

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



**ULTRA YÜKSEK PERFORMANSLI LİFLİ BETON (UYPLB)  
İÇEREN İ ENKESİTLİ KİRİŞLERİN EĞİLME DAVRANIŞININ  
DENEYSEL VE NÜMERİK İNCELENMESİ**

**CENGİZ GÜLTEKİN**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Jüri Üyeleri : Dr. Öğr. Üyesi Kaan TÜRKER (Tez Danışmanı)**  
**Prof. Dr. Alper İLKİ**  
**Dr. Öğr. Üyesi Altuğ YAVAŞ**

**BALIKESİR, OCAK - 2020**

## KABUL VE ONAY SAYFASI

**Cengiz GÜLTEKİN** tarafından hazırlanan **“ULTRA YÜKSEK PERFORMANSLI LİFLİ BETON (UYPLB) İÇEREN İ ENKESİTLİ KİRİŞLERİN EĞİLME DAVRANIŞININ DENEYSEL VE NÜMERİK İNCELENMESİ”** adlı tez çalışmasının savunma sınavı 24 Ocak 2020 tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen jüri tarafından oy birliği ile Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

**Danışman**

Dr. Öğr. Üyesi Kaan TÜRKER  
Balıkesir Üniversitesi

**Üye**

Prof. Dr. Alper İLKİ  
İstanbul Teknik Üniversitesi

**Üye**

Dr. Öğr. Üyesi Altuğ YAVAŞ  
Balıkesir Üniversitesi

İmza



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

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Prof. Dr. Necati ÖZDEMİR



## ETİK BEYAN

Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak tarafımda hazırlanan “**Ultra Yüksek Performanslı Lifli Beton (UYPLB) İçeren I Enkesitli Kirişlerin Eğilme Davranışının Deneysel ve Nümerik İncelenmesi**” başlıklı tezde;

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

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

Cengiz GÜLTEKİN

**Bu tez çalışması TÜBİTAK tarafından 116M517 nolu proje ile desteklenmiştir.**



## ÖZET

**ULTRA YÜKSEK PERFORMANSLI LİFLİ BETON (UYPLB) İÇEREN I  
ENKESİTLİ KİRİŞLERİN EĞİLME DAVRANIŞININ DENEYSEL VE NÜMERİK  
İNCELENMESİ  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
CENGİZ GÜLTEKİN  
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
(TEZ DANIŞMANI: DR. ÖĞR. ÜYESİ KAAAN TÜRKER)  
BALIKESİR, OCAK - 2020**

Çalışmada I enkesitli betonarme kirişlerde Ultra Yüksek Performanslı Lifli Beton (UYPLB) kullanımının eğilme davranışına etkileri deneysel olarak incelenerek avantaj ve dezavantajları değerlendirilmiştir. Deneysel sonuçlar referans alınarak, UYPLB kirişlerin eğilme kapasitelerinin belirlenmesine yönelik mevcut basitleştirilmiş nümerik yaklaşımlar ve AFGC (UYPLB-Öneriler) tasarım prosedürü incelenmiş ve geçerlilikleri değerlendirilmiştir. Deneysel programında, UYPLB ve Geleneksel betonun kullanıldığı toplam 32 kiriş üzerinde çekme donatısı oranı (0.009-0.022 arasında) ve hacimsel lif oranı (%1.0-%2.5 arasında) bakımından parametrik incelemeler yapılmıştır. Kirişlere dört noktalı eğilme testi uygulanmış ve yük-deplasman davranışları, kırılma şekilleri, moment taşıma kapasiteleri, deplasman/eğrilik süneklikleri, çatlak dağılımları/genişlikleri, eğilme rijitlikleri ve beton/donatı şekildeğiştirme davranışları belirlenmiştir.

Sonuç olarak, I enkesitli kirişlerde UYPLB kullanımı, çalışmada incelenen donatı oranları için eğilme ve kesme kapasitesi, rijitlik ve çatlak oluşumunu sınırlama bakımından normal ve ultra yüksek dayanımlı betona göre önemli avantajlar sağlamıştır. UYPLB'nin bu parametreler üzerindeki etkisi kirişte kullanılan donatı oranına ve lif oranına göre farklılık göstermiştir. UYPLB kullanımı kiriş süneklikleri ve maksimum yük sonrası çatlak davranışı bakımından ise özellikle düşük donatı oranlarında büyük bir dezavantaja neden olmuştur. UYPLB'nin bu olumsuz etkisi kirişte en yüksek donatı oranına ulaşıncaya süneklikte avantaja dönüşmüştür. UYPLB kirişlerin eğilme altında taşıma gücü limit durumunda en yüksek donatı oranı dışında UYPLB'nin çekme davranışı belirleyici olmuştur. Bu nedenle eğilme kapasitelerinin hesabında limit durum olarak UYPLB'nin çekme karakteristiklerini esas alan yaklaşımlar iyi sonuç verirken, geleneksel betonarmedeki gibi basınç bölgesindeki betonun şekildeğiştirmesini esas alan yaklaşımlar oldukça tutarsız sonuçlar vermiştir.

**ANAHTAR KELİMELELER:** Ultra Yüksek Performanslı Lifli Beton, betonarme kiriş, I tipi enkesit, eğilme davranışı, deneysel inceleme, nümerik inceleme.

## **ABSTRACT**

### **EXPERIMENTAL AND NUMERICAL INVESTIGATION OF FLEXURAL BEHAVIOR OF I BEAMS WITH ULTRA-HIGH PERFORMANCE FIBER REINFORCED CONCRETE (UHPFRC)**

**MSC THESIS**

**CENGİZ GULTEKİN**

**BALIKESİR UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE**

**CIVIL ENGINEERING**

**(SUPERVISOR: ASSIST. PROF. DR. KAAN TURKER )**

**BALIKESİR, JANUARY - 2020**

In the study, pros and cons of using Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPFRC) for I-section RC beams was experimentally investigated. Based on the experimental results, the existing simplified approaches and AFGC (UHPFRC-Recommendations) design procedure to predict the flexural capacity of UHPFRC beams were examined and their validity was evaluated. In the experimental program, a parametric study was carried out on 32 beams consisting of UHPFRC, Ultra-High Strength Concrete (UHSC) and Normal Strength Concrete (NSC) according to the tensile reinforcement ratio (ranging from 0.009 to 0.022) and the volumetric fiber ratio (ranging from 1.0 % to 2.5). The beams were tested under four-point loading and load deflection behaviors, failure modes, deflection/curvature ductilities, moment capacities, flexural stiffness, maximum crack widths, cracking patterns and concrete/reinforcement strain response were investigated on the test beams.

As a result, the use of UHPFRC in I-section beams has provided significant advantages in terms of the beam flexural and shear capacity, the stiffness and the limiting crack formation in comparison to the UHSC and NSC beams for all the reinforcement ratios considered in the study. The effect of UHPFRC on these parameters varied according to the ratio of reinforcement and fiber used in the beam. The use of UHPFRC has caused a major disadvantage for the beam ductility and the cracking behavior after peak-load, especially at the low reinforcement ratios. This negative effect of UHPFRC turned into an advantage when the highest reinforcement ratio in the beam was reached. The ultimate limit state of UHPFRC beams under flexure was determined by the tensile behavior of UHPFRC, except for the highest reinforcement ratio. Therefore, while the results of numerical approaches based on the tensile characteristics of UHPFRC were very consistent with the test results, the approaches based on the concrete strain as in the conventional RC design yielded very inconsistent results.

**KEYWORDS:** Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete, reinforced concrete beam, I section, flexural behaviour, experimental investigation, numerical investigation.

# İÇİNDEKİLER

## Sayfa

ÖZET.....	i
ABSTRACT .....	ii
İÇİNDEKİLER .....	iii
ŞEKİL LİSTESİ.....	v
TABLO LİSTESİ.....	ix
SEMBOL LİSTESİ.....	xi
ÖNSÖZ.....	xv
<b>1. GİRİŞ .....</b>	<b>1</b>
1.1 Literatür Değerlendirmesi.....	12
1.2 Çalışmanın Amacı ve Kapsamı .....	26
<b>2. KİRİŞLERİN EĞİLME DAVRANIŞI ÜZERİNE DENEYSEL ÇALIŞMA .....</b>	<b>27</b>
2.1 Betonarme Test Kirişlerinin Özellikleri .....	27
2.2 UYPLB'nin Özellikleri.....	30
2.3 Betonarme Test Kirişlerinin Hazırlanması .....	31
2.4 Test Düzenegi ve Yapılan Ölçümler .....	35
2.5 Malzeme Testleri ve Sonuçları.....	38
2.6 Kirişlerin Test Sonuçları ve Değerlendirilmesi.....	41
2.6.1 Yük-Düşey Deplasman Davranışları .....	44
2.6.2 Eğrilik Süneklilikleri ve Etkin Eğilme Rijitlikleri.....	52
2.6.3 Çatlak Davranışları .....	57
2.6.4 Beton ve Donatı Çeliğinin Şekildeğiştirme Davranışları.....	61
<b>3. UYPLB KİRİŞLERİN EĞİLME KAPASİTELERİNİN BELİRLENMESİNE YÖNELİK NÜMERİK ÇALIŞMA.....</b>	<b>64</b>
3.1 AFGC 2013'e Göre Basit Eğilmeye Maruz Elemanların Tasarımı .....	65
3.1.1 UYPLB'nin Basınç Tasarım Modelinin Belirlenmesi .....	65
3.1.2 UYPLB'nin Çekme Tasarım Modelinin Belirlenmesi .....	67
3.1.2.1 Tip3 Beton Sınıfı İçin Çekme Tasarım Modelinin Belirlenmesi.....	72
3.1.2.2 Moment Deplasman İlişkisinden Geri Analiz ile $M-\varphi$ İlişkisinin Belirlenmesi (GAY1) .....	75
3.1.2.3 $M-\varphi$ İlişkisinden Geri Analiz ile Betonun $\sigma_{ct} - \varepsilon_{ct}$ İlişkisinin Belirlenmesi (GAY2) .....	81
3.1.2.4 Çekme Tasarım Modeline Ait Açıklamalı Nümerik Örnek .....	87
3.1.3 Eğilme Kapasitesi İçin Limit Durumlar ve Kapasite Hesabı İçin Açıklamalı Nümerik Örnek.....	101
3.2 Test Kirişlerinin AFGC'ye Göre Eğilme Kapasitelerinin Belirlenmesi.....	107
3.3 Basitleştirilmiş Metodlarla Eğilme Kapasitelerinin Belirlenmesi ve Değerlendirilmesi .....	113
3.3.1 Khalil ve Tayfur (2013) Yaklaşımı (KT).....	113
3.3.2 Al-Hassani ve diğ. (2015) Yaklaşımı (AH) .....	116
3.3.3 Chen ve diğ. (2018) Yaklaşımı (CD).....	119
3.3.4 Liu ve diğ. (2018) Yaklaşımı (LD).....	121
3.3.5 Turker ve diğ. (2019b) Yaklaşımı (TD).....	123
<b>4. DENEYSEL VE NÜMERİK SONUÇLARIN KARŞILAŞTIRILMASI.....</b>	<b>125</b>

<b>5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....</b>	<b>134</b>
<b>6. KAYNAKLAR.....</b>	<b>139</b>
<b>EKLER.....</b>	<b>147</b>
EK A: Deney Sonuçları.....	147
EK B: Yazılım Kodları.....	165
<b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>	<b>176</b>

## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 1.1: UYPLB'e ait su/bağlayıcı oranının diğer betonlarla karşılaştırılması.....	2
Şekil 1.2: UYPLB'de kullanılan çelik lif tipleri .....	3
Şekil 1.3: UYPLB'nin basınç altındaki gerilme-birim kısalma ilişkisi.....	4
Şekil 1.4: UYPLB ve geleneksel lifli betonun eksenel çekme etkisi altındaki gerilme-birim uzama davranışlarının karşılaştırılması. ....	5
Şekil 1.5: Farklı lif oranlarına sahip UYPLB'nin çekme altındaki gerilme-birim uzama ilişkileri. ....	5
Şekil 1.6: UYPLB ve geleneksel beton davranışlarının karşılaştırılması .....	6
Şekil 1.7: Test düzeneği ve farklı hacimsel lif oranları için yük-düşey deplasman davranışları. ....	6
Şekil 1.8: Japonya'da UYPLB ile yapılan ilk köprü. ....	7
Şekil 1.9: UYPLB'nun prefabrik birleşim noktalarında uygulanması. ....	7
Şekil 1.10: Dünyada UYPLB ile yapılan ilk köprü.....	8
Şekil 1.11: Dünyada UYPLB ile yapılan en uzun açıklığa sahip köprü.....	8
Şekil 1.12: İnce kesitli kabuk örneği ve balkon elemanı uygulamaları.....	9
Şekil 1.13: UYPLB'nin onarım ve takviye elemanı olarak kullanımı. ....	9
Şekil 1.14: Duş kabini ve çiçek saksısı üretiminde UYPLB kullanımı.....	10
Şekil 1.15: Türkiye'de üretilen yağmur suyu ızgaraları ve rögar kapakları .....	10
Şekil 2.1: BAUN-MF Yapı Mekaniği Laboratuvarı.....	27
Şekil 2.2: Enine ve basınç donatısı bulunmayan test kirişlerinin donatı detayları.....	28
Şekil 2.3: Enine ve basınç donatılı referans kirişlerinin donatı detayları. ....	28
Şekil 2.4: Salt eğilme bölgesinde enine ve basınç donatısı bulunmayan referans kirişlerinin donatı detayı. ....	28
Şekil 2.5: Test kirişlerine ait kodların açıklanması. ....	29
Şekil 2.6: Test kirişlerinde kullanılan çekme, basınç ve enine donatıları, donatının kalıp içindeki yerleşimi.....	30
Şekil 2.7: UYPLB üretiminde kullanılan bileşenler.....	31
Şekil 2.8: UYPLB'nin hazırlanması aşamaları. ....	32
Şekil 2.9: UYPLB'nin test kirişlerine dökümü. ....	32
Şekil 2.10: Beton basınç ve eğilme testleri için hazırlanan numuneler.....	33
Şekil 2.11: Geleneksel beton içeren test kirişinin hazırlanması.....	33
Şekil 2.12: Döküm sonrası plastik örtü ile sarılan test kirişi. ....	34
Şekil 2.13: Test kirişlerinin ve numunelerin kür kabinindeki görüntüsü. ....	34
Şekil 2.14: Betonun yayılma süresinin ( $T_{500}$ ) ve çapının belirlenmesi. ....	35
Şekil 2.15: Dört noktalı eğilme testi düzeneği. ....	36
Şekil 2.16: Test kirişi ve eğrilik ölçüm düzeneği.....	36
Şekil 2.17: Donatı ve beton şekildeğiştirme ölçerlerinin konumları.....	37
Şekil 2.18: Veri toplama sistemi. ....	37
Şekil 2.19: Beton testi sonucu numunelerin kırılma şekilleri. ....	38
Şekil 2.20: Eğilme testi sonucu prizma numunelerinin kırılma şekilleri.....	39
Şekil 2.21: Prizma eğilme testleri sonucu elde edilen yük-deplasman ilişkileri.....	39
Şekil 2.22: Kiriş donatılarının çekme testi ile mekanik özelliklerinin belirlenmesi. ....	40
Şekil 2.23: Deneysel çalışma kapsamında eğilme testleri gerçekleştirilen kirişler .....	41
Şekil 2.24: Kiriş kırılma şekilleri .....	43
Şekil 2.25: Kiriş lokalleşme şekilleri.....	44

Şekil 2.26: Test kirişlerinin $P-\delta$ ilişkileri.....	45
Şekil 2.27: Lif oranının $P-\delta$ davranışı üzerindeki pekleşme ve yumuşama etkisi. ....	45
Şekil 2.28: Test kirişlerine ait $P-\delta$ ilişkilerinin donatı oranına göre karşılaştırılması. ....	46
Şekil 2.29: $P-\delta$ ilişkisinin idealleştirilmesi ve ilgili karakteristik değerler.....	47
Şekil 2.30: Deplasman sünekliklerinin GB'li kirişlere göre değişimleri.....	49
Şekil 2.31: UYPLB deplasman sünekliklerinin UYDB kirişlere göre değişimi.....	49
Şekil 2.32: Kiriş yük taşıma kapasitelerinin karşılaştırılması.....	50
Şekil 2.33: UYPLB kiriş yük kapasitelerinin UYDB kiriş kapasitelerine oranla değişimi. 51	
Şekil 2.34: Yük kapasitelerinin ve deplasman sünekliklerinin donatı oranı ile değişimi....	51
Şekil 2.35: Test kirişlerinin $M-\phi$ ilişkileri. ....	52
Şekil 2.36: $M-\phi$ ilişkisinin idealleştirilmesi ve ilgili karakteristik değerler. ....	53
Şekil 2.37: Kiriş eğrilik sünekliklerinin GB'li kiriş sünekliklerine oranla değişimleri. ....	55
Şekil 2.38: UYPLB kiriş eğrilik sünekliklerinin UYDB kiriş sünekliklerine oranla değişimi.....	55
Şekil 2.39: Kiriş etkin eğilme rijitliklerinin GB kiriş rijitliklerine oranla değişimi.....	56
Şekil 2.40: UYPLB eğilme rijitliklerinin UYDB kirişlere göre değişimi. ....	56
Şekil 2.41: $P-\delta$ davranışı üzerinde çatlak ölçümü sunulan deplasman değerleri.....	57
Şekil 2.42: Kirişlerin çatlak dağılımları.....	58
Şekil 2.43: Kirişlerde ölçülen maksimum çatlak genişlikleri (L/500 için).....	58
Şekil 2.44: Kirişlerin çatlak dağılımları.....	59
Şekil 2.45: Kirişlerdeki maksimum çatlak genişlikleri (L/100 için).....	59
Şekil 2.46: Test kirişlerindeki maksimum kesme çatlak genişlikleri. ....	61
Şekil 2.47: Test kirişlerinde maksimum yüke karşılık gelen $\varepsilon_c$ ve $\varepsilon_s$ değerleri.....	62
Şekil 2.48: Test kirişlerinde maksimum (kırılma) deplasmana karşılık gelen $\varepsilon_c$ ve $\varepsilon_s$ değerleri.....	63
Şekil 3.1: UYPLB'nin aksenal basınç tasarım modeli. ....	65
Şekil 3.2: UYPLB'nin aksenal çekme altındaki karakteristik $\sigma_{ct} - \varepsilon_{ct}$ ilişkileri. ....	67
Şekil 3.3: UYPLB için önerilen çekme tasarım modelleri. ....	68
Şekil 3.4: Malzemesinin elastik bölgesinin belirlenmesi. ....	70
Şekil 3.5: 4 noktalı eğilme test düzeneği. ....	72
Şekil 3.6: Prizma testinden eleman $\sigma_{ct} - \varepsilon_{ct}$ ilişkisinin elde edilmesi. ....	73
Şekil 3.7: 6 adet prizma testinden ortalama ve karakteristik $P-\delta$ ilişkisinin elde edilmesi. 74	
Şekil 3.8: Çekme modelinin belirlenmesi.....	75
Şekil 3.9: Dört noktalı yüklenen basit kirişte moment, eğrilik, dönme ve deplasman fonksiyonları ve aralarındaki bağıntılar. ....	76
Şekil 3.10: İlk çatlama ve maksimum yük arasındaki eğrilik değişimi.....	76
Şekil 3.11: İlk çatlama ve maksimum yük arasındaki eğrilik değişimi.....	77
Şekil 3.12: GAY1 yönteminin akış diyagramı.....	79
Şekil 3.13: Kesite ait $M-\phi$ ilişkisinden geri analizle $\sigma_{ct}-\varepsilon_{ct}$ ilişkisinin elde edilmesi.....	81
Şekil 3.14: n. adıma ait şekildeğiştirme, gerilme ve kuvvet dağılımları.....	82
Şekil 3.15: GAY2 yönteminin akış diyagramı.....	85
Şekil 3.16: %2 lif oranına sahip UYPLB için prizma eğilme testi ve elde edilen $P-\delta$ ilişkileri .....	87
Şekil 3.17: 1. noktaya ait eğriliğin belirlenmesi.....	88
Şekil 3.18: $M_1$ momentine ulaşan numunede moment, eğrilik, dönme ve deplasman dağılımları. ....	89
Şekil 3.19: 2. noktaya ait eğriliğin belirlenmesi.....	90
Şekil 3.20: $M_2$ momentine ulaşan numunede moment, eğrilik, dönme ve deplasman dağılımları. ....	91
Şekil 3.21: $M-\phi$ ilişkisinin 1. noktasındaki gerilme ve birim uzama durumu.....	93

