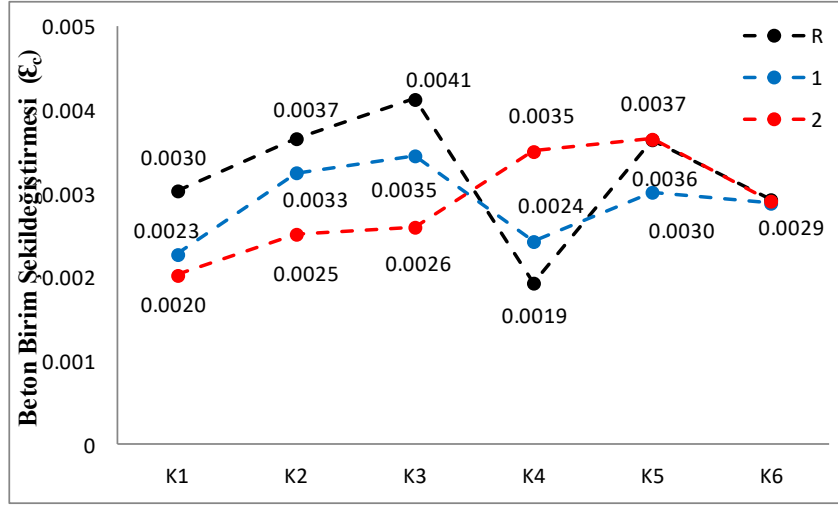


Şekil 2.63: K5 ( $\rho=0.0407$ ) kirişlerinde betondan elde edilen birim şekildeğiştirme değerleri.

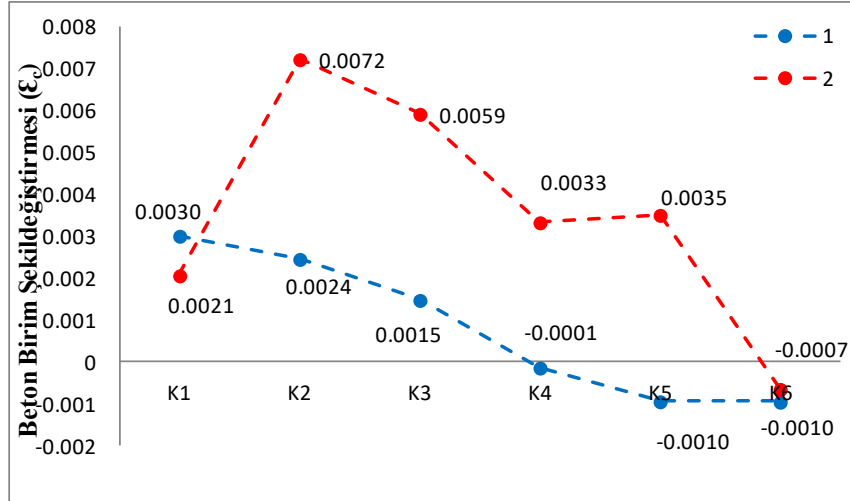


Şekil 2.64: K6 ( $\rho=0.0507$ ) kirişlerinde betondan elde edilen birim şekildeğiştirme değerleri.

Kirişlerde maksimum moment değerine ulaşıldığında beton üst (basınç) lifinde oluşan şekildeğiştirmeler, kompozit kirişlerdeki GB üst lifinde (iki betonun birleştiği noktada) oluşan şekildeğiştirmeler ve çekme donatılarında kiriş orta bölgesinde oluşan ortalama uzama şekildeğiştirmeleri sırasıyla Şekil 2.65, Şekil 2.66 ve Şekil 2.67’de verilmiştir.

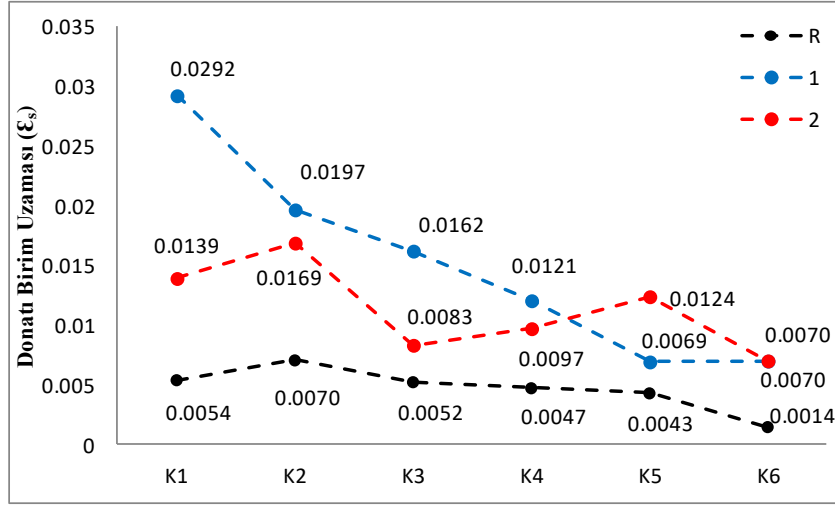


**Şekil 2.65:** Kirişlerdeki maksimum yük/moment değerindeki maksimum beton birim şekildeğiştirmeleri.



**Şekil 2.66:** Moment taşıma kapasitesine ulaşmış kompozit kirişlerde geleneksel betondaki birim şekildeğiştirmeler.

Kirişlerde maksimum y¼ke (tepe noktasına) ulaşıldığında betonda meydana gelen maksimum şekildeğiştirmeler; kompozit kirişlerde 0.0020-0.0037 arasında, GB'li referans kirişlerde ise 0.0019-0.0041 arasında olduğu g¼r¼lmektedir (Şekil 2.65). Betondaki ezilmelerin beklenildiği gibi ortalama 0.003'l¼k birim şekildeğiştirmelerde gerçekteştiği s¼ylenebilmektedir.