Şekil 3.22: $M-\varphi$ ilişkisinin 2. noktasındaki gerilme ve birim uzama durumu.....	95
Şekil 3.23: $M-\varphi$ ilişkisinin 3,4 ve 5. noktalarındaki gerilme ve birim uzama durumu.....	97
Şekil 3.24: Ortalama ve karakteristik $P-\delta$ ilişkilerinin elde edilmesi.....	98
Şekil 3.25: %2 lifli UYPLB için geri analizlerden elde edilen $\sigma_{ct} - \varepsilon_{ct}$ ilişkileri.....	99
Şekil 3.26: Karakteristik çekme modelinde elastik ve limit çekme dayanımlarının belirlenmesi. ....	99
Şekil 3.27: %2.0 lifli UYPLB için karakteristik ve tasarım çekme modeli.....	100
Şekil 3.28: %2.0 lifli UYPLB’de ortalama dayanım için çekme hesap modeli.....	100
Şekil 3.29: Taşıma gücü limit durumu için kullanılan gerilme-şekildeştirme modelleri. .	101
Şekil 3.30: Tip1 ve Tip2 betonlu elemanlarda taşıma gücü limit durumları. ....	102
Şekil 3.31: Tip3 betonlu elemanlarda taşıma gücü limit durumları. ....	103
Şekil 3.32: %2 lif oranına sahip UYPLB için çekme hesap modelleri.....	104
Şekil 3.33: %2 lif oranı sahip UYPLB için basınç hesap modelleri. ....	105
Şekil 3.34: B10-2.0 kirişinin donatısına ait çekme hesap modelleri. ....	105
Şekil 3.35: Dört farklı lif oranı için ortalama ve karakteristik $P-\delta$ ilişkileri.....	107
Şekil 3.36: Dört farklı lif oranı için UYPLB $\sigma_{ct} - \varepsilon_{ct}$ ilişkileri. ....	108
Şekil 3.37: Dört farklı lif oranı için UYPLB çekme modeli (Tasarım dayanımı için).....	109
Şekil 3.38: Dört farklı lif oranı için UYPLB çekme modeli (Ortalama dayanımı için)....	109
Şekil 3.39: KT’de esas alınan nümerik model karakteristikleri. ....	114
Şekil 3.40: AH’de önerilen nümerik model karakteristikleri.....	116
Şekil 3.42: CD’de esas alınan nümerik model karakteristikleri.....	119
Şekil 3.43: LD’de esas alınan nümerik model karakteristikleri. ....	121
Şekil 3.44: TD’de esas alınan nümerik model karakteristikleri. ....	123
Şekil 4.1: Test kirişlerine ait deneysel ve nümerik eğilme kapasitelerinin karşılaştırılması.....	126
Şekil 4.2: Kesit üst lifindeki beton kısılması ( $\varepsilon_c$ ) için nümerik ve deneysel sonuçların karşılaştırılması.....	127
Şekil 4.3: Çekme donatısı uzaması ( $\varepsilon_s$ ) için nümerik ve deneysel sonuçların karşılaştırılması.....	129
Şekil 4.4: Kesit alt lifindeki beton kısılması ( $\varepsilon_t$ ) için nümerik ve deneysel sonuçların karşılaştırılması.....	130
Şekil 4.5: Beton çekme dayanımının eğilme kapasitesine katkısının karşılaştırılması. ....	132
Şekil A.1: G1 Grubu kirişlerine ait kırılma şekilleri. ....	147
Şekil A.2: G2 Grubu kirişlerine ait kırılma şekilleri. ....	148
Şekil A.3: G3 Grubu kirişlerine ait kırılma şekilleri. ....	149
Şekil A.4: G4 Grubu kirişlerine ait kırılma şekilleri. ....	150
Şekil A.5: G1 Grubu kirişlerin L/500 deplasmanındaki çatlak dağılımları. ....	151
Şekil A.6: G2 Grubu kirişlerin L/500 deplasmanındaki çatlak dağılımları. ....	152
Şekil A.7: G3 Grubu kirişlerin L/500 deplasmanındaki çatlak dağılımları. ....	153
Şekil A.8: G4 Grubu kirişlerin L/500 deplasmanındaki çatlak dağılımları. ....	154
Şekil A.9: G1 Grubu kirişlerin L/100 deplasmanındaki çatlak dağılımları. ....	155
Şekil A.10: G2 Grubu kirişlerin L/100 deplasmanındaki çatlak dağılımları. ....	156
Şekil A.11: G3 Grubu kirişlerin L/100 deplasmanındaki çatlak dağılımları. ....	157
Şekil A.12: G4 Grubu kirişlerin L/100 deplasmanındaki çatlak dağılımları. ....	158
Şekil A.13: Donatı şekil değiştirme değerleri. ....	159
Şekil A.14: Beton şekil değiştirme değerleri. ....	160
Şekil A.15: G1 Grubu kirişlerin maksimum yüke ve maksimum deplasmana karşılık gelen kesit şekil değiştirme değerleri. ....	161

<b>Şekil A.16:</b> G2 Grubu kirişlerin maksimum yüke ve maksimum deplasmana karşılık gelen kesit şekildeğiştirme değerleri. ....	162
<b>Şekil A.17:</b> G3 Grubu kirişlerin maksimum yüke ve maksimum deplasmana karşılık gelen kesit şekildeğiştirme değerleri. ....	163
<b>Şekil A.18:</b> G4 Grubu kirişlerin maksimum yüke ve maksimum deplasmana karşılık gelen kesit şekildeğiştirme değerleri. ....	164
<b>Şekil B.1:</b> Geri Analiz Programı arayüz girdi bölümü. ....	165
<b>Şekil B.2:</b> Geri Analiz Programı arayüz sonuç bölümü. ....	166
<b>Şekil B.3:</b> Filtreleme programı arayüzü. ....	173



## TABLO LİSTESİ

### Sayfa

<b>Tablo 1.1:</b> UYPLB'nin kronolojik gelişim süreci .....	2
<b>Tablo 1.2:</b> UYPLB'de kullanılan bileşen miktarları.....	3
<b>Tablo 1.3:</b> UYPLB üretimi yapan firmaların ürün mekanik özellikleri.....	7
<b>Tablo 1.4:</b> Dancygier ve Savir (2006)'da incelenen kiriş ve UYPLB özellikleri.....	13
<b>Tablo 1.5:</b> Yang ve diğ. (2010)'da incelenen kiriş ve UYPLB özellikleri.....	14
<b>Tablo 1.6:</b> Khalil ve Tayfur (2013)'de incelenen kiriş ve UYPLB özellikleri.....	15
<b>Tablo 1.7:</b> Yoo ve diğ. (2015)'de incelenen kiriş ve UYPLB özellikleri. ....	16
<b>Tablo 1.8:</b> Yoo ve diğ. (2017)'de incelenen kiriş ve UYPLB özellikleri. ....	17
<b>Tablo 1.9:</b> Kahanji ve diğ. (2017)'de incelenen kiriş ve UYPLB özellikleri.....	18
<b>Tablo 1.10:</b> Qi ve diğ. (2018)'de incelenen kiriş ve UYPLB özellikleri. ....	19
<b>Tablo 1.11:</b> Chen ve diğ. (2018)'de incelenen kiriş ve UYPLB özellikleri.....	20
<b>Tablo 1.12:</b> Hasgul ve diğ. (2018)'de incelenen kiriş ve UYPLB özellikleri. ....	21
<b>Tablo 1.13:</b> Liu ve diğ. (2018)'de incelenen kiriş ve UYPLB özellikleri.....	22
<b>Tablo 1.14:</b> Gümüş ve Arslan (2019)'da incelenen kiriş ve UYPLB özellikleri.....	23
<b>Tablo 1.15:</b> Turker ve diğ. (2019a)'da incelenen kiriş ve UYPLB özellikleri. ....	24
<b>Tablo 1.16:</b> Turker ve diğ. (2019b)'de incelenen kiriş ve UYPLB özellikleri.....	25
<b>Tablo 2.1:</b> Çalışma kapsamında incelenecek kirişlerin kodları, lif içerikleri ve donatıları.	29
<b>Tablo 2.2:</b> UYPLB'yi oluşturan bileşen miktarları (kg/m <sup>3</sup> ).....	31
<b>Tablo 2.3:</b> Geleneksel beton için kullanılan bileşenler (kg/m <sup>3</sup> ). ....	33
<b>Tablo 2.4:</b> Lifsiz ve lifli karışımlar için kıvam testi sonuçları. ....	35
<b>Tablo 2.5:</b> Test kirişlerinin beton basınç dayanımları (MPa).....	38
<b>Tablo 2.6:</b> Test kirişlerine ait donatıların akma ve kopma dayanımları (MPa).....	40
<b>Tablo 2.7:</b> Deplasman süneklikleri ve ilgili karakteristik değerler.....	48
<b>Tablo 2.8:</b> Kirişlerin $M-\phi$ ilişkisinden elde edilen karakteristik değerler. ....	54
<b>Tablo 3.1:</b> Kırılan numune sayısına bağlı $ak$ katsayıları tablosu.....	66
<b>Tablo 3.2:</b> UYPLB çekme tasarım modeli için gerekli eğilme testleri ve ölçümleri.....	69
<b>Tablo 3.3:</b> Çekme tasarım modelinin elastik sonrası bölgesi için eğilme testlerine uygulanacak geri analizler.....	71
<b>Tablo 3.4:</b> Seçilen prizma numunesine ait $P-\delta$ ilişkisi ve idealleştirmesi.....	88
<b>Tablo 3.5:</b> $P-\delta$ ilişkisinin 3. 4. ve 5. noktalarına karşılık gelen eğrilik, dönme ve deplasman dağılımları. ....	92
<b>Tablo 3.6:</b> Geri analiz ile elde edilen $M-\phi$ ilişkisi ve ilgili koordinatlar.....	93
<b>Tablo 3.7:</b> Prizma numunesinden geri analizler sonucunda elde edilen $\sigma_{ct} - \epsilon_{ct}$ ve ilgili koordinatlar. ....	97
<b>Tablo 3.8:</b> Ortalama ve karakteristik $P-\delta$ ilişkilerinin elde edilmesi. ....	98
<b>Tablo 3.9:</b> Eğilme kapasitesi belirlenen B10-2.0 kirişine ait özellikler.....	103
<b>Tablo 3.10:</b> B10-2.0 kirişinde AFGC'ye göre taşıma gücü limit durumu özellikleri (Tasarım dayanımı için).....	106
<b>Tablo 3.11:</b> B10-2.0 kirişinde AFGC'ye göre taşıma gücü limit durumu özellikleri (Ortalama dayanımı için). ....	106
<b>Tablo 3.12:</b> Lif oranına göre UYPLB çekme modeli parametreleri. ....	110
<b>Tablo 3.13:</b> Lif oranına göre UYPLB'nin ortalama ve karakteristik basınç dayanımları. ....	110
<b>Tablo 3.14:</b> Lif oranlarına göre UYPLB basınç modeli parametreleri. ....	111
<b>Tablo 3.15:</b> Kirişlerdeki donatılar için ortalama ve karakteristik akma dayanımları. ....	111
<b>Tablo 3.16:</b> Kirişlerdeki donatılar için çekme modeli parametreleri. ....	111

<b>Tablo 3.17:</b> Test kirişlerinin AFGC'ye göre nümerik hesap sonuçları (Tasarım dayanımı için).....	112
<b>Tablo 3.18:</b> Test kirişlerinin AFGC'ye göre nümerik hesap sonuçları (Ortalama dayanım için).....	112
<b>Tablo 3.19:</b> B10-2.0 kirişinde KT yaklaşımı için taşıma gücü limit durumu özellikleri..	115
<b>Tablo 3.20:</b> Test kirişlerinin KT yaklaşımına göre nümerik hesap sonuçları. ....	115
<b>Tablo 3.21:</b> B10-2.0 kirişinde AH yaklaşımı için taşıma gücü limit durumu özellikleri..	118
<b>Tablo 3.22:</b> Test kirişlerinin AH yaklaşımına göre nümerik hesap sonuçları.....	118
<b>Tablo 3.25:</b> B10-2.0 kirişinde CD yaklaşımı için taşıma gücü limit durumu özellikleri..	120
<b>Tablo 3.26:</b> Test kirişlerinin CD yaklaşımına göre nümerik hesap sonuçları. ....	120
<b>Tablo 3.27:</b> B10-2.0 kirişinde LD yaklaşımı için taşıma gücü limit durumu özellikleri..	122
<b>Tablo 3.28:</b> Test kirişlerinin LD yaklaşımına göre nümerik hesap sonuçları. ....	122
<b>Tablo 3.29:</b> B10-2.0 kirişinde TD yaklaşımı için taşıma gücü limit durumu özellikleri..	124
<b>Tablo 3.30:</b> Test kirişlerinin TD yaklaşımına göre nümerik hesap sonuçları. ....	124
<b>Tablo 4.1:</b> Moment kapasiteleri için nümerik ve deneysel sonuçlara ait bağıl hatalar. ....	126
<b>Tablo 4.2:</b> Kesit üst lifindeki beton kısalması ( $\epsilon_c$ ) için nümerik ve deneysel sonuçlara ait bağıl hatalar. ....	128
<b>Tablo 4.3:</b> Çekme donatısı uzaması ( $\epsilon_s$ ) için nümerik ve deneysel sonuçlara ait bağıl hatalar.....	129
<b>Tablo 4.4:</b> Kesit alt lifindeki beton uzaması ( $\epsilon_t$ ) için nümerik ve deneysel sonuçlara ait bağıl hatalar. ....	130
<b>Tablo 4.5:</b> Deneysel moment kapasitelerinin AFGC tasarım sonuçlarıyla karşılaştırılması. ....	133

## SEMBOL LİSTESİ

<b>a</b>	: Kare prizma numunesine ait en kesit boyutları
<b>a<sub>k</sub></b>	: Kesme açıklığı
<b>ak</b>	: Azaltma katsayısı
<b>A<sub>s</sub></b>	: Çekme donatısı alanı
<b>A<sub>s</sub>'</b>	: Basınç donatısı alanı
<b>b</b>	: Enkesit genişliği
<b>b<sub>1</sub></b>	: Enkesit tabla genişliği
<b>C<sub>c</sub></b>	: Bileşke beton basınç kuvveti
<b>c<sub>c</sub></b>	: Çekme donatısının merkezinden kesit üst lifine olan uzaklık
<b>c<sub>c</sub>'</b>	: Basınç donatısının merkezinden kesit üst lifine olan uzaklık
<b>c<sub>n</sub></b>	: Tarafsız eksen uzunluğu
<b>d</b>	: Faydalı yükseklik
<b>d<sub>f</sub></b>	: Lif çapı
<b>e</b>	: Eleman kalınlığı
<b>D<sub>maks</sub></b>	: Maksimum agrega çapı
<b>E<sub>c</sub></b>	: Beton elastisite modülü
<b>E<sub>cm</sub></b>	: Ortalama beton elastisite modülü
<b>E<sub>s</sub></b>	: Donatı çeliğinin elastisite modülü
<b>EI<sub>e</sub></b>	: Etkin eğilme rijitliği
<b>f<sub>cd</sub></b>	: Tasarım beton basınç dayanımı
<b>f<sub>ck</sub></b>	: Karakteristik beton basınç dayanımı
<b>f<sub>cm</sub></b>	: Ortalama beton basınç dayanımı
<b>f<sub>ct</sub></b>	: Beton çekme dayanımı
<b>f<sub>ct,el</sub></b>	: Beton elastik çekme dayanımı
<b>f<sub>ct,fl</sub></b>	: Eğilme çekme dayanımı
<b>f<sub>ctd</sub></b>	: Tasarım beton çekme dayanımı
<b>f<sub>ctd,el</sub></b>	: Tasarım beton elastik çekme dayanımı
<b>f<sub>ctk</sub></b>	: Karakteristik beton çekme dayanımı
<b>f<sub>ctk,el</sub></b>	: Karakteristik beton elastik çekme dayanımı
<b>f<sub>ctm</sub></b>	: Ortalama beton çekme dayanımı
<b>f<sub>ctm,el</sub></b>	: Ortalama beton elastik çekme dayanımı
<b>f<sub>cu</sub></b>	: Beton basınç dayanımı
<b>f<sub>y</sub></b>	: Donatı akma dayanımı
<b>f<sub>yd</sub></b>	: Tasarım donatı akma dayanımı
<b>f<sub>yk</sub></b>	: Karakteristik donatı akma dayanımı
<b>f<sub>ym</sub></b>	: Ortalama donatı akma dayanımı
<b>f<sub>yum</sub></b>	: Ortalama donatı kopma dayanımı
<b>h</b>	: Enkesit yüksekliği
<b>K</b>	: Lif yönelme katsayısı
<b>k</b>	: Çekme gerilmesi azaltma katsayısı
<b>L</b>	: Kiriş açıklığı

$l_f$	: Lif uzunluğu
$M$	: Eğilme momenti
$M_c$	: Basınç bölgesindeki kuvvetlerin oluşturduğu toplam moment
$M_{el}$	: Elastik sınır noktasındaki eğilme momenti
$M_i$	: i. kesitteki eğilme momenti
$M_{ort,n}$	: n. noktaya ait giriş ortasındaki eğilme momenti
$M_{maks}$	: Maksimum eğilme momenti (Eğilme kapasitesi)
$M_{maks}^{AFGC,ort}$	: AFGC ortalama dayanım için maksimum teorik eğilme momenti
$M_{maks}^{AFGC,t}$	: AFGC tasarım dayanımı için maksimum teorik eğilme momenti
$M_{maks}^d$	: Deneysel maksimum eğilme momenti
$M_{maks}^{teo}$	: Maksimum teorik eğilme momenti
$M_t$	: Çekme bölgesindeki kuvvetlerin momente katkısı
$M_{Tc}$	: Çekme bölgesindeki liflerin maksimum eğilme momentine katkısı
$M_u$	: Maksimum eğriliğe karşılık gelen eğilme momenti
$M_y$	: Akma eğilme momenti
$mt$	: Çekme bölgesindeki n. life kadar olan kuvvetlerin momente katkısı
$M(x)$	: Eğilme momenti fonksiyonu
$N_c$	: Basınç bölgesindeki toplam kuvvet
$N_t$	: Çekme bölgesindeki toplam kuvvet
$ns$	: Test yapılan numune sayısı
$nt$	: Çekme bölgesindeki n. life kadar olan toplam kuvvet
$P$	: Yük
$P_{el}$	: Elastik sınır noktasındaki yük
$p_i$	: i nolu numuneye ait yük
$p_k$	: Karakteristik yük
$p_m$	: Ortalama yük
$P_{maks}$	: Giriş yük taşıma kapasitesi
$P_n$	: n. noktadaki yük
$P_u$	: Maksimum deplasmana karşılık gelen yük
$P_y$	: Akma yükü
$ss$	: Standart sapma
$T_c$	: Bileşke beton çekme kuvveti
$t_f$	: Enkesit tabla kalınlığı
$topi_r$	: r. lifteki kuvvet
$topj_r$	: r. lifteki kuvvetin momente katkısı
$T_s$	: Bileşke donatı çekme kuvveti
$w$	: Çatlak genişliği
$x_i$	: i. kesitteki koordinat
$\alpha_{cc}$	: Sünme, büzülme vb. etkileri dikkate alan katsayı
$\beta_n$	: n. noktadaki tarafsız eksen oranı
$\beta_1$	: Basınç blok derinliğini belirten katsayı
$\gamma_c$	: Beton basınç güvenlik katsayısı
$\gamma_{cf}$	: Beton çekme güvenlik katsayısı

$\gamma_s$	: Donatı güvenlik katsayısı
$\delta$	: Deplasman
$\delta_{ort,n}$	: n. noktaya ait kiriş ortasındaki deneysel deplasman
$\delta_{el}$	: Elastik sınır noktasındaki deplasman
$\delta_{maks}$	: Maksimum yük noktasındaki deplasman
$\delta_i$	: i. kesite ait deplasman
$\delta_u$	: Maksimum deplasman
$\delta(x)$	: Deplasman fonksiyonu
$\delta_y$	: Akma deplasmanı
$\varepsilon$	: Birim şekildeğiştirme
$\varepsilon_c$	: Beton birim kısalması
$\varepsilon_{ct}$	: Beton birim uzaması
$\varepsilon_{cu}$	: Maksimum beton birim kısalması
$\varepsilon_{cud}$	: Tasarım beton birim kısalması sınır derđeri
$\varepsilon_{cum}$	: Ortalama beton birim kısalması sınır derđeri
$\varepsilon_{c0}$	: Beton birim kısalması elastik sınır derđeri
$\varepsilon_{c0d}$	: Tasarım beton birim kısalması elastik sınır derđeri
$\varepsilon_{c0m}$	: Ortalama beton birim kısalması elastik sınır derđeri
$\varepsilon_{ctk,el}$	: Karakteristik beton birim uzaması elastik sınır derđeri
$\varepsilon_{ctk,lim}$	: Karakteristik beton birim uzaması sınır derđeri
$\varepsilon_{ctm,el}$	: Ortalama beton birim uzaması elastik sınır derđeri
$\varepsilon_{ctm,lim}$	: Ortalama beton birim uzaması sınır derđeri
$\varepsilon_n$	: n. noktadaki birim uzama
$\varepsilon_s$	: Donatı birim uzaması
$\varepsilon_{su}$	: Donatı birim uzaması sınır derđeri
$\varepsilon_{sud}$	: Tasarım donatı sınır birim uzaması
$\varepsilon_{sum}$	: Ortalama donatı sınır birim uzaması
$\varepsilon_{ct,el}$	: Beton birim uzaması elastik sınır derđeri
$\varepsilon_{ct,lim}$	: Beton birim uzaması sınır derđeri
$\varepsilon_{yd}$	: Tasarım donatı akma birim uzaması
$\varepsilon_{ym}$	: Ortalama donatı akma birim uzaması
$\eta_b$	: Lif aderans katsayısı
$\eta_l$	: Lif narinlik katsayısı
$\eta_o$	: Lif yönelme katsayısı
$\theta$	: Dönme
$\theta_{ort}$	: Kesit ortasındaki dönme
$\theta_i$	: i. kesite ait dönme
$\theta(x)$	: Dönme fonksiyonu
$\lambda$	: Çekme gerilme blok derinliği katsayısı
$\mu_\Delta$	: Deplasman sünekliği
$\mu_\phi$	: Eğrilik sünekliği
$\rho_f$	: Lif hacmi
$\sigma$	: Gerilme
$\sigma_c$	: Beton basınç gerilmesi

$\sigma_n$	: n. noktadaki beton çekme gerilmesi
$\sigma_{n,1}$	: n. noktada kesit yatay kuvvetlerinin dengesini sağlayan gerilme
$\sigma_{n,2}$	: n. noktada kesit moment dengesini sağlayan gerilme
$\sigma_{ct}$	: Betonun çekme gerilmesi
$\tau_f$	: Çelik lif ile beton arasındaki aderans dayanımı
$\phi$	: Eğrilik
$\phi_{ort,n}$	: n. noktaya ait kiriş ortasındaki eğrilik
$\phi_{el}$	: Elastik sınır noktasındaki eğrilik
$\phi_{maks}$	: Maksimum moment noktasındaki eğrilik
$\phi_i$	: i. kesitteki eğrilik
$\phi_u$	: Maksimum eğrilik
$\phi(x)$	: Eğrilik fonksiyonu
$\phi_y$	: Akma eğriliği

## ÖNSÖZ

Yüksek lisans tezi olarak sunulan bu çalışmada, Ultra Yüksek Performanslı Lifli Beton ile üretilen I enkesitli betonarme kirişlerin eğilme davranışı deneysel ve nümerik olarak incelenmiştir.

Çalışmanın deneysel bölümü TÜBİTAK tarafından 116M517 nolu proje ile desteklenmiş olup, Balıkesir Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Prof. Dr. Şerif Saylan Yapı Mekaniği Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Laboratuvarda bulunduğum süre zarfında benim için en uygun çalışma ortamını sağlayıp desteklerini esirgemeyen başta Dr. Öğr. Üyesi Altuğ YAVAŞ olmak üzere Dr. Öğr. Üyesi Umut Hasgöl ve Dr. Öğr. Üyesi Tamer BİROL'a teşekkür ve saygılarımı sunarım. Ayrıca, deneysel çalışmalarda yardımda bulunan başta meslektaşlarım Volkan DEMİRCİ, Murat Cemal KAVAK ve Ulaş KÖKMEN olmak üzere çalışmaya katkı veren tüm öğrenci arkadaşlarıma teşekkürü borç bilirim.

Bu çalışmanın gerçekleşme sürecinde bilgi ve tecrübesiyle desteğini ve yardımlarını esirgemeyen tez danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Kaan TÜRKER'e ve yaşamım boyunca bana her türlü maddi ve manevi desteği sağlayan ve her konuda destek olan aileme teşekkürlerimi sunarım.

**Balıkesir, 2020**

**Cengiz GÜLTEKİN**

## 1. GİRİŞ

Betonun mekanik özelliklerinin iyileştirmesine yönelik çalışmaların en önemli sonuçlarından birisi lif takviyeli çimento kompozitlerinin geliştirilmesidir. Çok düşük su/bağlayıcı oranı, ince ve yüksek mukavemetli agrega ve çelik vb. lif kullanılarak üretilen bu beton türünde, maksimum sıklıkta iç yapı ve liflerin sağladığı üstün mekanik özellikler elde edilebilmektedir (Yazıcı ve diğ., 2009; Wille ve diğ., 2011; Wille ve diğ., 2012; Wang ve diğ., 2012). Bu tür betonlar genellikle Ultra Yüksek Performanslı Lifli Beton (UYPLB), Yüksek Performanslı Lif Takviyeli Çimento Kompoziti olarak tanımlanmaktadır (Richard ve Cheyreyzy, 1995; Naaman, 2002; Taşdemir ve Bayramov, 2002; Habel ve diğ., 2007; Yazıcı ve diğ., 2009; Fehling ve diğ., 2014).

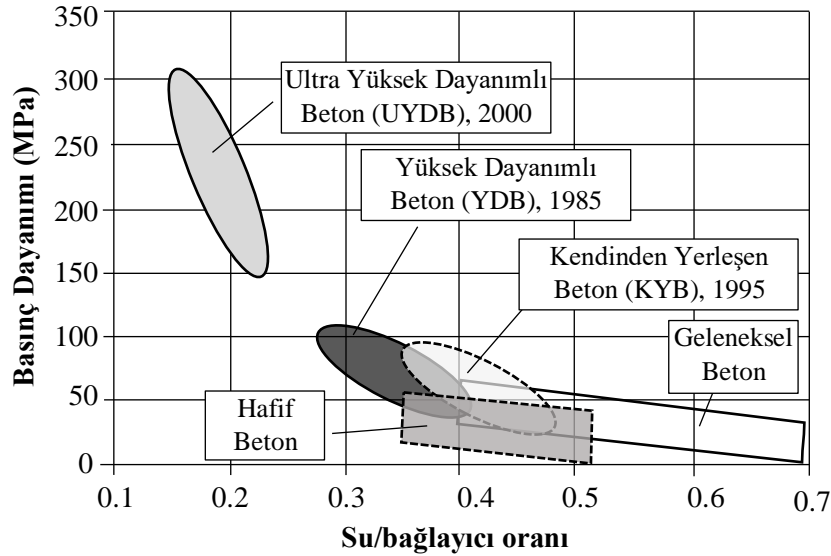
UYPLB'nin ortaya çıkışı 1970'li yıllarda betonun basınç dayanımının artırılması için yapılan çalışmalara dayanmaktadır. Özellikle süper akışkanlaştırıcı katkıların geliştirilmesi ve silis dumanı gibi çok ince ve puzolanik bir malzemenin kullanılmasıyla beraber betonun su/bağlayıcı oranı azaltılarak daha sıkı bir iç yapıya ve çok yüksek dayanımlara ulaşması sağlanmıştır. Çok yüksek basınç dayanımı nedeniyle sahip olduğu gevrek davranışın iyileştirilmesi amacıyla yüksek dayanımlı çelik teller eklenmiştir. UYPLB'nin matris ve lif içeriğinin 1970'li yıllardan itibaren gelişim süreci Tablo 1.1'de özetlenmiştir (Naaman ve Wille, 2012).

UYPLB genel olarak, çimento, silis dumanı, ince agrega, su, süper akışkanlaştırıcı katkı ve liflerden oluşmaktadır. Yüksek basınç dayanımının elde edilebilmesi için çimento kullanım oranı normal dayanımlı betonlara göre daha yüksektir. Betonda sıkı ve homojen bir iç yapı oluşturmak amacıyla çok ince yüksek dayanımlı agregalar (kuvars, bazalt vb.) kullanılmaktadır. Silis dumanı, inceliği (çimentonun yaklaşık yüzde biri boyutunda), geniş yüzey alanı ve yüksek SiO<sub>2</sub> içeriği nedeniyle betonun basınç dayanımını, aderansını ve aşınma direncini önemli oranda arttırmaktadır. Yüksek fırın cürufu, çimento miktarını azaltmak, işlenebilirliği artırmak ve boşluk miktarını azaltarak daha sıkı bir iç yapı oluşturmak amacıyla kullanılmaktadır. Şekil 1.1'de görüldüğü gibi UYPLB'nin su/bağlayıcı oranı, yüksek dayanımların sağlanabilmesi için geleneksel betonlara göre oldukça düşük olmaktadır (Eide ve Hisdal, 2012). Düşük su/bağlayıcı oranlarında işlenebilirliğin sağlanabilmesi için süper akışkanlaştırıcı katkıları kullanılmaktadır.



**Tablo 1.1:** UYPLB'nin kronolojik gelişim süreci (Naaman ve Wille, 2012).

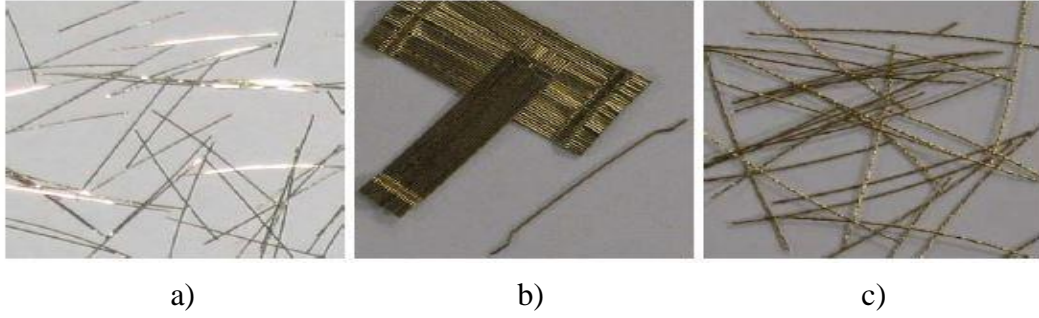
YILLAR	MALZEME MATRİSİ VE BETON	LİFLER
1970'li yıllar	<ul style="list-style-type: none"><li>Hidratasyon reaksiyonlarının daha iyi anlaşılması</li><li>Büzülme, sünme, porozite gibi etkilerin daha iyi anlaşılması</li><li>Su azaltıcı kimyasalların gelişimi</li><li>Saklama ve kür koşullarındaki gelişmeler</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>Yumuşak Çelik Lifler</li><li>Cam Lifler</li><li>Sentetik Lifler</li></ul>
1980'li yıllar	<ul style="list-style-type: none"><li>Kimyasal katkıların gelişimi</li><li>Yüksek Fırın Cürufu, Silis Dumani ve diğer mineral içerikli katkıların artması</li><li>Beton akışkanlığındaki artış</li><li>Su/Çimento oranındaki azalma</li><li>Yüksek Dayanımlı Beton terminolojisi: Özel saklama ve kür koşullarında 120 MPa' a kadar dayanım</li><li>Yüksek Performanslı Beton terminolojisi: Yüksek dayanımlı beton ile durabilite özelliklerinin gelişmesi</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>Kancalı Lifler (normal ve yüksek dayanımlı lifler)</li><li>Düşük modüllü sentetik lifler</li><li>Cam liflerin kullanımının artışı</li><li>Mikro lifler</li><li>Yüksek dayanımlı polimer lifler</li></ul>
1990'lı yıllar	<ul style="list-style-type: none"><li>Kimyasal katkılardaki artış (Süper akışkanlaştırıcıların keşfi)</li><li>Çimento yerine bağlayıcı çimentomsu malzemelerin kullanımının artışı</li><li>UHPC: Daha sıkı bir yapının uygulanması İnce tanelerin ilavesi; Düşük Porozite, Su/Çimento oranının azalması</li><li>Kendinden yerleşebilen ve sıkışabilen beton</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>Yeni helezonik çelik lifler</li><li>Betona kimyasal bağlanmış PVA Lifler</li><li>Sentetik liflerin uygunluğunun artışı</li></ul>
2000'li yıllar	<ul style="list-style-type: none"><li>Patentli ve patentsiz UHPFRC'nin artan gelişimi</li><li>UHPC: Sıkı yapı anlayışının geliştirilmesi; Nanoteknoloji kavramının uygulanması</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>Ultra yüksek dayanımlı çelik lifler:0.12 mm'ye kadar küçük çaplı ve 3400 MPa'a kadar dayanımlı düz veya kancalı lifler</li><li>Karbon içerikli nano lifler</li></ul>
2010'lu yıllar	<ul style="list-style-type: none"><li>Nano ölçekteki çimentomsu malzemenin matrisinin daha iyi anlaşılması</li><li>...Gelişmekte...</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>Karbon içerikli nano lifler</li><li>...Gelişmekte...</li></ul>



**Şekil 1.1:** UYPLB'e ait su/bağlayıcı oranının diğer betonlarla karşılaştırılması (Eide ve Hisdal, 2012).

UYPLB'nin sünekliğini arttırmak ve mekanik özelliklerini iyileştirmek için çelik, karbon, sentetik vb. lifler kullanılmaktadır. Çelik lifler UYPLB'nin özellikle aksenal çekme ve basınç dayanımı ve durabilite gibi mekanik özelliklerinde önemli artış sağlarken, sentetik

lifler genellikle durabilite amaçlı kullanılmaktadır. Çelik lif tipleri uzunluk, çap, şekil ve dayanım bakımından çeşitlilik göstermektedir. Lifler geometrik boyutları bakımından mikro ve makro boyutlu lifler olarak ikiye ayrılmaktadır. Mikro lifler daha ince ve kısa, makro lifler ise kalın ve uzun boyutlarda olmaktadır. Genellikle, mikro lifler düz, makro lifler ise dalgalı, burgulu ve kancalı formlarda üretilmektedir. UYPLB’de kullanılan bazı lif tipleri örnek olarak Şekil 1.2’de gösterilmiştir (Wille ve Naaman, 2010).



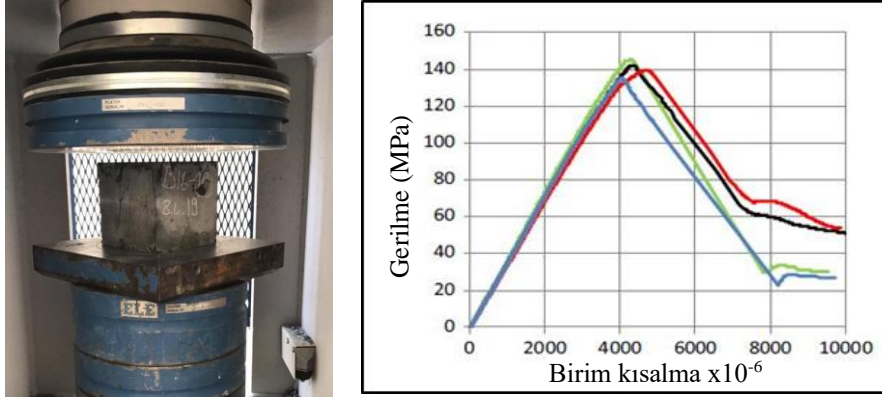
**Şekil 1.2:** UYPLB’de kullanılan çelik lif tipleri a) Düz, b) Kancalı, c) Burgulu.

UYPLB’de kullanılan bileşenlerin miktarları hedeflenen mekanik özelliklere göre değişmektedir. UYPLB konusunda ürün patentleri bulunan ve pratikte kullanılan bazı markalara ait bileşen miktarları Tablo 1.2’de verilmiştir (Rossi ve diğ., 2005; Graybeal, 2006; Voo, 2006).

**Tablo 1.2:** UYPLB’de kullanılan bileşen miktarları (Rossi ve diğ., 2005; Graybeal, 2006; Voo, 2006).

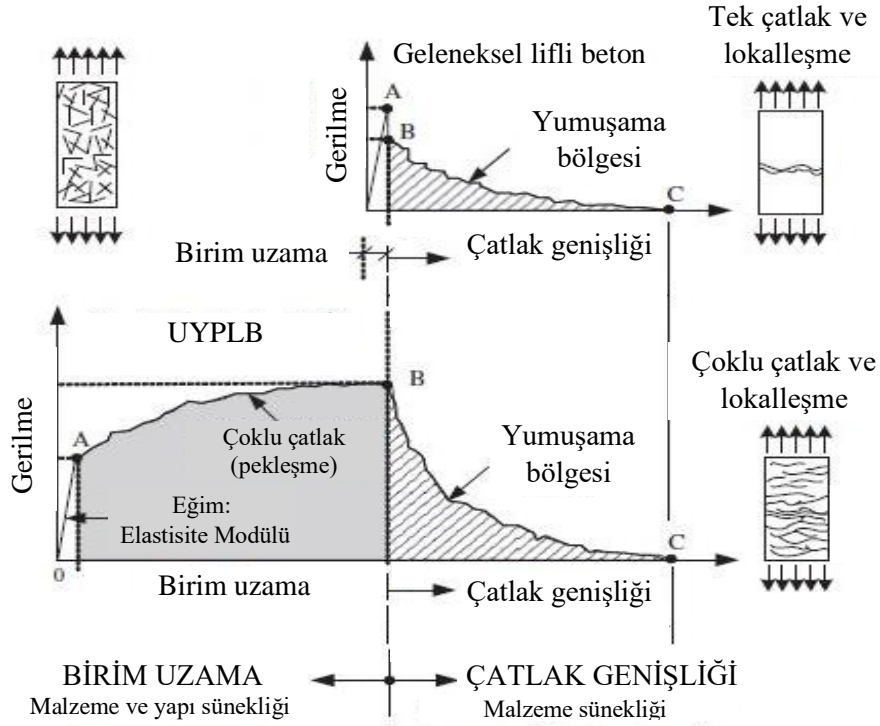
Bileşenler (kg/m <sup>3</sup> )	BCV®	BSI®	Cemtec®	Ductal®	Dura®
Çimento	2115	1114	1050	712	911
İnce Agregat (Premix)		1072	514	1020	911
Silis Dumanı		169	268	231	225
Öğütülmüş Kuvars		---	---	211	---
Priz Hızlandırıcı	--	---	---	30	---
Çelik Lif	156	234	858	156	173
Süper Akışkanlaştırıcı	21.5	40	44	30.7	38
Su	159	211	180	109	200

**UYPLB'nin mekanik özellikleri:** UYPLB aksel basınç altında dayanımının %70-%80'ine kadar lineer elastik davranış göstermektedir. Tepe noktasındaki beton birim kısalması 0.0035-0.0045 arasında değişmektedir. Aksel basınç altındaki elastisite modülü değeri yaklaşık olarak 45-55 Gpa'a ulaşmaktadır. Tepe noktasından sonra lif parametrelerine bağlı olarak ani azalan veya belirli bir eğimle azalan davranış göstermektedir (Şekil 1.3) (Singh ve diğ., 2017).



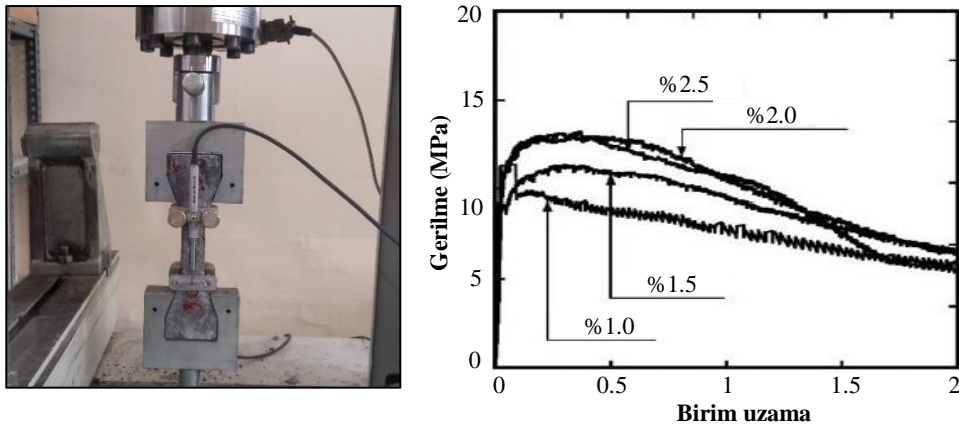
**Şekil 1.3:** UYPLB'nin basınç altındaki gerilme-birim kısalma ilişkisi (Singh ve diğ., 2017).

UYPLB'yi geleneksel lifli betondan ayıran önemli özelliklerinden biri de aksel çekme altındaki dayanımı ve sünekliğidir. Şekil 1.4'de UYPLB ve geleneksel lifli betona ait aksel çekme davranışı karşılaştırmalı olarak gösterilmektedir (Naaman, 2007). Aksel çekme etkisi altında oluşan ilk çatlaktan sonra azalan rijitlikle beraber pekleşme davranışı gözlemlenmektedir. UYPLB'de lifler ilk çatlak sonrası mikro düzeydeki çatlakları sınırlayarak betonun yük taşımaya devam etmesini sağlamaktadır. Bu aşamada mikro düzeyde çok sayıda çatlak oluşmaktadır. Tepe yüküne ulaşıldığında çatlak genişliklerinin artmasıyla beraber lifler sıyrılmaya başlamakta ve çatlaklar bir bölgede lokalleşerek tek ve büyük bir çatlak oluşturmaktadır. Çatlakların lokalleşmesi sonrası yük düşüşü (yumuşama) başlamaktadır (Şekil 1.4). UYPLB'de kullanılan lif içeriğine (tipi, miktarı) bağlı olarak betonun dayanımı, rijitliği, sünekliği (tokluğu) büyük oranda değişmektedir. Geleneksel betonda lif kullanılması durumunda UYPLB'de gözlenen pekleşme davranışı yerine yumuşama (dayanım azalması) gözlenmektedir. İki beton arasındaki bu davranış farkı iç yapı ile sağlanan aderans farkından kaynaklanmaktadır. UYPLB'de çok sıkı iç yapı olması nedeniyle liflerle iyi aderans sağlanırken, geleneksel lifli betonda bu düzeyde aderans sağlanamamaktadır. Bu nedenle, geleneksel lifli betonlarda aderansı arttıran genellikle kancalı, burgulu vb. lifler kullanılmaktadır.



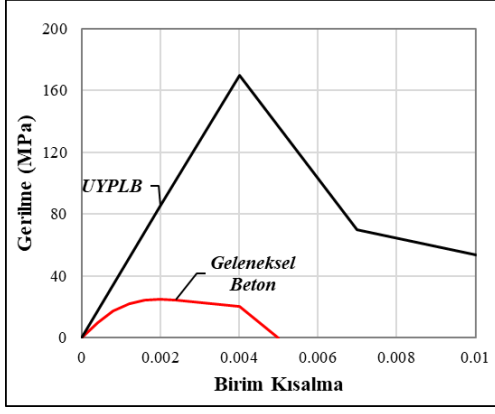
**Şekil 1.4:** UYPLB ve geleneksel lifli betonun aksel çekme etkisi altındaki gerilme-birim uzama davranışlarının karşılaştırılması (Naaman, 2007).