**Şekil 2.67:** Kirişlerin orta bölgesinde maksimum moment değerindeki ortalama çekme donatısı birim şekildeğiştirmeleri.

Kompozit kirişlerdeki geleneksel beton maksimum şekildeğiştirme değerleri incelendiğinde, (Şekil 2.66) bazı kompozit kirişlerde UYPLB tabakasının hemen altında çekme gerilmeleri olduğu gözlenmektedir. Bu durum maksimum yüke ulaşıldığında UYPLB tabakası içinde çekme gerilmelerinin de oluştuğunu, basınç bölgesinin uygulanan tabaka kalınlığından (3 cm ve 5 cm) daha küçük olduğunu göstermiştir. Diğer yandan, yüksek donatı oranına sahip bazı kompozit kirişlerde (K5-1, K6-1, K6-2) basınç bölgesi, uygulanan UYPLB tabakasının kalınlığını aşmış ve çok küçük ölçüde GB bölgesine geçmiştir. Bu durum 5 cm UYPLB tabakalı kompozit kirişlerin sadece en yüksek donatı oranında oluşurken, 3 cm UYPLB tabakalı kompozit kirişlerin ikisinde (K5-1, K6-1) oluşmuştur.

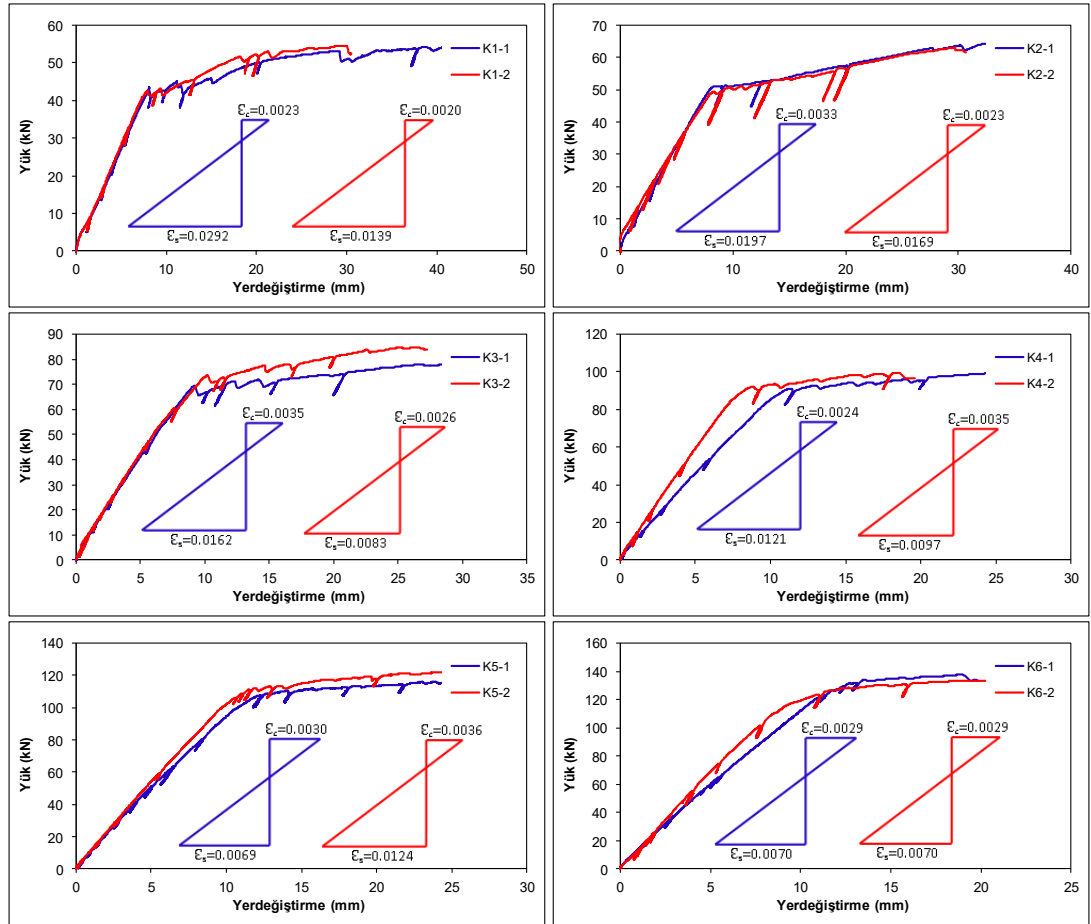
Çekme donatılarındaki ortalama uzama şekildeğiştirmeleri incelendiğinde (Şekil 2.67); K1-K3 kompozit kirişlerinde dengeli donatının çok altında kalınması nedeniyle maksimum kapasiteye ulaşıldığında donatılarda pekleşme bölgesine geçildiği, K4-K6 kirişlerinde ise akma sahanlığında kalındığı belirlenmiştir.

Eğilme elemanlarında yeterli sünekliğin kontrolü için ACI-318-14'te [54] şekildeğiştirme esaslı bir yaklaşım kullanılmaktadır. Bu yaklaşıma göre eğilme elemanlarında çekme kontrollü sünek davranışın sağlanması için betonda maksimum şekildeğiştirmeye ( $\epsilon_s=0.003$ ) ulaşıldığında donatıdaki birim uzamanın en az 0.005 olması istenmektedir. Çalışmada incelenen kirişler bu yaklaşıma göre



değerlendirilerek özellikle yüksek donatı oranlarında elde edilen sünekliklerin yeterliliği kontrol edilmiştir. Bunun için beton ve donatı şekildeğiştirme ölçümlerinden yararlanarak maksimum yük değerine ulaşıldığı andaki şekildeğiştirme durumları belirlenmiş ve Şekil 2.68’de gösterilmiştir.

Şekil 2.68’de; maksimum yük değerine ulaşıldığında beton şekildeğiştirme değeri yaklaşık olarak 0.003 olarak elde edilirken, donatılardaki uzamaların tüm kirişlerde 0.005’lik sınır değeri aştığı görülmektedir. Geleneksel betondan farklı olarak UYPLB’nin maksimum şekildeğiştirme kapasitesinin 0.0035-0.004 olduğu göz önüne bulundurulduğunda en yüksek donatı oranına sahip kirişlerde dahi yeterli sünekliğin fazlasıyla sağlandığı söylenebilmektedir.



**Şekil 2.68:** Kompozit kirişlerde maksimum yüke karşılık gelen beton ve donatı birim şekildeğiştirme durumları.

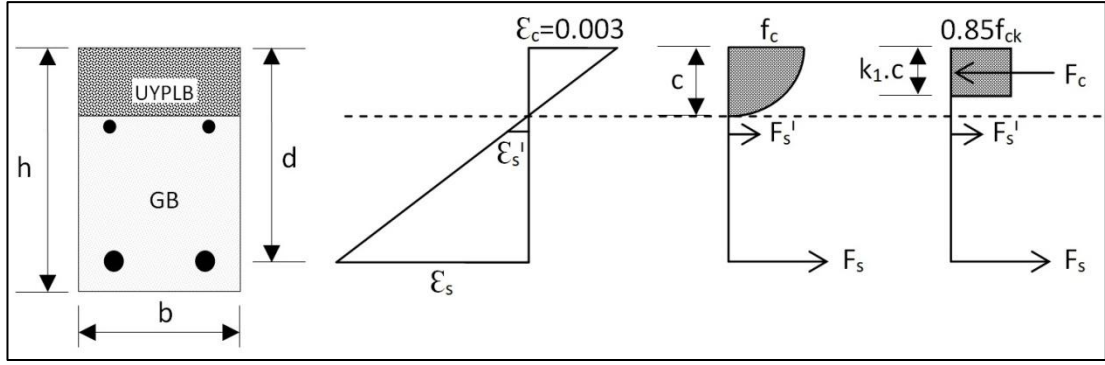
### **3. KOMPOZİT BETONARME KİRİŞLERİN EĞİLME KAPASİTELERİNİN SAYISAL HESABI**

Bu bölümde eğilme davranışları deneysel olarak incelenen kompozit kirişlerin moment taşıma kapasitelerinin sayısal hesabı yapılmış ve deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

Salt UYPLB kirişlerde veya çekme bölgesinde UYPLB içeren kompozit kirişlerin eğilme tasarımında, liflerin sağladığı çekme dayanımı ve çatlak lokalleşmesi nedeniyle geleneksel betonarmeden oldukça farklı yaklaşımlar uygulanmaktadır [10, 12, 14]. Bu yaklaşımlarda genel olarak betonun çekme dayanımını ve şekildeğiştirme kapasitesini göz önüne alan tasarım prosedürleri kullanılmaktadır.

Çalışmada incelenen kompozit kirişlerde ise sadece üst (basınç) bölgesinde UYPLB bulunmakta, alt bölge GB'den oluşmaktadır. Bu nedenle maksimum moment kapasitesine ulaşıldığında genel olarak basınç bölgesinin UYPLB tabakasının içinde kaldığı görülmektedir. Kompozit kirişlerde kullanılan tabaka kalınlığına bağlı olarak basınç bölgesi UYPLB tabakasının bir miktar içine veya bir miktar dışına geçebilmekte, ancak her iki durumda da şekildeğiştirme değerleri çok küçük olduğu için basınç gerilmelerinin sadece UYPLB tabakası ile karşılandığı ve çekme gerilmelerinin kapasiteye etkisinin ihmal edilebileceği söylenebilmektedir.