Farklı oranlarda lif içeren UYPLB numunelerinin aksel çekme altındaki gerilme-şekildeğiştirme grafiği örnek olarak Şekil 1.5’de verilmiştir (Park ve diğ., 2012).

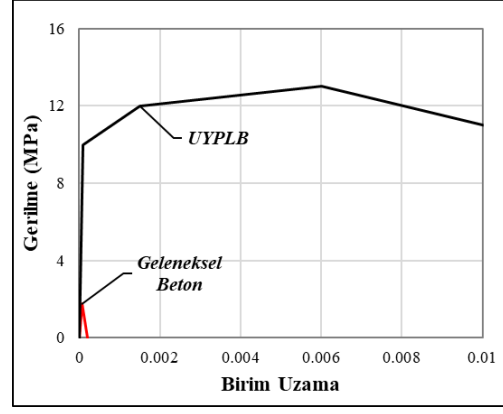


**Şekil 1.5:** Farklı lif oranlarına sahip UYPLB'nin çekme altındaki gerilme-birim uzama ilişkileri (Park ve diğ., 2012).

UYPLB'nin aksel basınç ve çekme altında dayanım ve şekildeğiştirme kapasitesinde önemli artış sağladığı görülmektedir. Literatürde yaygın kullanılan lif içeriğine (%2.0) sahip UYPLB ile tipik bir geleneksel beton sınıfına (C25) ait gerilme-birim şekildeğiştirme ilişkileri Şekil 1.6’da karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir.



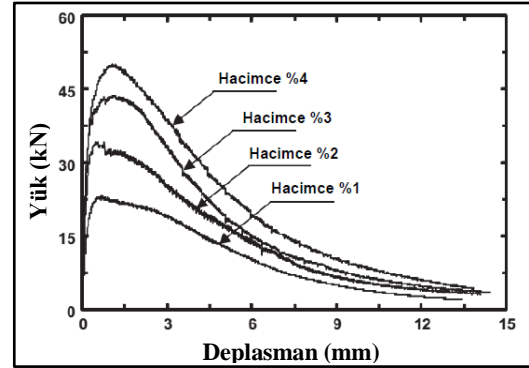
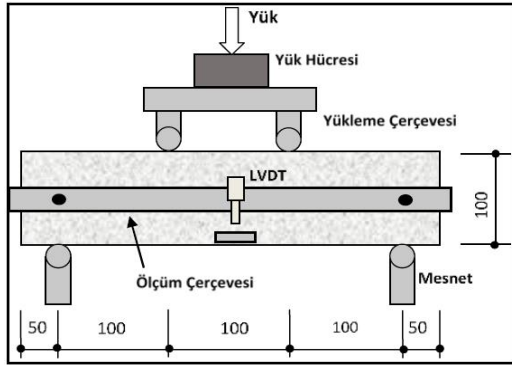
a)



b)

**Şekil 1.6:** UYPLB ve geleneksel beton davranışlarının karşılaştırılması a) Gerilme-birim kısılma davranışı, b) Gerilme-birim uzama davranışı.

Salt UYPLB'nin eğilme altındaki davranışında çekme dayanımı belirleyici olmakta bu nedenle çekme davranışına benzer karakteristik elde edilmektedir. Genellikle prizma numuneler üzerinde uygulanan eğilme testlerinden elde edilen karakteristik eğilme davranışları örnek olarak Şekil 1.7'de verilmiştir (Yoo ve diğ., 2014).



**Şekil 1.7:** Test düzeneği ve farklı hacimsel lif oranları için yük-düşey deplasman davranışları (Yoo ve diğ., 2014).

UYPLB'nun mukavemet özellikleri lif içeriğine, diğer bileşenlerine ve üretim koşullarına bağlı olarak değişmektedir. Avrupa'da standart UYPLB üretimi yapan bazı firmalar tarafından verilen mukavemet özellikleri Tablo 1.3'de verilmiştir (AFGC, 2013).



**Tablo 1.3:** UYPLB üretimi yapan firmaların ürün mekanik özellikleri (AFGC, 2013).

Üreticiler	Basınç dayanımı (MPa)	Çekme dayanımı (MPa)	Elastisite Modülü (GPa)	Kayma Modülü (GPa)	Poisson Oranı	Termal Genleşme Katsayısı ( $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ )	Yoğunluk ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )
Ductal®	150-200	9-10	45-55	24	0.2	12	2500
BSI®	180	8.8	65	25	0.2	10.4	2750
BCV®	150-200	---	44	---	---	---	2480

**UYPLB'nin kullanım alanları:** UYPLB'nin çok çeşitli uygulamaları bulunmaktadır. Yapısal elemanlardaki en yaygın kullanımı prefabrik köprülerin kirişleri ve ıslak birleşimleridir (Şekil 1.9) (Russell ve Graybeal, 2013). Bu köprülerin büyük çoğunluğu yaya köprüleridir (Şekil 1.8) (Tanaka ve diğ., 2011). Köprülerde UYPLB ilk olarak 1997'de Kanada'da kullanılmıştır (Şekil 1.10) (Blaise ve Couture, 1999). Günümüzde, UYPLB kullanılarak yapılan en uzun açıklığa (120m) sahip köprü 2002'de Güney Kore'de inşa edilen Peace Footbridge köprüsüdür (Şekil 1.11) (Resplendio ve Petitjean, 2003).



**Şekil 1.8:** Japonya'da UYPLB ile yapılan ilk köprü (Tanaka ve diğ., 2011).



**Şekil 1.9:** UYPLB'nun prefabrik birleşim noktalarında uygulanması (Russell ve Graybeal, 2013).



**Şekil 1.10:** Dünyada UYPLB ile yapılan ilk köprü (Blaise ve Couture, 1999).



**Şekil 1.11:** Dünyada UYPLB ile yapılan en uzun açıklığa sahip köprü (Resplendio ve Petitjean, 2003).

UYPLB yüksek basınç ve çekme dayanımı nedeniyle, balkon, merdiven vb. ince kesitli kabuk elemanlarda kullanılmaktadır (Şekil 1.12) (Fehling ve diğ., 2014). UYPLB'nin yüksek süneklik ve durabilite özellikleri, ağır çevre koşullarına maruz betonarme baraj, liman, iskele, köprü, viyadük vb. yapıların onarım ve takviyesinde tercih edilmesini sağlamaktadır (Şekil 1.13).



**Şekil 1.12:** İnce kesitli kabuk örneği ve balkon elemanı uygulamaları (Fehling ve diğ., 2014)



**Şekil 1.13:** UYPLB'nin onarım ve takviye elemanı olarak kullanımı.

Yapısal elemanların yanı sıra UYPLB, duş kabini, çiçek saksısı vb. kent mobilyalarında da kullanılmaktadır (Şekil 1.14) (Devin ve Harris, 2010).





**Şekil 1.14:** Duş kabini ve çiçek saksısı üretiminde UYPLB kullanımını (Devin ve Harris, 2010).

Ülkemizde UYPLB'nin yapısal elemanlarda kullanımına yönelik çeşitli araştırmalar (Ilki ve diğ., 2009; Tanarşlan, 2017a; Tanarşlan ve diğ., 2017b; Hasgul ve diğ., 2018; Turker ve diğ., 2019b; Yavas ve diğ., 2019; Gümüş ve Arşlan 2019) yapılmakla birlikte henüz pratikte kullanımı rögar kapağı, mazgal gibi yapısal olmayan elemanlarla sınırlıdır (Şekil 1.15) (Taşdemir ve diğ., 2007).



**Şekil 1.15:** Türkiye'de üretilen yağmur suyu ızgaraları ve rögar kapakları (Taşdemir ve diğ., 2007).

UYPLB lif içeriğine bağlı olarak geleneksel betona göre oldukça farklı davranış gösterebildiği için yapısal elemanlarda kullanımı yeni tasarım esasları gerektirmektedir. UYPLB'nin pratikte kullanıldığı bazı ülkelerde (Fransa, Almanya, Japonya gibi) bu konuda önemli çalışmalar yapılarak kılavuzlar, raporlar veya standartlar oluşturulmuş ve tasarımlar bunlara göre yapılmaktadır. (Gowripalan, N. ve Gilbert, 2000; JSCE 2008; AFGC 2002, AFGC 2013; Fehling ve diğ., 2014; NF P 18-710, 2016). Söz konusu dokümanlarda UYPLB tanımlamaları, üretim prosedürleri, test metodları, tasarım esasları vb. konularda standart bir yaklaşım bulunmamakta, bu konular halen tartışılmakta ve geliştirilmektedir. UYPLB'de betonun basınç dayanımının yanısıra çekme dayanımının da gözönüne alınması ve bunun da kullanılan lif içeriği (malzemesi/tipi/boyutu/oranı), beton içindeki doğrultusu, beton

matrisinin yapısı, donatılar ile etkileşimi vb. birçok etkene bağlı olması genel bir standart oluşturulmasını zorlaştırmaktadır. Bu nedenle pratikte daha çok özel beton firmaları (Ductal, BCV, BSI, Cemtec, Dura) tarafından hazırlanan belirli özelliklere sahip standart UYPLB karışımları ve kılavuzlar kullanılmaktadır. Daha geniş kapsamlı standartların geliştirilmesi ve UYPLB'in yaygınlaşabilmesi için deneysel ve nümerik çalışmalara ihtiyaç bulunmaktadır.

UYPLB'nin normal ve yüksek dayanımlı geleneksel betonlara göre önemli avantajlar sağlama potansiyeli bulunduğu için en çok çalışılan yapısal elemanlar betonarme kirişlerdir. Kirişlerde UYPLB kullanımı ile işletme yükleri altındaki sehim ve çatlaklar önemli ölçüde sınırlanabilmektedir (Yoo ve Yoon, 2015; Yoo vd., 2016; Türker vd., 2016; Hasgül vd., 2018; Türker vd., 2019; Kodur vd., 2018). Bu da betonun durabilitesini artırarak, özellikle sert çevre koşullarına maruz köprü kirişleri vb. elemanlar için avantaj sağlamaktadır. UYPLB'de lifler tarafından sağlanan çekme dayanımı, kirişlerin eğilme kapasitesine önemli katkı sağlayabilmektedir (Yoo and Yoon, 2015; Türker vd., 2016; Yoo vd., 2017; Hasgül vd., 2018; Türker vd., 2019). Ayrıca UYPLB'nin yüksek basınç dayanımı ve şekildeğiştirme kapasitesi de kirişlerde yüksek çekme donatısı oranlarında dahi yeterli sünekliğin sağlanabilmesine olanak vermektedir (Hasgül vd., 2018; Chen vd., 2018; Türker vd., 2019). Eğilme davranışının yanısıra, UYPLB içeriğindeki lifler asal çekme gerilmelerini karşılayarak kirişlerin kesme kapasitesine de önemli katkı sağlamaktadır (Voo vd., 2010; Yang vd., 2012; Baby vd., 2014; Zagon vd., 2016; Lim ve Hong, 2016; Mészöly ve Randa, 2018; Yavaş vd, 2019).

Bu avantajlar, prefabrike betonarme yapılarda yaygın olarak kullanılan "I" enkesitli kirişler için büyük önem taşımaktadır. Genellikle basit kiriş olarak teşkil edilen bu elemanlarda yüksek dayanımlı geleneksel beton kullanılarak ekonomik enkesitler elde edilmeye çalışılmakta, ancak donatı detaylarının yoğunluğu nedeniyle beton yerleştirilmesinde önemli zorluklarla karşılaşmaktadır. Bu durum, çoğu kez betonun yerleşebilirliğini sağlamak amacıyla başlık ve gövde boyutlarının büyümesine sebep olmaktadır. Bu bağlamda, I enkesitli kirişlerde UYPLB kullanımının yüksek dayanımlı geleneksel betona göre önemli avantajlar sağlama potansiyeli bulunmaktadır.

Bu çalışmada, I enkesitli betonarme kirişlerde UYPLB'nin kullanılabilirliği deneysel ve nümerik olarak incelenmiştir. Deneysel programda, UYPLB, ultra yüksek dayanımlı beton (UYDB) ve geleneksel beton (GB) kullanılarak üretilen farklı özelliklerdeki kirişlerin eğilme davranışları çeşitli parametrelere göre karşılaştırılmış ve UYPLB'nin avantaj ve dezavantajları ortaya konmuştur. Çalışmanın nümerik kısmında, UYPLB kirişlerin eğilme kapasitesi (dayanımı) ile ilgili literatürdeki teorik yaklaşımlar incelenmiş ve test kirişleri üzerinde karşılaştırılarak geçerlilikleri değerlendirilmiştir.

### **1.1 Literatür Değerlendirmesi**

Bu bölümde, UYPLB'li betonarme kirişlerin eğilme davranışı ile ilgili deneysel ve nümerik çalışmalara ait literatür değerlendirilmesi sunulmuştur. Deneysel çalışmalarda incelenen kirişlere ve UYPLB'ye ait özellikler, karşılaştırabilmesi amacıyla aynı formatta tablollaştırılarak verilmiştir. Nümerik çalışmalar içerisinde kiriş eğilme kapasitelerinin hesabına yönelik yeni yaklaşım içerenler, test kirişlerine uygulanmak üzere Bölüm 3.3'de detaylı olarak açıklanmıştır.

*Dancygier ve Savir (2006)*'da UYPLB'li kirişlerin eğilme davranışı 11 adet dikdörtgen enkesitli kiriş üzerinde dört noktalı eğilme test düzeneği kullanılarak deneysel olarak incelenmiştir (Tablo 1.4). Çalışmada incelenen parametreler, lif tipi, donatı oranı ve kesme açıklığıdır. Çalışma sonucunda, lif kullanımıyla beraber düşük donatı oranına sahip kirişlerde deplasman sünekliği azalırken, donatı oranının artışıyla beraber sünekliğin arttığı görülmüştür. Kesme açıklığının azalması deplasman sünekliğinde düşüşe sebep olmuştur. Bu sonuçlara bağlı olarak UYPLB'li kirişlere ait minimum donatı oranı koşulunun geleneksel betonarmeye göre daha yüksek olması gerektiği belirtilmiştir. Çalışmada ayrıca, UYPLB'nin eğilme kapasitesinin belirlenmesi için literatürde önerilen bazı yaklaşımlar (Lim ve diğ., 1987; Imam ve diğ., 1995; ACI 544, 2009; ACI 318, 2002) ile deney sonuçları karşılaştırılmıştır. ACI 544 (2009) ve Lim ve diğ. (1987) yaklaşımlarının uyumlu sonuç verdiği, ACI 318 (2002)'de ise lif katkısı dikkate alınmadığı için daha konservatif sonuç verdiği rapor edilmiştir.

**Tablo 1.4:** Dancygier ve Savir (2006)'da incelenen kiriş ve UYPLB özellikleri.

Kiriş No	Kesit Özellikleri			Malzeme Özellikleri								Etriye	$a_k/d$	$M_{maks}^d$
	Kesit Tipi	b	h	Beton	Donatı		Lif Özellikleri							
				$f_{cu}$	$f_y$	Ç.D		$T_f$	$l_f$	$d_f$	$\rho_f$			
					$c_c$	$A_s$								
1	D	200	300	45.1	480	27	100					Var	5	18.2
2	D	200	300	45.1	480	27	100					Var	5	16.7
3	D	200	300	120.5	480	27	151			Lifsiz		Var	5	38.7
4	D	200	300	114.6	480	27	151					Var	5	35.9
5	D	200	300	118	616	27	151					Var	3.33	28.9
6	D	200	300	129.4	480	27	151	H	35	0.55	0.75	Var	5	35.6
7	D	200	300	123.6	480	27	151	H	60	0.9	0.75	Var	5	41
8	D	200	300	124.4	480	27	301	H	35	0.55	0.75	Var	5	58.3
9	D	200	300	122	480	27	301	H	60	0.9	0.75	Var	5	55.8
10	D	200	300	121.8	616	27	151	H	35	0.55	0.75	Var	4.17	35.1
11	D	200	300	121.8	616	27	151	H	35	0.55	0.75	Var	3.33	33.8

$b$  : Kesit genişliği (mm),  $h$  : Kesit yüksekliği (mm),  $f_{cu}$  : Beton basınç dayanımı (MPa),  $f_y$  : Donatı akma dayanımı (MPa),  $c_c$  : Çekme donatısının kesit alt lifine olan mesafesi (mm),  $A_s$  : Çekme donatısı alanı (mm<sup>2</sup>),  $l_f$  : Lif uzunluğu (mm),  $d_f$  : Lif çapı (mm),  $\rho_f$  : Lif hacmi,  $a_k$  : Kesme açıklığı,  $d$  : Faydalı yükseklik,  $M_{maks}^d$  : Maksimum deneysel eğilme momenti (kNm), **D**:Dikdörtgen,  $T_f$ : Lif Tipi, **H** : Kancalı, **Ç.D** : Çekme donatısı

**Yang ve diğ. (2010)**'da UYPLB ile üretilen 0.006-0.02 arasında değişen donatı oranlarına sahip dikdörtgen enkesitli 14 adet kiriş üzerinde, donatı oranının eğilme davranışına olan etkisi dört noktalı eğilme test düzeneği ile deneysel olarak incelenmiştir (Tablo 1.5). Çalışma sonucunda, UYPLB'li kirişlerde donatı kullanımının eğilme kapasitesine katkısı olduğu, donatı oranı arttıkça da bu katkının arttığı rapor edilmiştir. Lifli kirişlerde donatı oranı artımının deplasman sünekliğine olan etkisinde bir eğilim gözlenmezken, tüm donatı oranlarında yeterli deplasman sünekliğinin sağlandığı belirtilmiştir. Çalışmada ayrıca bir numune üzerinde iki farklı döküm yöntemi (ortadan, kenardan) uygulanarak döküm yönteminin eğilme davranışı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Kirişlerde betonu orta bölgeden dökmenin, kenardan dökmeye göre eğilme kapasitesi bakımından daha iyi sonuç verdiği rapor edilmiştir.

**Tablo 1.5:** Yang ve diğ. (2010)'da incelenen kiriş ve UYPLB özellikleri.

Kiriş No	Kesit Özellikleri			Malzeme Özellikleri								Etriye	a <sub>k</sub> /d	M <sub>max</sub> <sup>d</sup>	
				Beton		Donatı			Lif Özellikleri						
	Kesit Tipi	b	h	f <sub>cu</sub>	E <sub>c</sub>	f <sub>y</sub>	Ç.D		T <sub>f</sub>	l <sub>f</sub>	d <sub>f</sub>				ρ <sub>f</sub>
						c <sub>c</sub>	A <sub>s</sub>								
1*	D	180	270	197	46.8			Yok	S	13	0.2	2	Yok	4.81	71
2*	D	180	270	191	46.4	500	35	253	S	13	0.2	2	Yok	4.81	85.1
3*	D	180	270	192	46.7	500	35	380	S	13	0.2	2	Yok	4.81	102
4**	D	180	270	192	46.7	500	35	380	S	13	0.2	2	Yok	4.81	92.2
5*	D	180	270	196	45.5	500	35	507	S	13	0.2	2	Yok	4.81	116.7
6*	D	180	270	191	46.4	500	35	253	S	13	0.2	2	Yok	4.81	106.3
						500	75	253							
7*	D	200	270	196	45.5	500	35	380	S	13	0.2	2	Yok	4.81	131.6
						500	75	380							

\* : Bu kirişlerde UYPLB dökümü ortadan yapılmıştır. \*\* : Bu kirişte UYPLB dökümü kenardan yapılmıştır.

NOT : Her kirişten ikişer döküm yapılmış tabloda ortalamaları sunulmuştur.

E<sub>c</sub> : Beton elastisite modülü (GPa), S : Düz.

**Khalil ve Tayfur (2013)**'de UYPLB'li kirişlerin eğilme davranışı deneysel olarak incelenmiş ve ACI544 (2009)'da geleneksel lifli betonarme kirişlerin eğilme kapasitesinin belirlenmesi için önerilen model UYPLB'li betonarme kirişler için geliştirilmiştir. Geliştirilen modele ait detaylar Bölüm 3.3.1'de verilmiştir. Yapılan çalışmada, lif tipi ve hacminin UYPLB'li betonarme kirişlerin eğilme davranışına olan etkisi parametrik olarak incelenmiştir. Çalışmada enkesitinin tamamında lif içeren 6 adet, kesitin sadece alt yarısında lif içeren 4 adet, hiç lif içermeyen 1 adet lifsiz olmak üzere toplam 11 adet kiriş kullanılmıştır (Tablo 1.6). Kirişlere dört noktalı eğilme testi uygulanmıştır. Çalışma sonucunda, çelik lif kullanımının, %0.75 ve %1 kancalı lif hariç ilk çatlak yükü üzerinde önemli derecede etkili olmadığı, kesitin moment kapasitesini ise lif hacmiyle doğrusal olarak arttırdığı belirtilmiştir. Çelik lif tipinin ise eğilme kapasitesine önemli bir etkisi olmamıştır. Ayrıca, kesitin sadece alt yarısında lif kullanımının, moment kapasitesini az oranda etkilediği rapor edilmiştir. UYPLB'li kirişlerin eğilme kapasitesinin belirlenmesi için geliştirilen model, çalışmada incelenen kirişler üzerinde uygulanmış ve oldukça uyumlu sonuç verdiği rapor edilmiştir.

**Tablo 1.6:** Khalil ve Tayfur (2013)'de incelenen kiriş ve UYPLB özellikleri.

Kiriş No	Kesit Özellikleri			Malzeme Özellikleri								Etriye	a <sub>k</sub> /d	M <sub>maks</sub> <sup>d</sup>
				Beton	Donatı		Lif Özellikleri							
	f <sub>cu</sub>	f <sub>y</sub>	Ç.D		T <sub>f</sub>	l <sub>f</sub>	d <sub>f</sub>	ρ <sub>f</sub>						
Kesit Tipi	b	h			c <sub>c</sub>	A <sub>s</sub>								
1	D	150	250	137	461	40	226			Lifsiz		Var	2.4	23.7
2	D	150	250	140	461	40	226	H	30	0.6	0.5	Var	2.4	25.2
3	D	150	250	144	461	40	226	C	30	0.6	0.5	Var	2.4	24.9
4	D	150	250	141	461	40	226	H	30	0.6	0.75	Var	2.4	27.6
5	D	150	250	143	461	40	226	C	30	0.6	0.75	Var	2.4	25.8
6	D	150	250	146	461	40	226	H	30	0.6	1	Var	2.4	29.1
7	D	150	250	149	461	40	226	C	30	0.6	1	Var	2.4	30
8*	D	150	250	136/138	461	40	226	H	30	0.6	0.5	Var	2.4	24.3
9*	D	150	250	138/142	461	40	226	C	30	0.6	0.5	Var	2.4	24.3
10*	D	150	250	132/140	461	40	226	H	30	0.6	0.75	Var	2.4	26.7
11*	D	150	250	141/144	461	40	226	C	30	0.6	0.75	Var	2.4	28.8

\* : Bu kirişlerde sadece kesit alt yarısında lif bulunmaktadır ve tabloda basınç dayanımları sırasıyla lifsiz ve lifli bölge için sunulmuştur.

*C* : Dalgalı, *H* : Kancalı.

*Yoo ve diğ. (2015)*'de UYPLB'li kirişlerin eğilme davranışı deneysel olarak incelenmiş ve AFGC/SETRA (2002) yönetmeliğindeki nümerik yaklaşım deney sonuçları üzerinde uygulanmıştır. Yapılan deneysel çalışmada, donatı oranı ve lif parametrelerinin UYPLB'li kirişlerin eğilme davranışı üzerindeki etkisini incelemek için 10 adet dikdörtgen enkesitli betonarme kiriş kullanılmıştır (Tablo 1.7). Çalışmada ayrıca, UYPLB içeren prizma numuneler üzerinde üç noktalı eğilme testi uygulanarak malzeme ölçeğinde eğilme davranışı belirlenmiş ve bunlar nümerik çalışmada kullanılmıştır. Çalışma sonucunda, çelik lif kullanımının çatlama öncesi eleman rijitliği üzerinde bir etkisinin olmadığı, bununla beraber yük taşıma kapasitesi, çatlama sonrası eleman rijitliği ve çatlak davranışında önemli artış sağladığı, eleman sünekliğini ise azalttığı gözlemlenmiştir. Lif tipi ve uzunluğu değişiminin betonarme kiriş elemanları üzerinde etkisinin olmadığı, ancak prizma numuneleri üzerinde yapılan malzeme eğilme testlerinde lif uzunluğu artımının eğilme kapasitesinde artış sağladığı ve en büyük artışın 13mm ile 19mm arasında olduğu belirtilmiştir. Burgulu lif kullanımının ise eğilme kapasitesinde önemli bir artış sağlamadığı gözlemlenmiştir.

Çalışmanın nümerik bölümünde, prizma numunelerinden elde edilen deneysel sonuçlardan yararlanılarak AFGC/SETRA (2002) yönetmeliği ile UYPLB'nin çekme altındaki bünye

bağıntısı elde edilmiştir. Bünye bağıntılarının belirlenmesinde AFGC/SETRA (2002) yönetmeliğinde belirtilen lif yönelim katsayısının iki farklı değeri ( $K=1.00$  ve  $K=1.25$ ) için uygulama yapılmıştır. Elde edilen bünye bağıntıları ile deneyleri yapılan betonarme kirişlerin kesit analizi yapılarak moment-eğrilik ilişkileri ve yük-deplasman eğrileri elde edilmiştir. Nümerik sonuçlar deney sonuçlarıyla karşılaştırılmış ve çalışma sonucunda AFGC/SETRA (2002) yönetmeliğindeki lif yönelim katsayısının  $K=1.25$  olarak alınmasının daha iyi sonuç verdiği rapor edilmiştir.

**Tablo 1.7:** Yoo ve diğ. (2015)'de incelenen kiriş ve UYPLB özellikleri.

Kiriş No	Kesit Özellikleri			Malzeme Özellikleri								E	a <sub>k</sub> /d	M <sup>d</sup> <sub>maks</sub>			
				Beton		Donatı				Lif Özellikleri							
	Kesit Tipi	b	h	f <sub>cu</sub>	E <sub>c</sub>	f <sub>y</sub>	Ç.D		B.D		T <sub>f</sub>				l <sub>f</sub>	d <sub>f</sub>	ρ <sub>f</sub>
							c <sub>c</sub>	A <sub>s</sub>	c <sub>c</sub> '	A <sub>s</sub> '							
1	D	150	220	201	45.3	495	30	253	157	32					Var	5.03	28.2
2	D	150	220	201	45.3	510	33	397	157	32					Var	5.03	44.1
3	D	150	220	212	46.7	495	30	253	157	32	S	13	0.2	2	Var	5.03	39.3
4	D	150	220	212	46.7	510	33	397	157	32	S	13	0.2	2	Var	5.03	55.8
5	D	150	220	210	46.9	495	30	253	157	32	S	20	0.2	2	Var	5.03	42
6	D	150	220	210	46.9	510	33	397	157	32	S	20	0.2	2	Var	5.03	56.3
7	D	150	220	210	46.8	495	30	253	157	32	S	30	0.3	2	Var	5.03	43.2
8	D	150	220	210	46.8	510	33	397	157	32	S	30	0.3	2	Var	5.03	56.1
9	D	150	220	232	47	495	30	253	157	32	B	30	0.3	2	Var	5.03	43.4
10	D	150	220	232	47	510	33	397	157	32	B	30	0.3	2	Var	5.03	60.3

c<sub>c</sub>' : Basınç donatısının kesit üst lifine olan mesafesi (mm), A<sub>s</sub>' : Basınç donatısı alanı (mm<sup>2</sup>), **B.D** : Basınç donatısı, **B** : Burgulu, **E** : Etriye

*Yoo ve diğ. (2017)*'de UYPLB'li kirişlerin eğilme davranışı deneysel olarak incelenmiş ve AFGC (2013) ve JSCE (2008) kılavuzlarına göre belirlenen moment-eğrilik ilişkisi deneysel moment-eğrilik ilişkisi ile karşılaştırılmıştır. Yapılan deneysel çalışmada, UYPLB'li kirişlerin eğilme davranışı farklı donatı oranlarına sahip 4 adet dikdörtgen enkesitli kiriş üzerinde incelenmiştir (Tablo 1.8). Çalışmada geleneksel betonarmenin aksine UYPLB'li kirişlerde tepe yüküne kadar çok sayıda mikro eğilme çatlak oluşurken, tepe yükünden sonra çatlakların bir noktada lokalleşmesiyle eleman kapasitesinin yavaş bir şekilde azaldığı belirtilmiştir. Donatı oranı artımının, çatlak sayısı ve genişliğinde önemli bir etkiye sahip olmadığı, yük kapasitesi, çatlama sonrası eğilme rijitliği ve deplasman sünekliğinde ise artış sağladığı rapor edilmiştir. Çalışmada ayrıca, UYPLB içeren prizma numuneler üzerinde,

nümerik çalışmada kullanılmak üzere üç noktalı eğilme testi ve doğrudan çekme testleri yapılmıştır.

Çalışmanın nümerik bölümünde, AFGC (2013) ve JSCE (2008) kılavuzlarında önerilen yaklaşımlar kullanılarak deneysel çalışmada kullanılan UYPLB için bünye bağıntıları belirlenmiştir. Bu bağıntılar malzeme çekme testi sonuçları ile, bu bünye bağıntıları ile yapılan moment-eğrilik analizleri de elemanlara ait deneysel moment-eğrilik ilişkisi ile karşılaştırılmıştır. Çalışma sonucunda, AFGC (2013) kılavuzunun JSCE (2008) kılavuzuna göre daha iyi sonuç verdiği elde edilmiştir.

**Tablo 1.8:** Yoo ve diğ. (2017)'de incelenen kiriş ve UYPLB özellikleri.

Kiriş No	Kesit Özellikleri			Malzeme Özellikleri										Etriye	$a_g/d$	$M_{maks}^d$
				Beton		Donatı			Lif Özellikleri							
	Kesit Tipi	b	h	$f_{cu}$	$E_c$	$f_y$	Ç.D		$T_f$	$l_f$	$d_f$	$\rho_f$				
							$c_c$	$A_s$								
1	D	200	270	197	47.8	Yok		S	13	0.2	2	Yok	3.89	72.5		
2	D	200	270	197	47.8	523	30	253	S	13	0.2	2	Yok	3.89	97.9	
3	D	200	270	197	47.8	523	30	380	S	13	0.2	2	Yok	3.89	118.8	
4	D	200	270	197	47.8	523	30	380	S	13	0.2	2	Yok	3.89	131	
						523	65	380								

*Kahanji ve diğ. (2017)*'de lif hacmi ve kür koşullarının UYPLB'li kirişlerin eğilme davranışına olan etkisini 8 adet dikdörtgen enkesitli betonarme kiriş üzerinde dört noktalı eğilme test düzeneği kullanarak deneysel olarak incelenmiştir (Tablo 1.9). Çalışma sonucunda, 20°C sıcaklıkta kürlenmiş elemanların sünekliği 90°C sıcaklıkta kürlenmiş elemanlardan daha yüksek elde edilirken, yük taşıma kapasitesinde bu durumun tersi gözlemlenmiştir. Ayrıca, kirişlerde %4 lif kullanımının lifsiz referans kirişlerine oranla dayanım ve rijitlik bakımından artış sağladığı, bununla beraber, %1 ve %2 lif içeren kirişlerde ise önemli bir artışın oluşmadığı belirtilmiştir.



**Tablo 1.9:** Kahanji ve diğ. (2017)'de incelenen kiriş ve UYPLB özellikleri.

Kiriş No	Kesit Özellikleri			Malzeme Özellikleri							$a_k/d$	$M_{maks}^d$
				Beton	Donatı	Lif Özellikleri						
	Kesit Tipi	b	h	$f_{cu}$	Ç.D		$T_f$	$l_f$	$d_f$	$\rho_f$		
					$c_c$	$A_s$						
1*	D	100	150	130	26	226	S	13	0.2	1	3.08	17.66
2*	D	100	150	133.9	26	226	S	13	0.2	2	3.08	17.24
3*	D	100	150	170	26	226	S	13	0.2	4	3.08	19.06
4*	D	100	150	124.9	Yok		S	13	0.2	2	3.08	3.48
5**	D	100	150	147.3	26	226	S	13	0.2	1	3.08	15.9
6**	D	100	150	149	26	226	S	13	0.2	2	3.08	15.6
7**	D	100	150	176.9	26	226	S	13	0.2	4	3.08	16.8
8**	D	100	150	163.4	Yok		S	13	0.2	2	3.08	3.82

\*: Bu kirişler 20°C'de kürlenmiştir. \*\*: Bu kirişler 90°C'de kürlenmiştir.

**Qi ve diğ. (2018)**'de UYPLB'li kirişlerin eğilme davranışı deneysel olarak incelenmiş ve eğilme kapasitesinin belirlenmesi için nümerik bir yaklaşım önerilmiştir. Yapılan deneysel çalışmada, UYPLB ile üretilen düşük donatı oranlarına sahip 9 adet dikdörtgen enkesitli kiriş üzerinde UYPLB'nin eğilme testleri yapılmıştır (Tablo 1.10). Yüksek dayanımlı çelik kullanılarak, donatı oranı ve lif özellikleri incelenen çalışmada, lif içeriğinin (oranı ve tipi), eleman yük taşıma kapasitesi ve rijitlik bakımından boyuna donatı kadar etkili olmadığı ve çatlama yükünü önemli derecede değiştirmedeği belirlenmiştir. Çalışmanın nümerik bölümünde, UYPLB için lif dağılımı, aderans boyu ve lif yönelmesini gözönüne alan bir bünye bağıntısı önerilmiş ve bu bağıntı esas alınarak UYPLB kirişlerin eğilme kapasitesi için bir model oluşturulmuştur. Çalışmada ayrıca, önerilen bünye bağıntıları kullanılarak moment-eğrilik analizi yapılmış ve elde edilen nümerik sonuçların, deney sonuçlarıyla uyumlu olduğu rapor edilmiştir.

**Tablo 1.10:** Qi ve diğ. (2018)'de incelenen kiriş ve UYPLB özellikleri.

Kiriş No	Kesit Özellikleri			Malzeme Özellikleri										E	a <sub>g</sub> /d	M <sub>maks</sub> <sup>d</sup>	
				Beton		Donatı				Lif Özellikleri							
	b	h	f <sub>cu</sub>	E <sub>c</sub>	f <sub>y</sub>	Ç.D		B.D		T <sub>f</sub>	l <sub>f</sub>	d <sub>f</sub>	ρ <sub>f</sub>				
						c <sub>c</sub>	A <sub>s</sub>	c <sub>c</sub> '	A <sub>s</sub> '								
1	D	120	140	116	43	890	20	101	20	101	S	13	0.2	2	Var	3.17	11.8
2	D	120	140	96	42	890	20	101	20	101	S	13	0.2	0.5	Var	3.17	11.2
3	D	120	140	94	47	890	20	101	20	101	S	13	0.2	1	Var	3.17	11.2
4	D	120	140	116	43	761	20	226	20	101	S	13	0.2	2	Var	3.17	21.5
5	D	120	140	116	43			Yok			S	13	0.2	2	Var	3.17	4.2
6	D	120	140	121	46	890	20	101	20	101	S	6	0.2	2	Var	3.17	12.9
7	D	120	140	113	47	890	20	101	20	101	S	30	0.6	2	Var	3.17	14.6
8	D	120	140	117	42	890	20	101	20	101	S	13	0.2	2	Var	3.17	---
9	D	120	140	136	48	890	20	101	20	101	S	13	0.2	2	Var	3.17	14.1

*Chen ve diğ. (2018)*'de UYPLB'li kirişlerin eğilme davranışı deneysel olarak incelenmiş ve eğilme kapasitesinin belirlenmesi için nümerik bir yaklaşım önerilmiştir. Önerilen yaklaşıma ait detaylar Bölüm 3.3.3'de verilmiştir. Yapılan deneysel çalışmada, düşük ve yüksek donatı oranlarına (0.01-0.05) sahip UYPLB ile üretilen 4 adet dikdörtgen enkesitli kiriş üzerinde donatı oranının UYPLB'li kirişlerin eğilme davranışına olan etkisi incelenmiştir (Tablo 1.11). Çalışma sonucunda, lifler sıyrılmaya başlamadan önce çok sayıda küçük çatlak oluşurken, lifler sıyrılmaya başladıktan sonra tek sayıda lokalleşen büyük bir çatlak oluştuğu gözlemlenmiştir. Donatı oranının artmasıyla beraber yük kapasitesinde artış elde edilmiştir. En yüksek ve en düşük donatı oranındaki deplasman sünekliliği, diğer donatı oranlarından daha düşük elde edilmiştir. Çalışmada ayrıca, önerilen nümerik yaklaşım test kirişlerine ve literatürdeki başka bazı çalışmalara ait kiriş önerilerine uygulanmış ve oldukça uyumlu sonuç verdiği rapor edilmiştir.

**Tablo 1.11:** Chen ve diğ. (2018)'de incelenen kiriş ve UYPLB özellikleri.

Kiriş No	Kesit Özellikleri			Malzeme Özellikleri								Etriye	a <sub>k</sub> /d	M <sub>max</sub> <sup>d</sup>
				Beton	Donatı		Lif Özellikleri							
	f <sub>cu</sub>	f <sub>y</sub>	Ç.D		T <sub>f</sub>	l <sub>f</sub>	d <sub>f</sub>	ρ <sub>f</sub>						
			c <sub>c</sub>	A <sub>s</sub>										
1	D	150	220	126	461	32	308	S	13	0.2	2	Var	3.16	43.3
2	D	150	220	126	417	36	760	S	13	0.2	2	Var	3.16	71.4
3	D	150	220	126	456	38	982	S	13	0.2	2	Var	3.16	90.4
4	D	150	220	126	456	38	982	S	13	0.2	2	Var	3.16	105.9
					417	68	380							

*Hasgul ve diğ. (2018)*'de düşük ve yüksek donatı oranına sahip 4 adet lifsiz ve 4 adet lifli olmak üzere toplam 8 adet dirdörtgen enkesitli kiriş üzerinde donatı oranının eğilme davranışına olan etkisi deneysel olarak incelenmiştir (Tablo 1.12). Dört noktalı eğilme testleri uygulanan çalışmada lifli ve lifsiz test sonuçları karşılaştırılarak çalışma sonucunda, lif kullanımının eğilme kapasite, süneklik, rijitlik ve çatlak davranışları üzerindeki etkileri belirlenmiştir. Lif kullanımının eğilme kapasitesine olan katkısının donatı oranı arttıkça azaldığı, sünekliğin ise donatı oranı ile arttığı rapor edilmiştir. Liflerin eğilme rijitliğine de katkı sağladığı gösterilmiştir. Lif kullanımıyla kirişin elastik davranış bölgesindeki çatlak genişliklerinin azaldığı ancak, maksimum yük sonrası çatlakların bir noktada lokalleşmesinden dolayı arttığı gözlenmiştir. Çalışmada aynı zamanda, ACI544 (2009)'da geleneksel lifli betonarme için önerilen tasarım yaklaşımı UYPLB için geliştirilerek deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Önerilen yaklaşımın deneysel sonuçlarla oldukça uyumlu olduğu rapor edilmiştir.

**Tablo 1.12:** Hasgul ve diğ. (2018)'de incelenen kiriş ve UYPLB özellikleri.

Kiriş No	Kesit Özellikleri			Malzeme Özellikleri								Etriye	a <sub>k</sub> /d	M <sup>d</sup> <sub>maks</sub>
				Beton	Donatı			Lif Özellikleri						
	f <sub>cu</sub>	f <sub>y</sub>	Ç.D		T <sub>f</sub>	l <sub>f</sub>	d <sub>f</sub>	ρ <sub>f</sub>						
			c <sub>c</sub>	A <sub>s</sub>										
1	D	150	250	137	469	27	308					Var	3.18	37.5
2	D	150	250	133	462	30	628					Var	3.18	65.5
3	D	150	250	135	491	32	904			Lifsiz		Var	3.18	96.4
4	D	150	250	146	468	30	628					Var	3.18	111.6
					471	70	628							
5	D	150	250	157	453	27	308	S	13	0.16	2	Var	3.18	55.6
6	D	150	250	167	463	30	628	S	13	0.16	2	Var	3.18	89.8
7	D	150	250	157	456	32	904	S	13	0.16	2	Var	3.18	111.9
8	D	150	250	166	465	30	628	S	13	0.16	2	Var	3.18	134.4
					465	70	628							

**Liu ve diğ. (2019)**'da UYPLB'li kirişlerin eğilme davranışı deneysel olarak incelenmiş ve Model Code (2010), AFGC (2013) ve SFIT (2016) yönetmelikleri deneysel kirişler üzerinde uygulanmıştır. Çalışmada ayrıca eğilme kapasitelerinin belirlenmesi için nümerik çalışma yapılmış ve nümerik bir yaklaşım önerilmiştir. Bu yaklaşıma ait detaylar Bölüm 3.3.4'de verilmiştir. Yapılan deneysel çalışmada, farklı donatı oranlarına sahip 4 adet, farklı donatı sınıfına sahip 1 adet olmak üzere, 5 adet T enkesitli betonarme kiriş dört noktalı eğilme test düzeneği kullanılarak incelenmiştir (Tablo 1.13). Çalışma sonucunda, belirli bir orana kadar donatı artışıyla yük taşıma kapasitesi ve deplasman kapasitesinin arttığı, yüksek donatı oranlarında bu artışın azaldığı belirtilmiştir. Nümerik çalışmada incelenen yöntemler arasında, Model Code (2010)'un deney sonuçlarına göre en uyumsuz sonucu verdiği, çalışmada önerilen yöntemin ise deney sonuçlarıyla oldukça uyumlu olduğu belirtilmiştir.

**Tablo 1.13:** Liu ve diğ. (2018)'de incelenen kiriş ve UYPLB özellikleri.

Kiriş No	Kesit Özellikleri					Malzeme Özellikleri							E	ak/d	M <sup>d</sup> <sub>maks</sub>	
						Beton		Donatı			Lif Özellikleri					
	Kesit Tipi	b	h	b <sub>1</sub>	t <sub>f</sub>	f <sub>cu</sub>	E <sub>c</sub>	f <sub>y</sub>	Ç.D		T <sub>f</sub>	l <sub>f</sub>				d <sub>r</sub>
c <sub>c</sub>									A <sub>s</sub>							
1	T	120	360	320	60	157	48.9	430	34	763	S	13	0.2	Var	2.9	173
2	T	120	360	320	60	155	48.9	430	35	628	S	13	0.2	Var	2.9	236.5
								430	65	628						
3	T	120	360	320	60	155	48.9	430	35	942	S	13	0.2	Var	2.9	286.5
								430	65	603						
4	T	120	360	320	60	155	48.9	430	36	1140	S	13	0.2	Var	2.9	297.3
								430	66	760						
5	T	120	360	320	60	155	48.9	600	35	628	S	13	0.2	Var	2.9	281.6
								600	65	628						

$b_1$  : Enkesit tabla genişliği,  $t_f$  : Enkesit tabla kalınlığı,  $T$  : T enkesitli.