Bu verilere dayanarak çalışmada incelenen kompozit kirişlerde eğilme kapasitesinin hesabında geleneksel betonarme esaslarının geçerliliği değerlendirilmiştir. Bu amaçla kompozit kirişlerin eğilme kapasitelerinin sayısal hesabı için TS 500'de [47] önerilen gerilme birim şekildeğiştirme durumu esas alınmıştır. Deney sonuçları ile karşılaştırma yapılacağı için tasarımdan farklı olarak, beton ve çelik için numune testlerinde elde edilen dayanımlar göz önüne alınmış, pekleşme oluşan donatılarda pekleşmenin kapasiteye etkisi de hesaba katılmıştır.



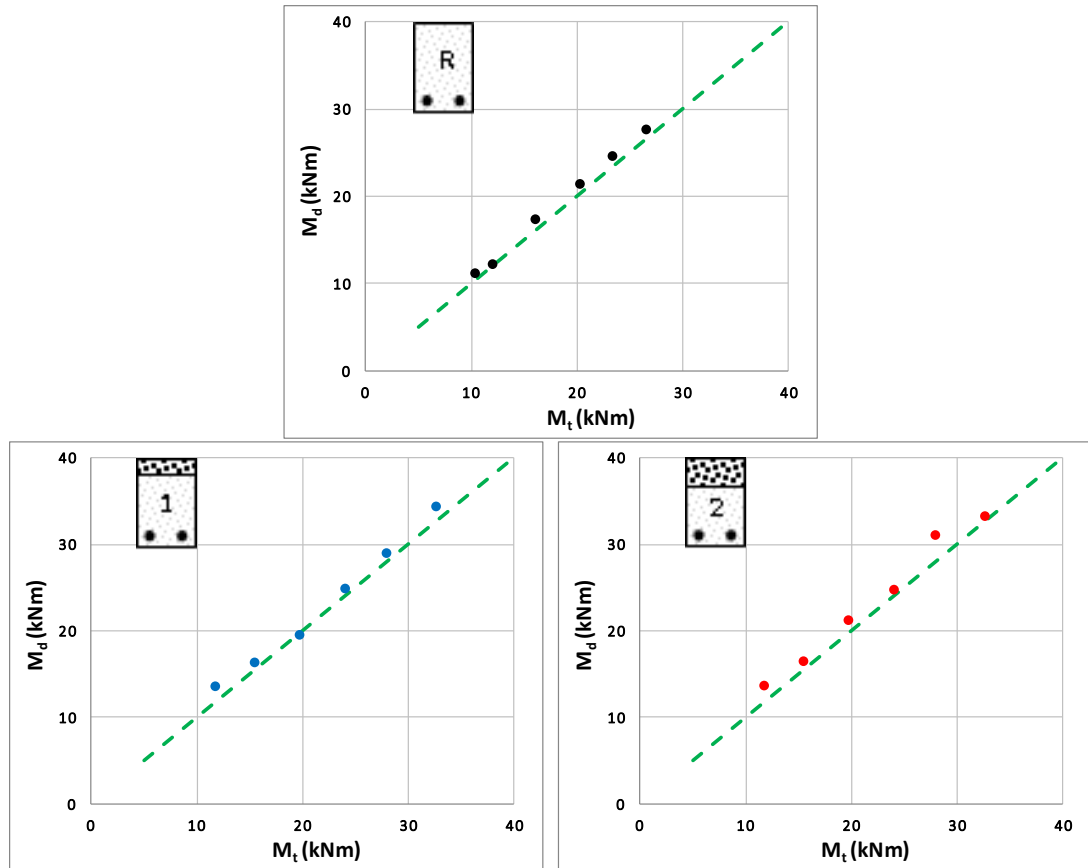
**Şekil 3.1:** Sayısal hesapta esas alınan şekil değiştirme ve gerilme durumları.

Şekil 3.1’de  $\epsilon_s$  donatı birim şekil değiştirmesini,  $f_c$  beton basınç gerilmesini,  $f_s$  donatıdaki gerilmeyi,  $f_{ck}$  beton karakteristik basınç dayanımını,  $F_c$  beton basınç gerilmesinin bileşkesini,  $F_s$  donatılardaki çekme gerilmesinin bileşkesini,  $F_s^l$  montaj donatılardaki çekme gerilmesinin bileşkesini,  $c$  basınç bölgesi uzunluğunu ve  $k_1$  beton dayanımının eşdeğer gerilme bloğuna etki katsayısını ifade etmektedir. TS 500’de [47] beton basınç dayanımı 50 MPa üzerindeki betonlara ait  $k_1$  katsayısı bulunmadığı için ACI-318-14’ten [54] yararlanılarak  $k_1=0.65$  alınmıştır. Eğilme kapasitesinin hesabında kullanılan parametreler ve teorik kapasiteler ( $M_t$ ) ile deneysel kapasitelerin ( $M_d$ ) karşılaştırması Tablo 3.1 ve Şekil 3.2’de verilmiştir.