**Gümüş ve Arslan (2019)**'da lif tipi (karbon, çelik), lif hacmi ve donatı oranının UYPLB'li kirişlerin eğilme davranışına olan etkisi düşük donatı oranlarına sahip 18 adet dikdörtgen enkesitli betonarme kiriş üzerinde incelenmiştir (Tablo 1.14). Çalışma sonucunda, her iki lif tipi (karbon, çelik) için lif oranı arttıkça çatlak sayılarının azaldığı bu nedenle kirişlerin sünekliğinin azaldığı belirtilmiştir. Lif kullanımıyla eleman yük kapasitesinde en yüksek donatı oranı hariç lif oranıyla doğrusal olarak artış sağlandığı gözlenmiştir. Çelik lif kullanımının akma yükünde artış sağladığı, karbon lifin ise akma yükünde önemli bir etkisinin olmadığı belirtilmiştir. Kirişlerde donatı oranı artımının eğilme kapasitelerinde önemli bir artış sağladığı, çatlama yüküne etkisinin ise çok az olduğu rapor edilmiştir. Karbon liflerde çekme dayanımının yüksek olmasına rağmen kırılma enerjisinin çelik life oranla düşük olmasından dolayı, kirişlerde karbon lif yerine çelik lif kullanılması tavsiye edilmiştir. Çalışmada ayrıca, UYPLB içeren kirişlerin minimum donatı oranının hesaplanması için bir denklem önerilmiştir.

**Tablo 1.14:** Gümüş ve Arslan (2019)'da incelenen kiriş ve UYPLB özellikleri.

Kiriş No	Kesit Özellikleri		Malzeme Özellikleri										E	a <sub>k</sub> /d	M <sup>d</sup> <sub>maks</sub>
			Beton		Donatı			Lif Özellikleri							
	Kesit Tipi	b	h	f <sub>cu</sub>	E <sub>c</sub>	f <sub>y</sub>	Ç.D		T <sub>f</sub>	l <sub>f</sub>	d <sub>f</sub>	ρ <sub>f</sub>			
						c <sub>c</sub>	A <sub>s</sub>								
1	D	150	200	105.8	39.8	500	--	51					Var	2.5	5.4
2	D	150	200	105.8	39.8	500	--	99		Lifsiz			Var	2.5	9.6
3	D	150	200	105.8	39.8	500	--	150					Var	2.5	18.8
4*	D	150	200	117.8	44.8	500	--	51					Var	2.5	7.1
5*	D	150	200	117.8	44.8	500	--	99	S	6	0.0072	0.4	Var	2.5	11.6
6*	D	150	200	117.8	44.8	500	--	150					Var	2.5	17.3
7*	D	150	200	118.3	47.6	500	--	51					Var	2.5	10.5
8*	D	150	200	118.3	47.6	500	--	99	S	6	0.0072	0.7	Var	2.5	12.1
9*	D	150	200	118.3	47.6	500	--	150					Var	2.5	15.8
10**	D	150	200	126.7	40	500	--	51					Var	2.5	8.2
11**	D	150	200	126.7	40	500	--	99	H	30	0.6	0.3	Var	2.5	10.3
12**	D	150	200	126.7	40	500	--	150					Var	2.5	16.5
13**	D	150	200	120.3	41.1	500	--	51					Var	2.5	7.6
14**	D	150	200	120.3	41.1	500	--	99	H	30	0.6	0.7	Var	2.5	11.6
15**	D	150	200	120.3	41.1	500	--	150					Var	2.5	16.5
16**	D	150	200	109.2	43.4	500	--	51					Var	2.5	11.6
17**	D	150	200	109.2	43.4	500	--	99	H	30	0.6	1	Var	2.5	13.1
18**	D	150	200	109.2	43.4	500	--	150					Var	2.5	16.4

\*: Bu kirişlerde karbon lif kullanılmıştır. \*\*: Bu kirişlerde çelik lif kullanılmıştır.

**Turker ve diğ. (2019a)**'da UYPLB'li kirişlerin eğilme davranışı düşük ve yüksek donatı oranlarına sahip sekiz adet kiriş üzerinde deneysel olarak incelenmiştir (Tablo 1.15). Düşük donatı oranına sahip kirişlerde, lif kullanımının süneklik bakımından azalmaya neden olduğu, ancak tüm kirişlerin yeterli sünekliği sağladığı gözlemlenmiş ve donatı oranı arttıkça liflerin taşıma kapasitesine olan katkısının azaldığı belirtilmiştir. Lif kullanımı eleman eğilme rijitliğinde %10'luk bir artış sağlarken, donatı oranı ile eğilme rijitliği arasında bir eğilim tespit edilmemiştir. Elastik davranış bölgesinde lif kullanımı çatlak genişliklerini azaltmakla birlikte, plastik davranış bölgesinde çatlak genişlikleri referans kirişlerine oranla önemli oranda artmıştır.

**Tablo 1.15:** Turker ve diğ. (2019a)'da incelenen kiriş ve UYPLB özellikleri.

Kiriş No	Kesit Özellikleri			Malzeme Özellikleri							Etriye	a/d	M <sup>d</sup> <sub>maks</sub>	
	Kesit Tipi	b	h	Beton	Donatı			Lif Özellikleri						
				f <sub>cu</sub>	f <sub>y</sub>	Ç.D		T <sub>f</sub>	l <sub>f</sub>	d <sub>f</sub>				ρ <sub>f</sub>
c <sub>c</sub>	A <sub>s</sub>													
1	D	150	250	137	469	27	308					Var	3.18	37.5
2	D	150	250	133	462	30	628					Var	3.18	65.5
3	D	150	250	135	491	32	904			Lifsiz		Var	3.18	96.4
4	D	150	250	146	468	30	628					Var	3.18	111.6
					471	70	628							
5	D	150	250	169	445	27	308					Var	3.18	51.3
6	D	150	250	150	471	30	628					Var	3.18	88.6
7	D	150	250	164	460	32	904	S	13	0.16	1	Var	3.18	106.3
					471	30	628	H	60	0.75	0.5			
8	D	150	250	167	471	70	628					Var	3.18	127.6
					471	70	628							

*Turker ve diğ. (2019b)*'de UYPLB'li kirişlerin eğilme davranışı deneysel olarak incelenmiş ve eğilme kapasitesinin belirlenmesi için nümerik bir yaklaşım önerilmiştir. Önerilen yaklaşıma ait detaylar, Bölüm 3.3.5'da verilmiştir. Yapılan deneysel çalışmada, hibrit lif kullanımının UYPLB'li kirişlerin eğilme davranışına etkisi düşük ve yüksek donatı oranlarına sahip 12 adet kiriş üzerinde incelenmiştir (Tablo 1.16). Bu 12 kirişin dördü lifsiz, dördü mono lifli, dördü hibrit lifliden oluşmaktadır. Çalışmada, deplasman ve eğilme sünekliği, eğilme rijitliği, eğilme momenti kapasitesi ve çatlak davranışı incelenmiştir. Çalışma sonucunda, düşük donatı oranlarında lif kullanımının hem mono hem de hibrit lifte eğilme rijitliğini önemli miktarda arttırdığı, donatı oranı arttıkça bu etkinin azaldığı belirtilmiş ayrıca eğilme rijitliği bakımından mono lifin, hibrit life göre daha etkin olduğu rapor edilmiştir. Mono lif, hibrit life göre daha fazla olmak üzere lif kullanımının yük kapasitesinde artış sağladığı belirtilmiştir. En yüksek donatı oranı hariç donatı oranı artımı deplasman sünekliğinde artış sağlamıştır. Elastik davranış bölgesinde lif kullanımı çatlak genişliklerini azaltmakla birlikte, plastik davranış bölgesinde çatlak genişlikleri referans kirişlerine oranla önemli oranda artmıştır. Çalışmada ayrıca, mevcut tasarım kodlarındaki donatı oranlarının üstünde donatı kullanımının en olumlu sonuçları verdiği belirtilmiştir. Önerilen nümerik model, bu çalışmadaki ve literatürdeki kirişler üzerinde uygulamış ve oldukça uyumlu sonuç verdiği rapor edilmiştir.

**Tablo 1.16:** Turker ve diğ. (2019b)'de incelenen kiriş ve UYPLB özellikleri.

Kiriş No	Kesit Özellikleri			Malzeme Özellikleri								E	a <sub>k</sub> /d	M <sup>d</sup> <sub>maks</sub>			
				Beton			Donatı				Lif Özellikleri						
	Kesit Tipi	b	h	f <sub>cu</sub>	E <sub>c</sub>	f <sub>y</sub>	Ç.D		B.D		T <sub>f</sub>				l <sub>f</sub>	d <sub>f</sub>	ρ <sub>f</sub>
							c <sub>c</sub>	A <sub>s</sub>	c <sub>c</sub> '	A <sub>s</sub> '							
1	D	150	250	145	42	458	27	308	20	157				Var	3.18	37.4	
2	D	150	250	145	42	462	30	628	20	308				Var	3.18	73	
3	D	150	250	145	42	492	32	904	20	402		Lifsiz		Var	3.18	95	
4	D	150	250	145	42	468	30	628	20	628				Var	3.18	113.7	
						468	70	628	20	628							
5	D	150	250	158	45	453	27	308	20	157				Var	3.18	52.8	
6	D	150	250	158	45	467	30	628	20	308				Var	3.18	87.7	
7	D	150	250	158	45	451	32	904	20	402	S	13	0.2	1.5	Var	3.18	111.7
8	D	150	250	158	45	462	30	628	20	628				Var	3.18	127.4	
						462	70	628	20	628							
9	D	150	250	164	43	445	27	308	20	157				Var	3.18	48.2	
10	D	150	250	164	43	469	30	628	20	308				Var	3.18	84.8	
11	D	150	250	164	43	460	32	904	20	402	S	13	0.16	1	Var	3.18	107.2
						455	30	628	20	628	H	60	0.75	0.5			
12	D	150	250	164	43	455	70	628	20	628				Var	3.18	120.2	
						455	70	628	20	628							

Literatürdeki çalışmalarda, UYPLB'nin eğilme davranışında genel olarak donatı oranı ve lif parametrelerinin (tipi, uzunluğu, hacmi) etkin olduğu belirtilmiş ve eğilme davranışı genellikle, eğilme kapasitesi, çatlama yükü, eğilme rijitliği, çatlak davranışı vb. parametreler üzerinden değerlendirilmiştir. Yapılan deneysel çalışmalarda, genellikle dikdörtgen enkesitli elemanlar kullanılmıştır. UYPLB kirişlerin eğilme kapasitelerinin belirlenmesi için önerilen nümerik modellerde ise genel olarak geleneksel betonarmedeki şekildeğiştirme durumlarının kullanıldığı ve bunların deneysel sonuçlarla doğrulamalarının yapılmadığı görülmüştür. Sonuç olarak, prefabrik üretim için çok uygun olan UYPLB'nin, prefabrik sektörde yaygın kullanılan I enkesitli kirişlerde kullanımına yönelik benzer çalışmalara ihtiyaç olduğu görülmüştür.



## 1.2 Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Bu çalışmada, I enkesitli betonarme kirişlerde normal dayanımlı (geleneksel) ve yüksek dayanımlı betonlara alternatif olarak UYPLB kullanımının sağladığı avantaj ve dezavantajların ortaya konması amaçlanmıştır. Bununla birlikte deneysel sonuçlardan yararlanarak, UYPLB içeren kirişlerin eğilme davranışının nümerik modellenmesinde gelinen noktanın değerlendirilmesi hedeflenmiştir.

Çalışmanın deneysel bölümünde, kirişteki çekme donatısı oranı ve UYPLB'deki çelik lif oranı bakımından parametrik bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, Geleneksel Beton (GB), lifsiz Ultra Yüksek Dayanımlı Beton (UYDB) ve UYPLB olmak üzere 3 farklı beton ile üretilmiş betonarme kirişler kullanılmıştır. Kirişler eğilme testine tabi tutularak yük-deplasman davranışları, kırılma şekilleri, süneklikler (deplasman ve eğrilik), çatlak davranışları ve beton/donatı şekildeğiştirme davranışları incelenmiştir. Deneysel çalışma kapsamında 32 adet betonarme kiriş eğilme testi ve UYPLB'nin mekanik özelliklerinin belirlenmesi için malzeme ölçeğinde basınç ve eğilme testleri gerçekleştirilmiştir.

Çalışmanın nümerik bölümünde, UYPLB içeren kirişlerin eğilme kapasitelerinin hesabına yönelik literatürde önerilen 5 farklı yaklaşım ve AFGC (UYPLB-Öneriler, 2013) tasarım kılavuzunda önerilen eğilme tasarım prosedürü test kirişlerine uygulanmış ve deneysel bulgularla (eğilme kapasiteleri, şekildeğiştirme davranışları) karşılaştırılarak kullanılabilirlikleri değerlendirilmiştir.

## 2. KİRİŞLERİN EĞİLME DAVRANIŞI ÜZERİNE DENEYSEL ÇALIŞMA

DeneySEL çalışma kapsamında, Ultra Yüksek Performanslı Lifli Beton (UYPLB), lifsiz Ultra Yüksek Dayanımlı Beton (UYDB) ve Geleneksel Beton (GB) içeren toplam 32 adet “T” enkesitli betonarme kiriş numunesi üzerinde parametrik incelemeler yapılmıştır. Ayrıca, UYPLB’nin mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla malzeme ölçeğinde beton basınç ve eğilme testleri yapılmıştır. Testler Balıkesir Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Prof. Dr. Şerif SAYLAN Yapı Mekaniği Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir (Şekil 2.1). Çalışmanın deney programı, beton üretimi, kirişlerin hazırlanması, kürlenmesi, eğilme testleri ve malzeme testleri aşamalarından oluşmaktadır. Tüm bu aşamalar aşağıda detaylı olarak anlatılmıştır.



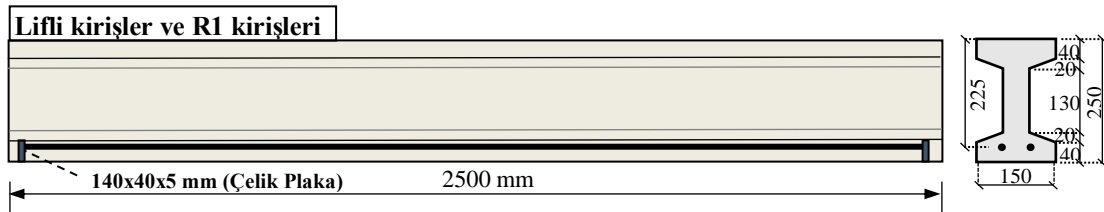
Şekil 2.1: BAUN-MF Yapı Mekaniği Laboratuvarı.

### 2.1 Betonarme Test Kirişlerinin Özellikleri

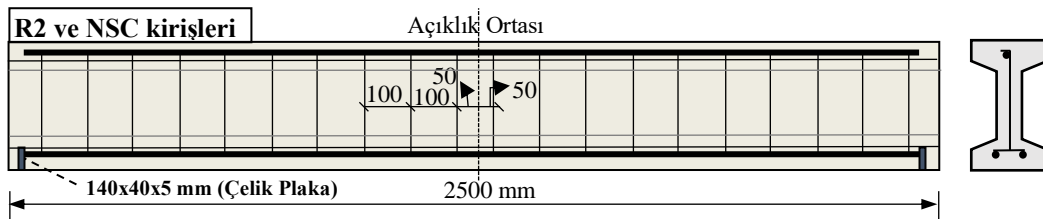
Kirişler çekme donatısı oranlarına göre 4 gruba (G1, G2, G3 ve G4) ayrılmıştır. Donatı oranları belirlenirken geleneksel betonarme kirişlerdeki düşük ve yüksek donatı oranlarının temsil edilmesi hedeflenmiştir. Buna göre G1 en düşük oranı ( $\rho=0.008$ ), G4 en yüksek oranı ( $\rho=0.022$ ), G2 ve G3 grupları ise ara donatı oranlarını temsil etmektedir (TS 500, 2000). Her bir grupta 4 farklı oranda (%1.0, 1.5, 2.0, 2.5) çelik lif içeren UYPLB kiriş ve 4 adet referans (kontrol) kirişi olmak üzere toplam 8 kiriş bulunmaktadır. Kiriş numunelerinin özellikleri Şekil 2.2-2.4 ve Tablo 2.1’de verilmiştir. UYPLB kirişlerde enine donatı (etriye) ve basınç donatısı bulunmamaktadır. Çelik lif içermeyen referans kirişleri ise enine donatı ve basınç

donatısı bakımından farklılıklar içermektedir. NSC ve R1, R2, R3 kodları ile tanımlanan referans kirişlerinin donatı içerikleri ve çalışmadaki kullanım amaçları aşağıda açıklanmıştır. Test kirişlerinin kodları Şekil 2.5’de verilmiştir.

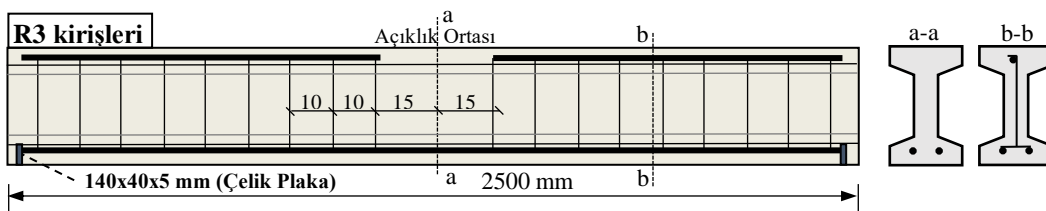
- **Geleneksel betonlu, enine ve basınç donatısı bulunan referans kirişleri (NSC):** UYPLB’nin geleneksel betona göre avantajlarını belirlemek amacıyla üretilmiştir (Şekil 2.3).
- **Lifsiz, enine ve basınç donatısız referans kirişleri (R1):** Lif oranının kesme kuvveti ve eğilme momenti taşıma kapasitelerine olan katkısını değerlendirebilmek amacıyla lifsiz Ultra Yüksek Dayanımlı Beton (UYDB) ile üretilmiştir (Şekil 2.2).
- **Lifsiz, enine ve basınç donatısı bulunan referans kirişleri (R2):** Lifsiz durumdaki maksimum kesme kuvveti ve moment taşıma kapasitelerini belirlemek amacıyla UYDB ile üretilmiştir (Şekil 2.3).
- **Lifsiz, salt eğilme bölgesinde enine ve basınç donatısı bulunmayan referans kirişleri (R3):** Çelik lif oranının basınç bölgesindeki betonun sünekliğine katkısını değerlendirmek amacıyla UYDB ile üretilmiştir (Şekil 2.4).



Şekil 2.2: Enine ve basınç donatısı bulunmayan test kirişlerinin donatı detayları.



Şekil 2.3: Enine ve basınç donatılı referans kirişlerinin donatı detayları.

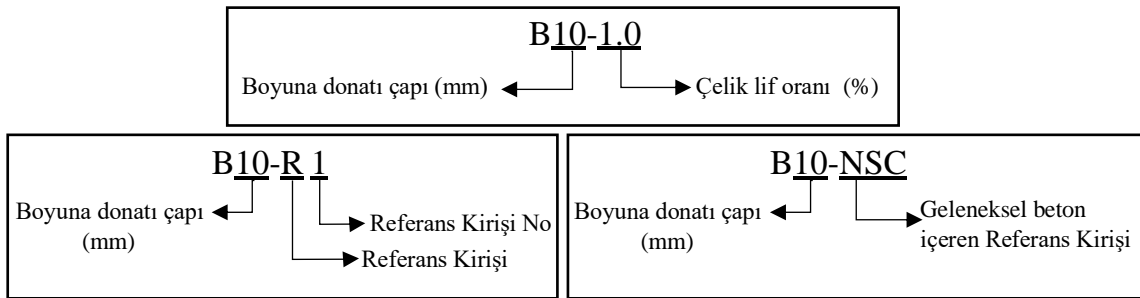


Şekil 2.4: Salt eğilme bölgesinde enine ve basınç donatısı bulunmayan referans kirişlerinin donatı detayı.

**Tablo 2.1:** Çalışma kapsamında incelenecek kirişlerin kodları, lif içerikleri ve donatıları.

Grup No	Numune Kodu	Lif Oranı (%)	Çekme Donatısı / Oranı (%)	Basınc Donatısı	Enine Donatı
G1	B10-NSC	-		1φ10	φ8/10
	B10-R1	-		-	-
	B10-R2	-		1φ10	φ8/10
	B10-R3	-	2φ10 / (0.8)	-	φ8/10*
	B10-1.0	1.0		-	-
	B10-1.5	1.5		-	-
	B10-2.0	2.0		-	-
	B10-2.5	2.5		-	-
G2	B12-NSC	-		1φ12	φ8/10
	B12-R1	-		-	-
	B12-R2	-		1φ12	φ8/10
	B12-R3	-	2φ12 / (1.2)	-	φ8/10*
	B12-1.0	1.0		-	-
	B12-1.5	1.5		-	-
	B12-2.0	2.0		-	-
	B12-2.5	2.5		-	-
G3	B14-NSC	-		1φ14	φ8/10
	B14-R1	-		-	-
	B14-R2	-		1φ14	φ8/10
	B14-R3	-	2φ14 / (1.7)	-	φ8/10*
	B14-1.0	1.0		-	-
	B14-1.5	1.5		-	-
	B14-2.0	2.0		-	-
	B14-2.5	2.5		-	-
G4	B16-NSC	-		1φ16	φ8/10
	B16-R1	-		-	-
	B16-R2	-		1φ16	φ8/10
	B16-R3	-	2φ16 / (2.2)	-	φ8/10*
	B16-1.0	1.0		-	-
	B16-1.5	1.5		-	-
	B16-2.0	2.0		-	-
	B16-2.5	2.5		-	-

\*Sadece kesme açıklığında etriye mevcut.