Kullanılan sayısal yaklaşım genel olarak deney sonuçları ile oldukça yaklaşık sonuçlar vermiştir. Teorik ve deneysel sonuçlar arasındaki farkların GB’li kirişlerdeki mertebede olduğu, buna dayanarak geleneksel betonarmedeki eğilme tasarımı yaklaşımının kompozit kirişler için kullanılabilmesi söylenebilmektedir.

**Tablo 3.1:** Teorik hesap parametreleri ve kapasiteler.

Kiriş Adı	Sayısal Hesap Sonuçları			$M_d$ (kNm)	$M_d/M_t$
	c (cm)	$\epsilon_s$	$M_t$ (kNm)		
K1-R	3.11	0.0095	10.35	11.16	1.08
K1-1	1.69	0.0199	11.73	13.57	1.15
K1-2	1.69	0.0199	11.73	13.65	1.16
K2-R	3.44	0.0082	12.00	12.20	1.02
K2-1	2.12	0.0151	15.45	16.33	1.06
K2-2	2.12	0.0151	15.45	16.47	1.07
K3-R	5.14	0.0044	16.05	17.35	1.08
K3-1	2.65	0.0114	19.70	19.52	0.99
K3-2	2.65	0.0114	19.70	21.22	1.08
K4-R	6.18	0.0031	20.26	21.40	1.06
K4-1	3.10	0.0092	24.01	24.88	1.04
K4-2	3.10	0.0092	24.01	24.75	1.03
K5-R	7.90	0.0017	23.34	24.60	1.05
K5-1	3.52	0.0077	27.92	28.98	1.04
K5-2	3.52	0.0077	27.92	31.07	1.11
K6-R	10.10	0.0007	26.53	27.65	1.04
K6-1	4.70	0.0061	32.61	34.38	1.05
K6-2	4.70	0.0061	32.61	33.26	1.02



**Şekil 3.2:** Teorik ve deneysel eğilme kapasitelerinin karşılaştırması.

## 4. SONUÇLAR

Çalışmada basınç bölgesi belirli kalınlıkta UYPLB, diğer bölümü geleneksel beton içeren kompozit betonarme kirişlerin eğilme davranışları deneysel olarak incelenmiştir. Deneysel incelemesi yapılan kirişlerin eğilme kapasitelerinin sayısal hesabı için geleneksel tasarım esaslarının geçerliliği irdelenmiş ve yeni yaklaşımların gerekliliği değerlendirilmiştir.

Çalışmada çekme donatısı oranları %1.22 - %5.07 arasında değişen 6 farklı kiriş incelenmiştir. Kirişlerin dördünde TS 500'de [47] verilen maksimum çekme donatısı oranı ( $\rho_{max}=0.02$ ) aşılarak, UYPLB'nin basınç kapasitesi sayesinde yüksek eğilme kapasiteli kirişlerin üretilebilirliğinin araştırılması hedeflenmiştir. Çok yüksek donatı oranları kullanılmasına rağmen UYPLB'nin yüksek basınç dayanımı sayesinde tüm kirişlerde sünek çekme kırılması elde edilmiştir. ACI-318-14'da [54] donatı şekildegıştirmesi kriterlerine göre tüm kirişlerde yeterli sünekliğin sağlanabildiği belirlenmiştir. Kirişlerde basınç donatısı kullanılması halinde bu sünekliklerin artacağı ve daha yüksek donatı oranlarına çıkılabileceği de söylenebilmektedir. Basınç bölgesinde UYPLB kullanılması sayesinde beton ezilmesine ulaşan kesitlerde ani kırılma yerine hafif dayanım azalmalarına sebep olan sünek kırılmalar gözlenmiştir. Geleneksel betonarme kirişlerde basınç donatısı ve etriyeler ile sağlanabilen bu davranış, UYPLB'deki liflerin sağladığı şekildegıştirme kapasitesini ve dolayısıyla basınç donatısız kullanılabilirliğini göstermiştir.

Kompozit kirişlerde geleneksel beton ile UYPLB tabakası arasındaki kayma gerilmeleri iki kollu kesme etriyeleri ve betonlar arasındaki sürtünme yoluyla karşılanmıştır. Kırılma yüküne ulaşmış kirişlerde dahi iki beton arasında herhangi bir ayrışma oluşmadan düzlem kesit eğilme davranışı sağlanmıştır. Bu sonuç kesme kuvveti için kullanılan enine donatıların aynı zamanda iki beton arasındaki aderansı sağlamak amacıyla kullanılabilirliğini göstermiştir.

Kirişlerin basınç bölgesinde UYPLB kullanımı ile özellikle yüksek donatı oranlarındaki sünekliklerde GB'li referans kirişlerine göre 2.76 kata varan artışlar elde edilmiştir. GB'li referans kirişlerinde yüksek donatı oranlarında beklenildiği gibi süneklik büyük oranda azalırken, UYPLB'den sağlanan süneklik avantajı donatı oranı arttıkça artmıştır.

UYPLB kullanımı eğilme kapasitesinde aynı enkesitli referans kirişlerine göre ortalama %22 artış sağlamıştır. Bununla birlikte kompozit kirişlerde sağlanan en önemli avantaj aynı enkesitte yüksek donatı oranlarına çıkılabilmesi olmuştur. Bu sayede çalışmada esas alınan betonarme kesitte yeterli süneklik de sağlanarak eğilme kapasitelerinin maksimum donatılı ( $\rho=0.02$ ) GB'li kirişlere göre 2.5 kata kadar arttırılabileceği gösterilmiştir. Kirişlerde basınç donatısı kullanılması halinde çok daha yüksek kapasitelerin elde edilebileceği de söylenebilmektedir.

Çatlak dağılımları ve ölçülen en büyük çatlak genişlikleri bakımından, kompozit kirişler ve referans kirişler arasında önemli bir fark oluşmamıştır. Kompozit kirişlerdeki çatlaklar GB bölgesinde sınırlı kalmış, UYPLB bölgesinde çatlak gözlenmemiştir. Salt UYPLB içeren kirişlerde veya çekme bölgesinde UYPLB tabakası bulunan kirişlerde görülen çatlak lokalleşmesi ve buna bağlı erken donatı kopması engellenmiştir.

Kompozit kirişlerde basınç bölgelerinde 3 cm ve 5 cm'lik UYPLB tabakası kalınlıkları uygulanmış ve eğilme davranışına olan etkileri ortaya konmuştur. Eğilme kapasitesi ve çatlak davranışı bakımından tabaka kalınlığının önemli bir etkisi olmadığı belirlenmiştir. Tabaka kalınlığının artması yüksek donatı oranına sahip kirişlerin (K4, K5, K6) sünekliklerinde artış sağlamıştır. Daha düşük donatı oranına sahip kirişlerde (K1, K2, K3) benzer süneklikler elde edilmiş, 3 cm'lik kalınlığın sünekliği artırabildiği belirlenmiştir. Buna göre donatı oranı %2.5'den daha az olan kirişlerde 3 cm'lik UYPLB tabaka kalınlığının yeterli olduğu, daha yüksek donatı oranlarında tabaka kalınlığının 5 cm olarak kullanılmasının uygun olacağı söylenebilmektedir.

İncelenen kompozit kirişler kapsamında geleneksel betonarme eğilme tasarımı yaklaşımının oldukça iyi sonuçlar verdiği, UYPLB için özel beton modellerine gerek olmadan kullanılabilceği görülmüştür.

Sonuç olarak betonarme kirişlerde basınç bölgesinde yeterli kalınlıkla UYPLB tabakası kullanılarak kompozit kirişler oluşturulabileceği ve böylece GB ile elde edilemeyecek mertebede yüksek eğilme kapasitesine sahip kirişlerin üretilebileceği görülmüştür. Bu şekilde uygulanacak kompozit kirişlerin salt UYPLB kirişlere göre çok daha ekonomik olacağı ve çatlak lokalleşmelerinin önüne geçerek yüksek sünekliklerin elde edilebileceği söylenebilmektedir. Bununla birlikte çalışmada incelenen kiriş boyutları göz önünde bulundurulduğunda daha büyük boyutlu kiriş numuneleri, farklı enkesitler ve donatı detayları için benzer çalışmaların yapılması ve bunlarla uyumlu sayısal tasarım esaslarının geliştirilmesi gerektiği düşünülmektedir.

## 5. KAYNAKLAR

- [1] Taşdemir, M. A., Bayromov, F., Yüksek performanslı çimento esaslı kompozitlerin mekanik davranışı, *itüdergisi/d, mühendislik serisi*, 1 (2), 125-144, (2002).
- [2] Wille, K., Naaman, A. E., Parra-Montesinos, G. J., Ultra-high performance concrete with compressive strength exceeding 150 MPa (22 ksi): a simpler way, *ACI Materials Journal*, 108 (1), 46-54, (2011).
- [3] Wille, K., Naaman, A. E., El-Tawil, S., Parra-Montesinos, G. J., Ultra-high performance concrete and fiber reinforced concrete: achieving strength and ductility without heat curing, *Materials and Structures*, 45, 309-324, (2012).
- [4] Wang, C., Yang, C., Liu, F., Wan, C., Pu, X., Preparation of ultra-high performance concrete with common technology and materials, *Cement and Concrete Composites*, 34, 538-544, (2012).
- [5] Yazıcı, H., Yardımcı, M. Y., Aydın, S., Karabulut, A. S., Mechanical properties of reactive powder concrete containing mineral admixtures under different curing regimes, *Construction and Building Materials*, 23, 1223-31, (2009).
- [6] Yudenfreund, M., Skalny, J., Mikhail, R.S., Brunauer, S., Hardened portland cement pastes of low porosity, II. Exploratory studies, Dimensional changes, *Cement and Concrete Research*, 2 (3), 331-348, (1972).
- [7] Roy, D. M., Gouda, G. R., Bobrowsky, A., Very high strength cement pastes prepared by hot pressing and other high pressure techniques, *Cement and Concrete Research*, 2, 349-366, (1972).