**Şekil 2.5:** Test kirişlerine ait kodların açıklanması.

Tüm donatılar için S420 sınıfı çelik kullanılmıştır. Çekme donatılarında “I” enkesit nedeniyle kanca uygulaması yapılamadığından, kenetlenme için donatı uçlarına çelik plakalar kaynaklanmıştır. Basınç donatılı kirişlerde çekme donatısı oranının yarısı kadar basınç donatısı kullanılmıştır. Enine donatı olarak “I” enkesitin gövdesinde 10 cm aralıklarla  $\Phi 8$ 'lik tek kollu donatı kullanılmıştır. Bu donatıları bağlayabilmek için çekme donatıları üzerine aynı aralıklarla enine doğrultuda donatılar kaynaklanmış, gövde donatıları bu donatılara ve üst başlıktaki basınç donatısına nokta kaynağı ile bağlanmıştır (Şekil 2.6).

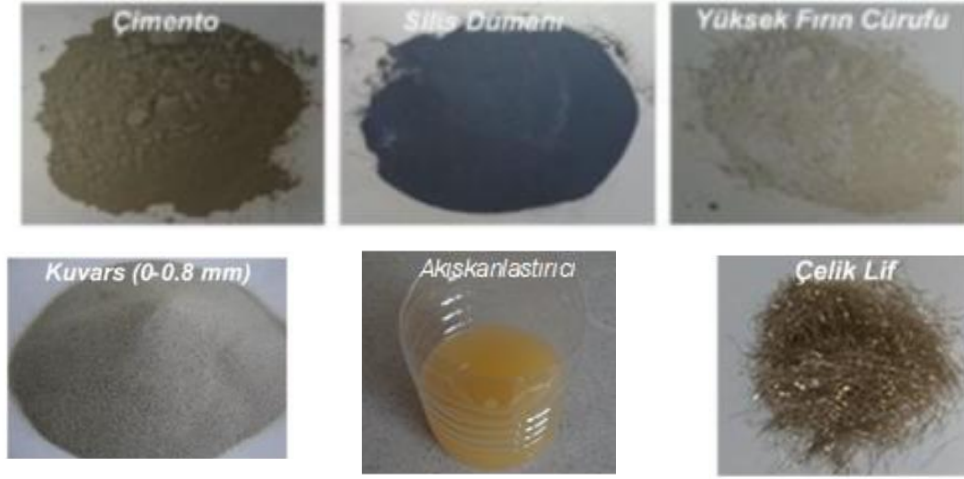


**Şekil 2.6:** Test kirişlerinde kullanılan çekme, basınç ve enine donatıları, donatının kalıp içindeki yerleşimi.

## 2.2 UYPLB'nin Özellikleri

Çalışmada, test kirişleri için 28 günlük ortalama basınç dayanımı 150 MPa'yı sağlayan UYPLB'nin kullanılması planlanmıştır. Betonun bağlayıcı kısmı CEM I 42.5 R sınıfı portland çimentosu, silis dumanı ve yüksek fırın cürufundan oluşmaktadır. Agrega olarak yüksek dayanımlı kuvars agregası kullanılmıştır. UYPLB çok düşük su/bağlayıcı oranına sahip olduğundan, betonun işlenebilirliğinin sağlanması için polikarbosilik eter esaslı süper akışkanlaştırıcı katkı kullanılmıştır.

Çalışmada “I” enkesitli betonarme elemanlar inceleneceği için betonun yerleşebilirliği önem arz etmektedir. Bu nedenle çelik lif olarak, diğer lif tiplerine göre işlenebilirliği daha yüksek olan 13/0.16 mm'lik düz mikro lifler kullanılmıştır. Çelik lifin çekme dayanımı 2500 MPa, elastisite modülü 210000 MPa'dır. Betonu oluşturan bileşenler Şekil 2.7'de, bu bileşenlerin kullanım miktarları Tablo 2.2'de verilmiştir. Çalışmada, UYPLB için hazırlanan karışımlardan lif çıkarılarak elde edilen lifsiz beton, Ultra Yüksek Dayanımlı Beton (UYDB) olarak tanımlanmıştır.



**Şekil 2.7:** UYPLB üretiminde kullanılan bileşenler (ayrıca su kullanılmaktadır).

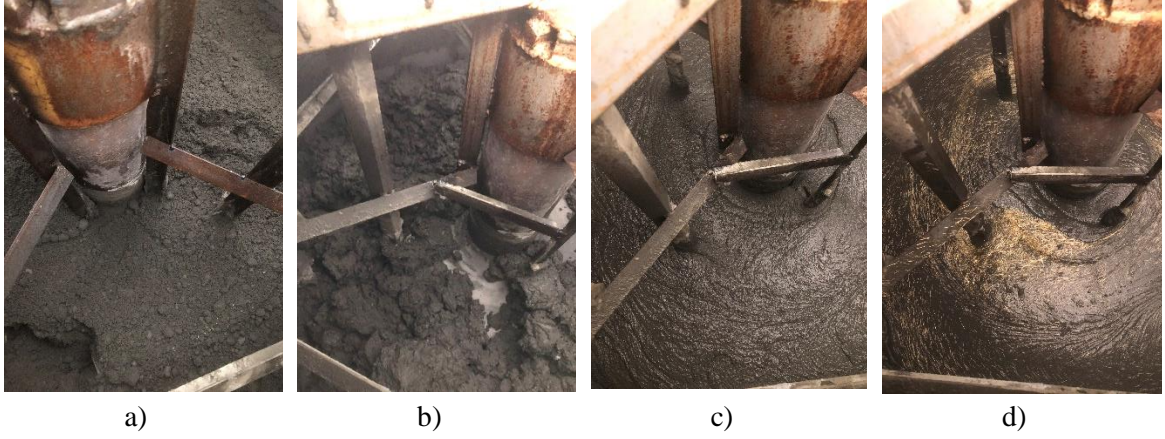
**Tablo 2.2:** UYPLB'yi oluşturan bileşen miktarları (kg/m<sup>3</sup>).

Bileşen Adı	Karışımdaki Çelik Lif Oranı (%)				
	0.0	1.0	1.5	2.0	2.5
Çimento	720	720	720	720	720
Silis Dumanı	240	240	240	240	240
Yüksek Fırın Cürufu	240	240	240	240	240
Agrega	890	865	852	838	825
Su	204	204	204	204	204
Akışkanlaştırıcı	23	23.64	23.64	24.28	24.28
Çelik Lif	0	78	117	156	195

### 2.3 Betonarme Test Kirişlerinin Hazırlanması

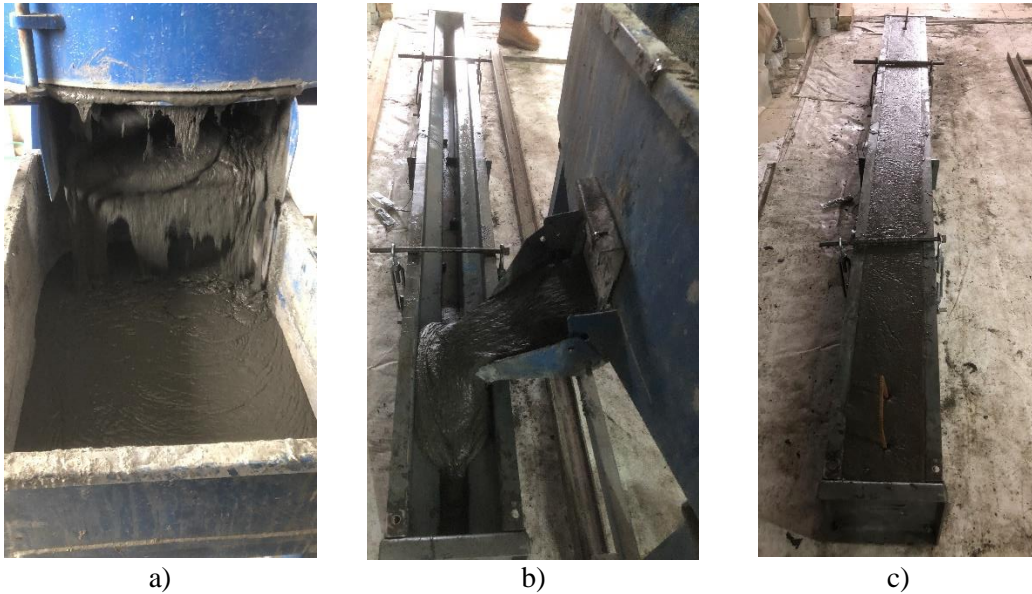
Beton için gerekli malzemeler karışım oranlarına göre tartıldıktan sonra bağlayıcı maddeler (çimento, silis dumanı ve yüksek fırın cürufu) ve agrega (kuvars) panmikserde kuru olarak 50 devir/dakika hızla 3 dakika karıştırılmaktadır (Şekil 2.8a). Daha sonra akışkanlaştırıcı ile karıştırılmış olan su, kuru karışıma ilave edilerek aynı hızla 3 dakika daha karıştırılmaktadır (Şekil 2.8b). Topaklanma kıvamına gelen karışım, 3 dakika boyunca 100 devir/dakika hızla karıştırılmakta ve akıcı kıvam elde edilmektedir (Şekil 2.8c). Bu aşamada hız 50 devir/dakikaya düşürülerek çelik lifler karışıma ilave edilmektedir (Şekil 2.8d). 3 dakika daha karıştırılarak betonun karıştırma işlemi tamamlanmaktadır.





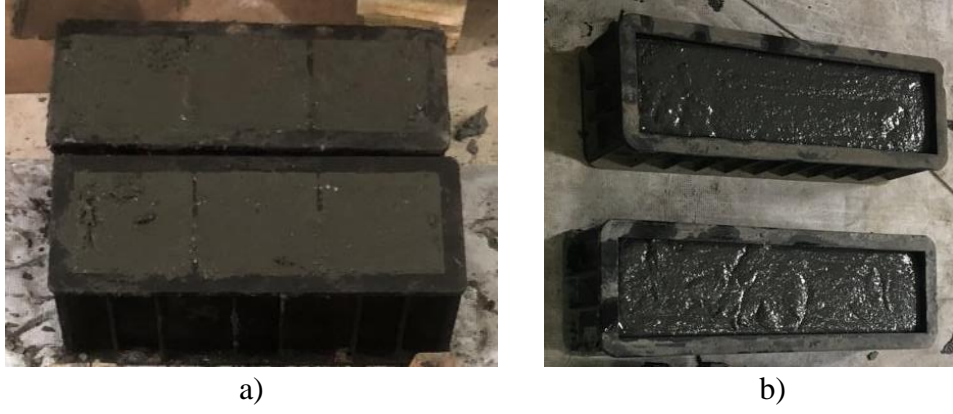
**Şekil 2.8:** UYPLB'nin hazırlanması aşamaları a) Kuru karışım, b) Topaklanma aşaması, c) Akışkan kıvam, d) Liflerin eklenmesi.

Hazırlanan lifli beton, özel bir beton arabası yardımıyla kiriş kalıplarına dökülmüştür (Şekil 2.9a). Beton akıcı kıvamda (kendiliğinden yerleşen) olduğu için ayrıca bir yerleştirme işlemi uygulanmasına gerek kalmamıştır.



**Şekil 2.9:** UYPLB'nin test kirişlerine dökümü a) Beton arabasına döküm, b) Kirişe döküm, c) Dökümü tamamlanan kiriş.

Hazırlanan betonun basınç ve eğilme/çekme dayanımlarını belirlemek amacıyla test kirişleri ile birlikte her bir kiriş için 3 adet 100x100x100 mm'lik küp numuneler ve 100x100x400 mm boyutlarında prizma numuneleri alınmıştır (Şekil 2.10).



**Şekil 2.10:** Beton basınç ve eğilme testleri için hazırlanan numuneler a) Beton basınç numuneleri, b) Prizma numuneleri.

Geleneksel beton içeren referans kirişleri (NSC) için 40-50 MPa basınç dayanımına sahip beton kullanılması planlanmıştır. Bunun için Tablo 2.3’de verilen bileşenler kullanılmış ve diğer beton için kullanılan panmikser ile üretim yapılmıştır (Şekil 2.11). Betonun kalıp içerisindeki yerleşimini sağlamak amacıyla vibratör uygulanmıştır. Test kirişi ile birlikte beton basınç dayanımı için 150x150x150 mm’lik küp numuneler hazırlanmıştır.

**Tablo 2.3:** Geleneksel beton için kullanılan bileşenler (kg/m<sup>3</sup>).

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



**Şekil 2.11:** Geleneksel beton içeren test kirişinin hazırlanması.



Hazırlanan test kirişleri ve numuneler döküm sonrası plastik bir örtü ile sarılarak bir gün kalıpta bekletilmiştir (Şekil 2.12). Daha sonra, kirişler ve numuneler kür kabine yerleştirilerek 90°C buharda bir gün kürlenmiştir (Şekil 2.13). Betonda termal şok yaşanmaması için kabin ısıtması sonlandırılarak bir gün süresince numunelerin soğuması sağlanmış ve kür kabinden çıkarılarak test gününe kadar (28-50 gün) laboratuvar ortamında bekletilmiştir (Şekil 2.12, 2.13).



**Şekil 2.12:** Döküm sonrası plastik örtü ile sarılan test kirişi.



**Şekil 2.13:** Test kirişlerinin ve numunelerin kür kabindeki görüntüsü.

Çalışmada üretilen UYPLB'nin vizkositesini ve yerleşebilirliğini ölçmek amacıyla lifsiz ve dört farklı lif oranı içeren karışımların her biri için  $T_{500}$  testi (ASTM C1611M-14, 2014) ve maksimum yayılma çapı ölçümleri yapılmıştır (Şekil 2.14).  $T_{500}$  testinde betonun 500 mm'lik çaptaki alana yayılması için geçen süre ölçülmüş, ayrıca beton yayılması tamamlanıncaya kadar beklenip maksimum yayılma çapları belirlenmiştir. Lifsiz ve dört farklı lif oranına sahip karışımlar için elde edilen ortalama sonuçlar Tablo 2.4'de verilmiştir.  $T_{500}$  süreleri ve maksimum yayılma çapı değerleri incelendiğinde üretilen UYPLB'nin kendinden yerleşebilir özellikte olduğu söylenebilmektedir (Tablo 2.4).



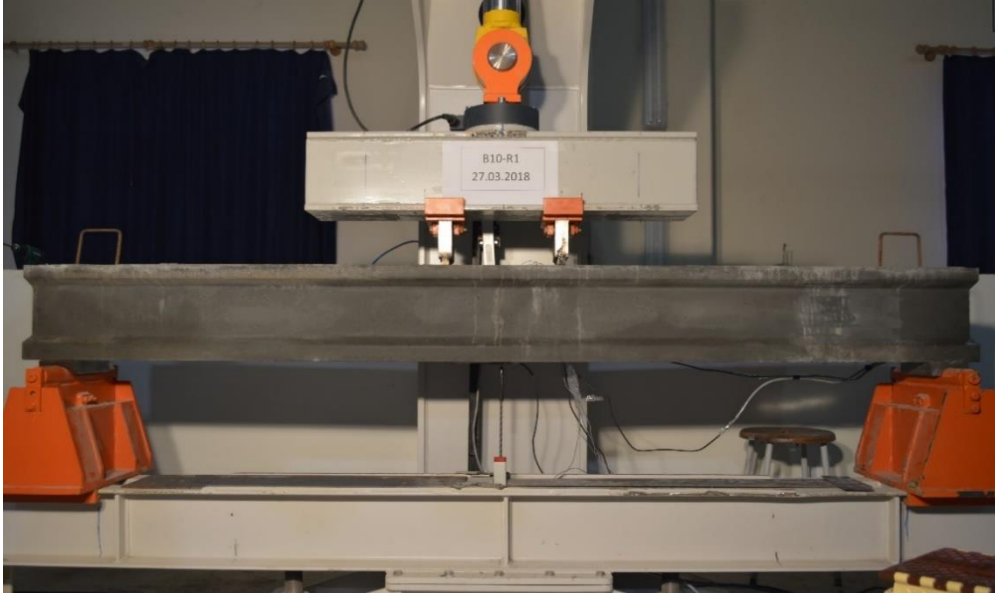
**Şekil 2.14:** Betonun yayılma süresinin ( $T_{500}$ ) ve çapının belirlenmesi.

**Tablo 2.4:** Lifsiz ve lifli karışımlar için kıvam testi sonuçları.

Ölçüm	Karışımdaki çelik lif oranı (%)				
	0.0	1.0	1.5	2.0	2.5
$T_{500}$ (sn)	2	3	3	3	4
Maksimum yayılma çapı (cm)	68	70	70	75	77

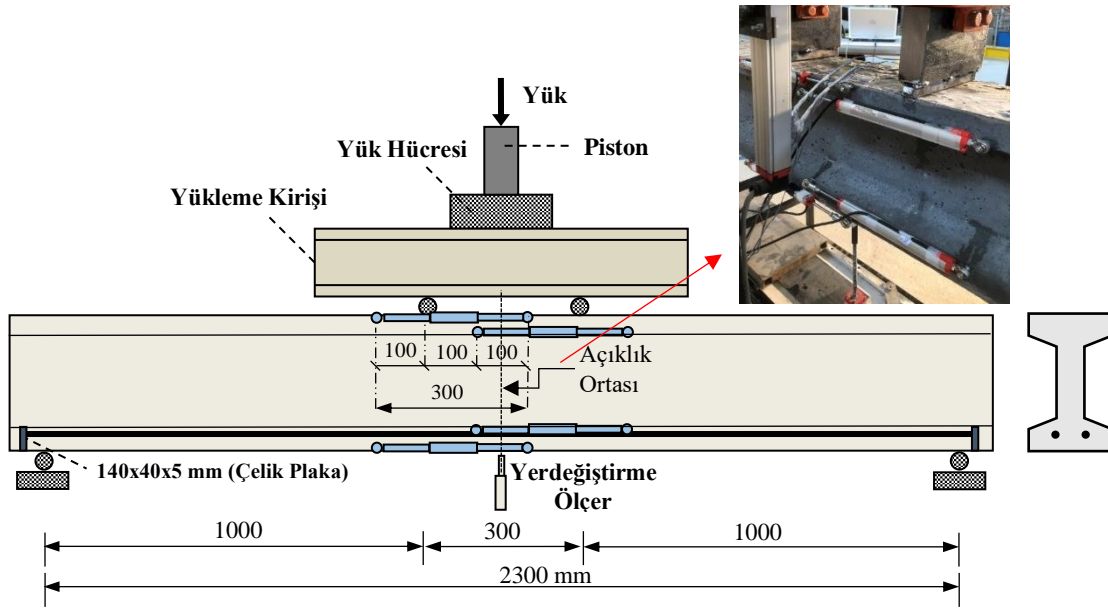
## 2.4 Test Düzeneği ve Yapılan Ölçümler

Kirişlerin eğilme testleri, Balıkesir Üniversitesi Yapı Mekaniği Laboratuvarı'nda bulunan dört noktalı eğilme test düzeneği ile yapılmıştır (Şekil 2.15). Düzenekte 500 kN kapasiteli ve deplasman kontrollü bir hidrolik yük veren bulunmaktadır. Kirişin sehimini (düşey deplasmanını) ölçmek üzere açıklık ortasına bir adet potansiyometrik cetvel ve yükü ölçmek üzere yük verenin altına bir adet yük hücresi yerleştirilmiştir. Yük, rijit bir çelik profil vasıtasıyla aralarında 300 mm olan iki tekil yüke dönüştürülerek kirişe uygulanmaktadır (Şekil 2.15).



**Şekil 2.15:** Dört noktalı eğilme testi düzeneği.

Kiriş orta bölgesindeki eğriliği (birim dönmeyi) belirlemek amacıyla dört adet potansiyometrik cetvel Şekil 2.16’da gösterildiği gibi kirişin alt ve üst başlıklarına yerleştirilmiştir. Potansiyometrik cetvellerin ikisi kirişin sol yarısında, diğer ikisi sağ yarısında 300 mm’lik bölgeyi ölçecek şekilde yerleştirilmiştir (Şekil 2.16). Böylece kiriş ortasında veya yükleme noktalarının altında oluşması muhtemel büyük çatlakların eğriliğe etkisinin gözönüne alınması amaçlanmıştır.



**Şekil 2.16:** Test kirişi ve eğrilik ölçüm düzeneği.



## 2.5 Malzeme Testleri ve Sonuçları

UYDB'li betonarme kirişlerde kullanılan betonun basınç dayanımı 100x100x100 mm'lik küp numunelerin aksenal basınç testleri ile belirlenmiştir (Graybeal ve Davis, 2008). Testler Balıkesir Üniversitesi Yapı Mekaniği Laboratuvarın'da bulunan 3000 kN kapasiteli basınç presi ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 2.19). Her bir kirişten alınan numuneler 28. gününde kırılmış ve elde edilen ortalama basınç dayanımları Tablo 2.5'de verilmiştir.