- [8] Bache, H. H., Densified cement/ultrafine particle-based materials. *2nd int. Conference on superplasticizers in concrete*, Ottawa, (1981).
- [9] Richard, P., Cheyrezy, M., Composition of reactive powder concretes. *Cement and Concrete Research*, 25 (7), 1501-1511, (1995).
- [10] AFGC, Recommendation: Ultra high performance fibre-reinforced concretes, revised ed., Association Française de Génie Civil; *Service d'études techniques des routes et autoroutes*, (2013).
- [11] Fehling, E., Schmidt, M., Walraven, J., Leutbecher, T., Frönlich, S., Ultra-High Performance Concrete UHPC, *Betonkalender*, Wilhelm Ernst & Sohn, (2014).
- [12] JSCE, Recommendations for design and construction of high performance fiber reinforced cement composites with multiple fine cracks, *Concrete Engineering Series*, 82, Japan Society of Civil Engineers, (2008).
- [13] Russell, H. G., Graybeal, B. A., Ultra-high performance concrete: a state-of-the-art report project bridge community, *FHWA Publication HRT-13-060*, Federal Highway Administration, (2013).
- [14] Gowripalan, N., Gilbert, I., *Design guidelines for ductal prestressed concrete beams*, VSL Australia, (2000).
- [15] Naaman, A. E., High performance fiber reinforced cement composites classification and applications, *CBM-C1 International workshop*, Karachi, Pakistan, 389-400, (2007).
- [16] Habel, K., Viviani, M., Denarié, E., Brühwiler, E. "Development of the mechanical properties of an ultra-high performance fiber reinforced concrete (UHPFRC)", *Cement and Concrete Research*, 36 (7), 1362-1370, (2006).

- [17] Voo, Y. L., Foster, S. J., “Characteristics of ultra-high performance ‘ductile’ concrete and its iMPact on sustainable construction”, *The IES Journal Part A: Civil & Structural Engineering*, 3 (3), 168-187 (2010).
- [18] Arslan, G., Taflan, K. S., Haberveren, S., Taşdemir, M.A., “Yüksek Performanslı Çimento Esaslı Kompozitlerin Tasarımı, Mekanik Davranışı ve Uygulama Alanları”, 7. *Ulusal Beton Kongresi*, 177-199, (28-30 Kasım 2007).
- [19] Hijorth, L., “Development and Application of High-Density Cement-Based Materials”, *Phil. Trans. Roy. Soc.*, London, A310, pp.167-173, (1983).
- [20] Yoo, D. Y., Yoon, Y. S., “Structural performance of ultra-high-performance concrete beams with different steel fibers”, *Engineering Structures*, 102, 409-423, (2015).
- [21] Yoo, D. Y., Banthia, N., Yoon, Y. S., “Flexural behavior of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete beams reinforced with GFRP and steel rebars”, *Engineering Structures*, 111, 246-262, (2016).
- [22] Türker, K., Birol, T., Yavaş, A., Hasgül, U., “Ultra Yüksek Performanslı Lifli Beton İçeren Kirişlerde Etkin Çelik Lif Tipi İncelemesi”, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 16, 776-785, (2016).
- [23] Hasgül, U., Türker, K., Birol, T., Yavaş A., “Flexural behavior of ultra-high-performance fiber reinforced concrete beams with low and high reinforcement ratios”, *Structural Concrete*, 19 (6), 1577-1590, (2018).
- [24] Türker, K., Yavaş, A., Hasgül, U. Birol, T., Yazıcı, H., “Ultra Yüksek Performanslı Lifli Beton İçeren Kirişlerin Eğilme Davranışı”, *Teknik Dergi*, 30 (1), 8777-8801, (2019).

- [25] Kodur, V., Solhmirzaei, R., Agrawal, A., Aziz, E. M., Soroushian, P., “Analysis of flexural and shear resistance of ultra high performance fiber reinforced concrete beams without stirrups”, *Engineering Structures*, 174, 873-884, (2018).
- [26] Yoo, D. Y., Banthia, N., Yoon, Y. S., “Experimental and numerical study on flexural behavior of UHPFRC beams with low reinforcement ratios”, *Canadian Journal of Civil Engineering*, 44 (1), 18-28, (2017).
- [27] Chen, S., Zhang, R., Jia, L. J., Wang, J. Y., “Flexural behaviour of rebar-reinforced ultra-high-performance concrete beams”, *Magazine of Concrete Research*, 70 (19), 997-1015, (2018).
- [28] Voo, Y. L., Poon, W. K., Foster S. J., “Shear Strength of Steel Fiber-Reinforced UltrahighPerformance Concrete Beams without Stirrups”, *Journal of Structural Engineering*, 136, 1393-1400, (2010).
- [29] Yang, I. H., Joh, C., Kim. B. S., “Shear behaviour of ultra-highperformance fibre-reinforced concrete beams without stirrups”, *Magazine of Concrete Research*, 64 (11), 979-993, (2012).
- [30] Baby, F., Marchand, P., Toutlemonde, F., “Shear Behavior of Ultrahigh Performance Fiber-Reinforced Concrete Beams. I: Experimental Investigation”, *Journal of Structural Engineering*, 140 (5), 04013111 1-10, (2014).
- [31] Zagon, R., Matthys, S., Kiss, Z., “Shear behaviour of SFR-UHPC I-shaped beams”, *Construction and Building Materials*, 124, 258-268, (2016).
- [32] Lim, Y. W., Hong, S. G., “Shear tests for UHPFRC Beams with Shear Reinforcement”, *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 10 (2), 177-188, (2016).

- [33] Mészöly, T., Randl, N., “Shear behavior of fiber-reinforced ultra-high performance concrete beams”, *Engineering Structures*, 168, 119-127, (2018).
- [34] Yavaş A., Hasgül, U., Türker, K., Birol, T., “Effective fiber type investigation on the shear behavior of ultrahigh-performance fiber-reinforced concrete beams”, *Advances in Structural Engineering*, doi.org/10.1177/1369433218820788, (2019).
- [35] Dancygier, A. N., Berkover, E., “Cracking localization and reduced ductility in fiber-reinforced concrete beams with low reinforcement ratios”, *Engineering Structures*, 111, 411-424, (2016).
- [36] Deluce, J. R., Vecchio, F. J., “Cracking Behavior of Steel Fiber-Reinforced Concrete Members Containing Conventional Reinforcement”, *ACI Structural Journal*, 110 (3), 481-490, (2013).
- [37] Yuguang, Y., Walraven, J. C., Uijl, J. A., “Combined effect of fibers and steel rebars in high performance concrete”, *Heron*, 54 (2/3), 205-224, (2009).
- [38] Dancygier, A. N., Savir, Z., “Flexural behavior of HSFRC with low reinforcement ratios”, *Engineering Structures*, 28, 1503-1512, (2006).
- [39] Alaei, F. J., Karihaloo, B. L., “Retrofitting of Reinforced Concrete Beams with CARDIFRC”, *Journal of Composites for Construction*, 7 (3), 174-186, (2003).
- [40] Noshiravani, T., Bruhwiler, E., “Experimental Investigation on Reinforced Ultra-High-Performance Fiber-Reinforced Concrete Composite Beams Subjected to Combined Bending and Shear”, *ACI Structural Journal*, 110 (2), 251-262, (2013).

- [41] Hussein, L., Amleh, L., “Structural behavior of ultra-high performance fiber reinforced concrete-normal strength concrete or high strength concrete composite members”, *Construction and Building Materials*, 93, 1105-1116, (2015).
- [42] Safdar, M., Matsumoto, T., Kakuma, K., “Flexural behavior of reinforced concrete beams repaired with ultra-high performance fiber reinforced concrete (UHPFRC)”, *Composite Structures*, 157, 448–460, (2016).
- [43] Al-Osta, M. A., Isa, M. N., “Baluch M.H., Rahman, M.K., Flexural behavior of reinforced concrete beams strengthened with ultra-high performance fiber reinforced concrete”, *Construction and Building Materials*, 134, 279–296, (2017).
- [44] Tanarlan, H. M., Alver, N., Jahangiri, R., Yalçınkaya, Ç., Yazıcı, H., “Flexural strengthening of RC beams using UHPFRC laminates: Bonding techniques and rebar addition”, *Construction and Building Materials*, 155, 45-55, (2017).
- [45] Tanarlan, H. M., “Flexural strengthening of RC beams with prefabricated ultra high performance fibre reinforced concrete laminates”, *Engineering Structures*, 151, 337-348, (2017).
- [46] Spyridon, A., Paschalis, S. A., Lampropoulos, A. P., Tsioulou, O., “Experimental and numerical study of the performance of ultra high performance fiber reinforced concrete for the flexural strengthening of full scale reinforced concrete members”, *Construction and Building Materials*, 186, 351-366, (2018).
- [47] TS500, Türk Standartları Enstitüsü. *Betonarme yapıların tasarım ve yapım kuralları*, Bakanlıklar, Ankara, (2000).
- [48] Graybeal, B. A., “Flexural behavior of an ultra high-performance concrete I-girder”, *Journal of Bridge Engineering*, 13 (6), 602-610, (2008).

- [49] Barnett SJ, Millard SG, Soutsos MN, Schleyer G, Tyas A, Le TT., Ultra high performance fibre reinforced concrete for explosion resistant structures. In: *International conference entitled concrete platform*, Belfast, p. 565–75, (2007).
- [50] Richard, P., Cheyrezy, M., “Composition of reactive powder concretes”, *Cement and Concrete Research*, 25 (7), 1501-1511, (1995).
- [51] Park, R., Evaluation of ductility of structures and structural assemblages from laboratory testing, *Bulletin of the New Zealand National Society for the Earthquake Engineering*, 22 (3), 155-166, (1989).
- [52] Dancygier, A.N., Berkover, E., Cracking localization and reduced ductility in fiber-reinforced concrete beams with low reinforcement ratios *Engineering Structures 111*, 411–424, (2016).
- [53] Park, R., Ruitong, D., Ductility of doubly reinforced concrete beam sections, *ACI Structural Journal*, 85 (2), 217-225, (1988).
- [54] ACI (American Concrete Institute) Committee 318., *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-14) and Commentary (ACI 318R-14)*. Farmington Hills, (2014).