Şekil 2.19: Beton testi sonucu numunelerin kırılma şekilleri.

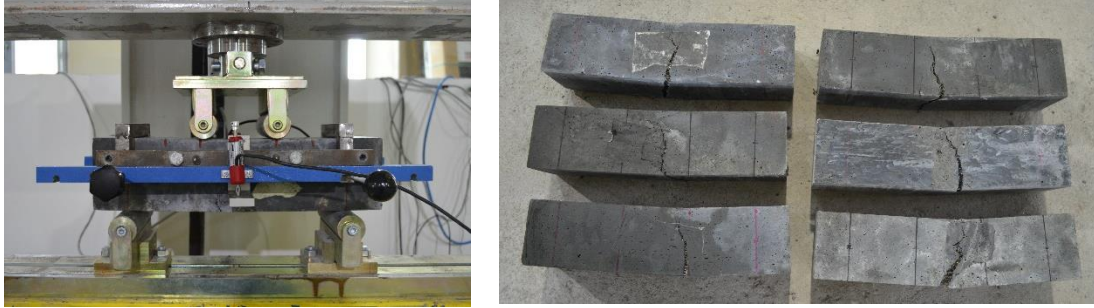
Tablo 2.5: Test kirişlerinin beton basınç dayanımları (MPa).

Kiriş Kodu	NSC	Lifsiz	UYPLB Lif Oranı (%)			
			1.0	1.5	2.0	2.5
G1	47.71	144.2	153.6	152.9	165.7	174.2
	45.73	147.1	153.3	156.6	167.1	174.4
	47.43	143.9	152.4	156.3	165.7	177.6
G2	55.3	147.4	161.3	165.2	169.8	175.8
	56.2	149.3	159.4	168.4	172.5	179.4
	54.3	146.4	159.7	163.4	167.7	171.1
G3	53.72	153.4	180.8	185.9	166.7	182.3
	51.48	155.9	183.5	186.3	172.7	176.8
	53.57	156.4	177.1	171.7	173.8	180.8
G4	48.4	146.6	159.5	153.1	164.1	163.1
	49.5	145.5	159.8	155.8	165.6	157.6
	52.4	143.9	156.1	152.1	161.2	159.9
<b>Ortalama</b>	51.3	148.3	163.0	164.0	167.7	172.8
<b>S.Sapma</b>	3.46	4.50	10.99	12.14	3.80	8.23

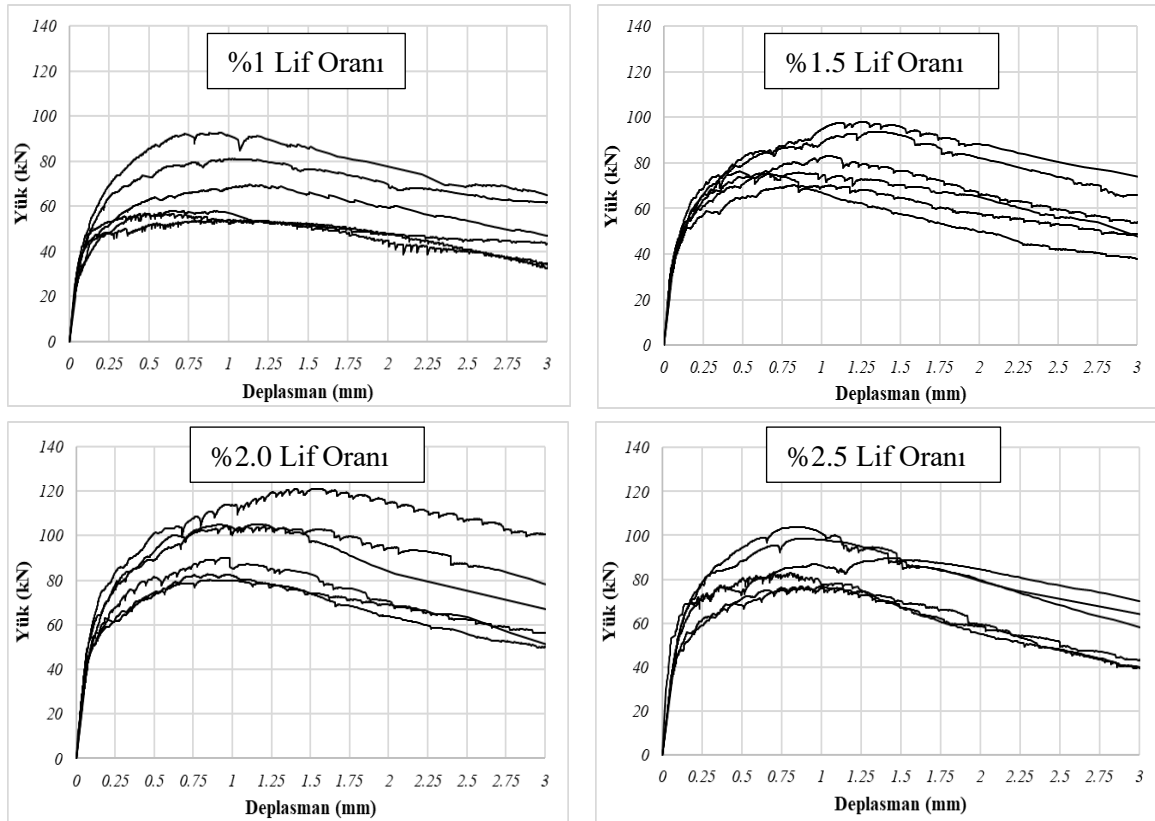
Çalışmada kullanılan UYPLB'nin aksenal çekme altındaki davranışını belirlemek için eğilme davranışından yararlanılmıştır. Bunun için test kirişleri ile birlikte hazırlanan prizma numunelerinden (100x100x400 mm) her bir lif oranı için 6 adedine dört noktalı eğilme testi uygulanmıştır. Testler Balıkesir Üniversitesi Yapı Mekaniği Laboratuvarında bulunan



eğilme test düzeneği ile yapılmıştır (Şekil 2.20). Elde edilen  $P-\delta$  ilişkileri Şekil 2.21’de verilmiştir. Bu eğilme davranışından Bölüm 3.1.2.2 ve Bölüm 3.1.2.3’de açıklanan geri analiz yöntemleriyle aksel çekme davranışlarına geçilmiştir.



Şekil 2.20: Eğilme testi sonucu prizma numunelerinin kırılma şekilleri.



Şekil 2.21: Prizma eğilme testleri sonucu elde edilen yük-deplasman ilişkileri.

Eğilme testleri sonucunda, lif oranı arttıkça eğilme kapasiteleri, ilk çatlama dayanımları ve pekleşme etkisi genel olarak artma eğilimi gösterirken, %2.5 lif oranı için azalma göstermiştir.

Test kirişlerinde kullanılan boyuna donatıların mekanik özellikleri, donatılardan alınan 300 mm uzunluğundaki numunelerin çekme testleri ile belirlenmiştir. Testler Balıkesir Üniversitesi Merkez Laboratuvarı'nda bulunan 250 kN kapasiteli çekme cihazı ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 2.22). Elde edilen donatı akma ve kopma dayanımları Tablo 2.6'da verilmiştir. Donatılarda en düşük kopma uzaması %12 olarak ölçülmüştür.



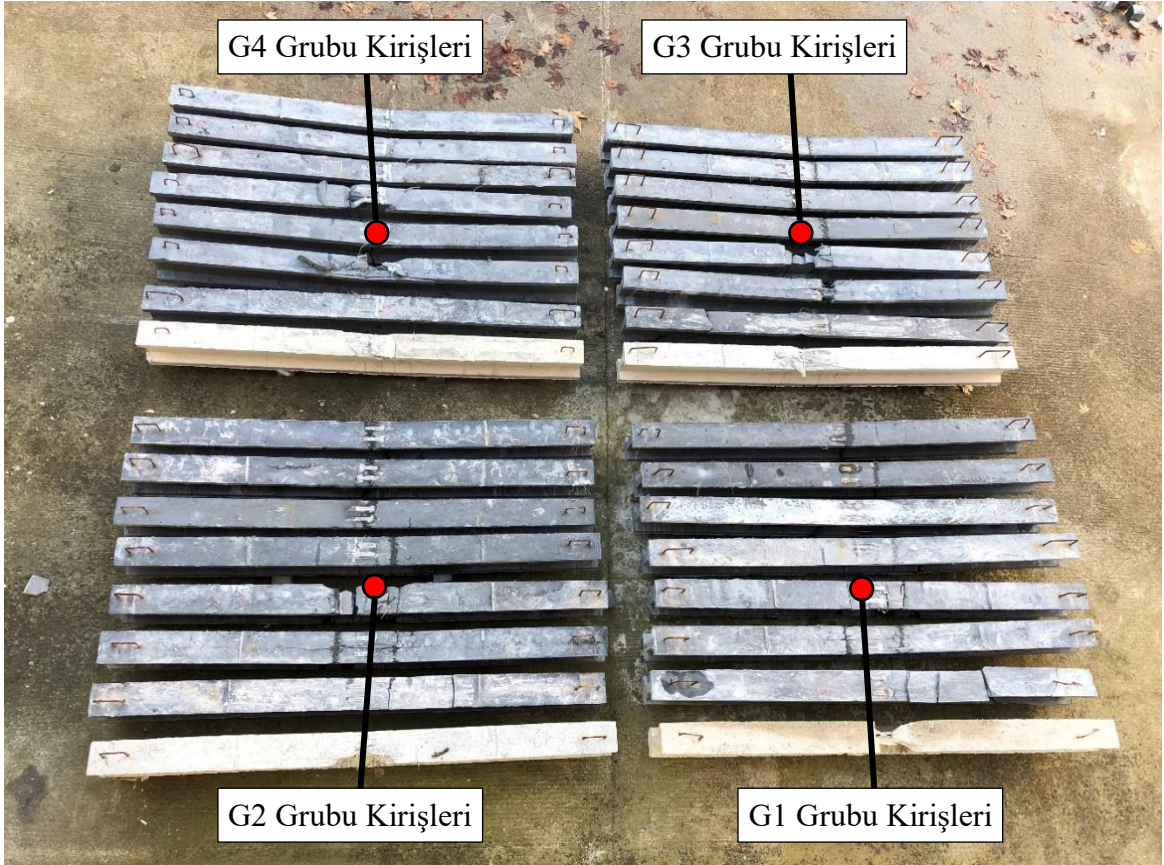
Şekil 2.22: Kiriş donatılarının çekme testi ile mekanik özelliklerinin belirlenmesi.

Tablo 2.6: Test kirişlerine ait donatıların akma ve kopma dayanımları (MPa).

Kiriş Kodu	Grup No							
	G1 ( $\phi$ 10)		G2 ( $\phi$ 12)		G3 ( $\phi$ 14)		G4 ( $\phi$ 16)	
	Akma	Kopma	Akma	Kopma	Akma	Kopma	Akma	Kopma
NSC	470	585	469	586	469	587	467	587
R1	471	593	470	594	472	593	469	590
R2	470	585	468	596	470	592	467	587
R3	469	593	468	596	470	592	470	591
1	472	593	472	593	468	588	467	587
1.5	471	593	472	593	468	588	470	591
2	469	591	471	582	471	591	473	593
2.5	469	591	471	582	471	591	473	593
<b>Ortalama</b>	470.1	590.5	470.1	590.3	469.9	590.3	469.5	589.9
<b>S.Sapma</b>	1.13	3.51	1.64	5.97	1.46	2.25	2.51	2.59

## 2.6 Kirişlerin Test Sonuçları ve Değerlendirilmesi

Deneysel çalışma kapsamında dört farklı grupta 8 kiriş için dört noktalı eğilme testleri gerçekleştirilmiş ve her bir kiriş için yük-düşey deplasman (sehim) ( $P-\delta$ ) davranışları, moment-eğrilik ( $M-\varphi$ ) davranışları, deplasman ve eğrilik süneklikleri, kesitin etkin eğilme rijitlikleri, yük taşıma kapasiteleri, çatlak şekilleri ve beton/donatı şekildegıştırme davranışları incelenmiştir (Şekil 2.23) (Ek A, Şekil A.1-A.18).



Şekil 2.23: Deneysel çalışmada eğilme testleri gerçekleştirilen kirişler (32 adet).

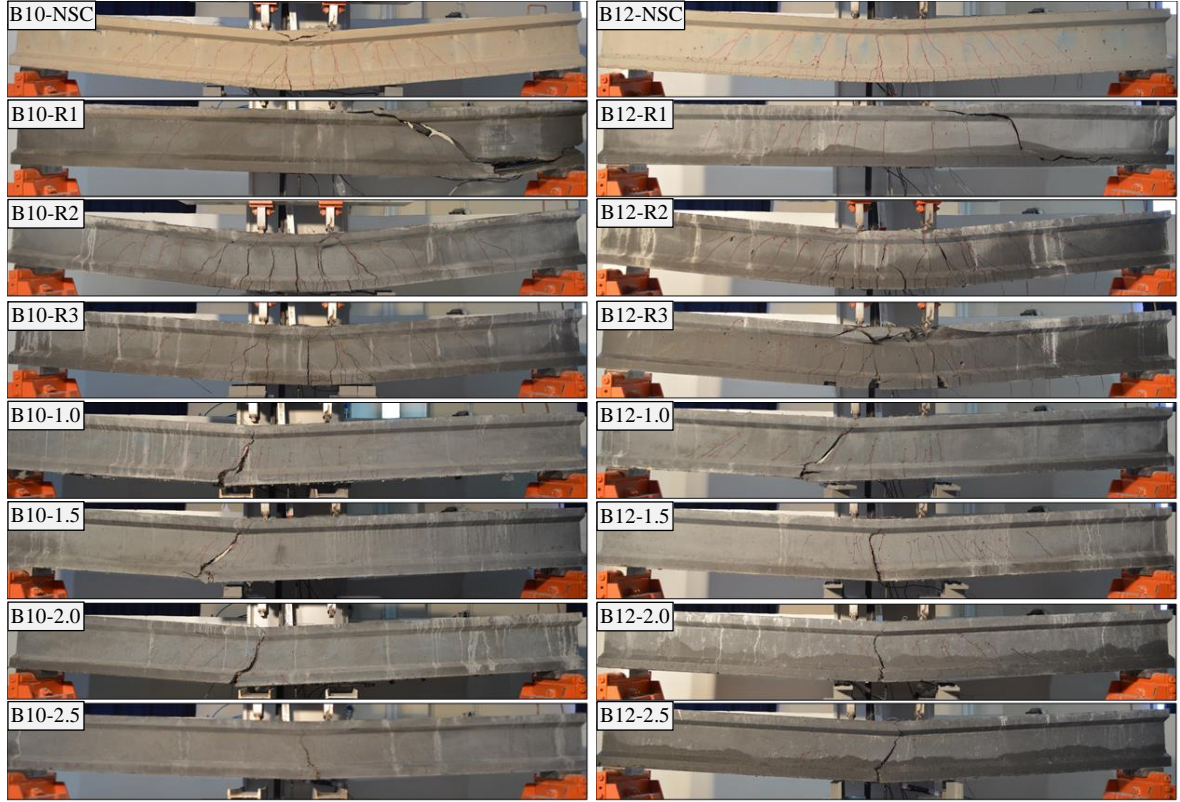
Testlerde beton ezilmesi, donatı kopması vb. ile önemli dayanım azalması oluşuncaya kadar yükleme yapılarak kirişlerin kırılma (göçme) şekilleri belirlenmiştir (Şekil 2.24). Tüm gruplarda UYDB içeren lifsiz R1 referans kirişlerinde, asal çekme gerilmelerinin sebep olduğu gevrek kesme kırılması gözlenmiş, diğer tüm kirişlerde sünek eğilme kırılması meydana gelmiştir. Çelik lif içermeyen R2, R3 ve NSC referans kirişlerinde kırılma basınç bölgesindeki beton ezilmesi ile gerçekleşirken, çelik lif içeren kirişlerin tümünde çekme donatısı kopması veya boyun verme bölgesine geçmesi ile meydana gelmiştir (Şekil 2.24).



Lifsiz referans kirişlerinde çok sayıda benzer genişlikte çatlaklar gözlenirken, lifli kirişlerde başlangıçta kılcal çatlaklar oluşmakla birlikte, liflerin bu küçük çatlakları sınırlaması nedeniyle maksimum yüke ulaşıldıktan sonra büyük bir çatlak oluşumu gözlenmiştir (Şekil 2.24). Bu büyük lokal çatlak, donatının kopma uzamasına erken ulaşmasına sebep olarak kırılma davranışını değiştirmiştir.

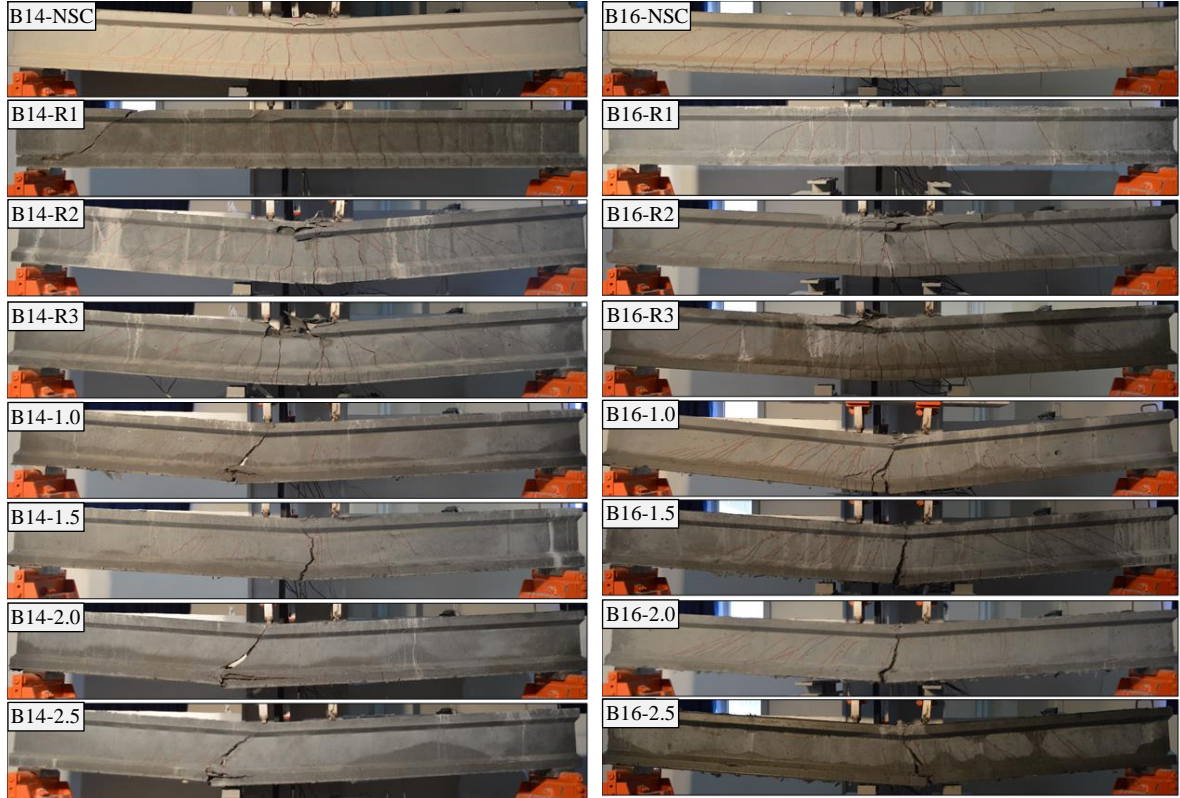
Büyük çatlak lokalleşmesi genel olarak eğilme çatlağı formunda oluşmuş (Şekil 2.25a) , ancak bazı kirişlerde (B10-1.0, B10-1.5, B10-2.0, B12-1.0, B14-1.0, B14-2.0 ve B14-2.5) kesme çatlağıyla birleşerek kesmeli-eğilme çatlağı formunda gözlenmiştir (Şekil 2.25b). Bu durum farklı donatı ve farklı lif oranlarında gerçekleşebildiğinden sebebiyle ilgili belirli bir eğilim tespit edilememiştir. Bu durumun liflerin dağılımındaki kusurlar nedeniyle kesme ve eğilme çatlaklarının yakın oluşması ve birleşmesi sonucu olduğu düşünülmektedir. Kesmeli-eğilme çatlaklarının lokalleşmesi, kirişler eğilme kapasitesine ulaştıktan sonra gerçekleşmiş ve çekme donatısı büyük uzama ve kayma deformasyonlarına uğramıştır.

İncelenen UYPLB'li kirişlerde enine donatı (etriye) bulunmamasına rağmen kesme kırılması gözlenmemesi çelik liflerin etriye yerine kullanılabileceğini göstermiştir. Çalışma kapsamında  $\rho=0.008-0.022$  arasında değişen donatı oranlarında kesme kırılmasının önlenmesi ve kesme çatlaklarının sınırlandırılabilmesi için UYPLB'de %1.0 oranında çelik lif kullanılması yeterli olmuştur.



a)

b)



c)

d)

**Şekil 2.24:** Kiriş kırılma şekilleri a) G1 grubu kirişleri, b) G2 grubu kirişleri, c) G3 grubu kirişleri, d) G4 grubu kirişleri.



a)



b)

**Şekil 2.25:** Kiriş lokalleşme şekilleri a) Eğilme çatlağı lokalleşmesi, b) Kesmeli eğilme çatlağı lokalleşmesi.

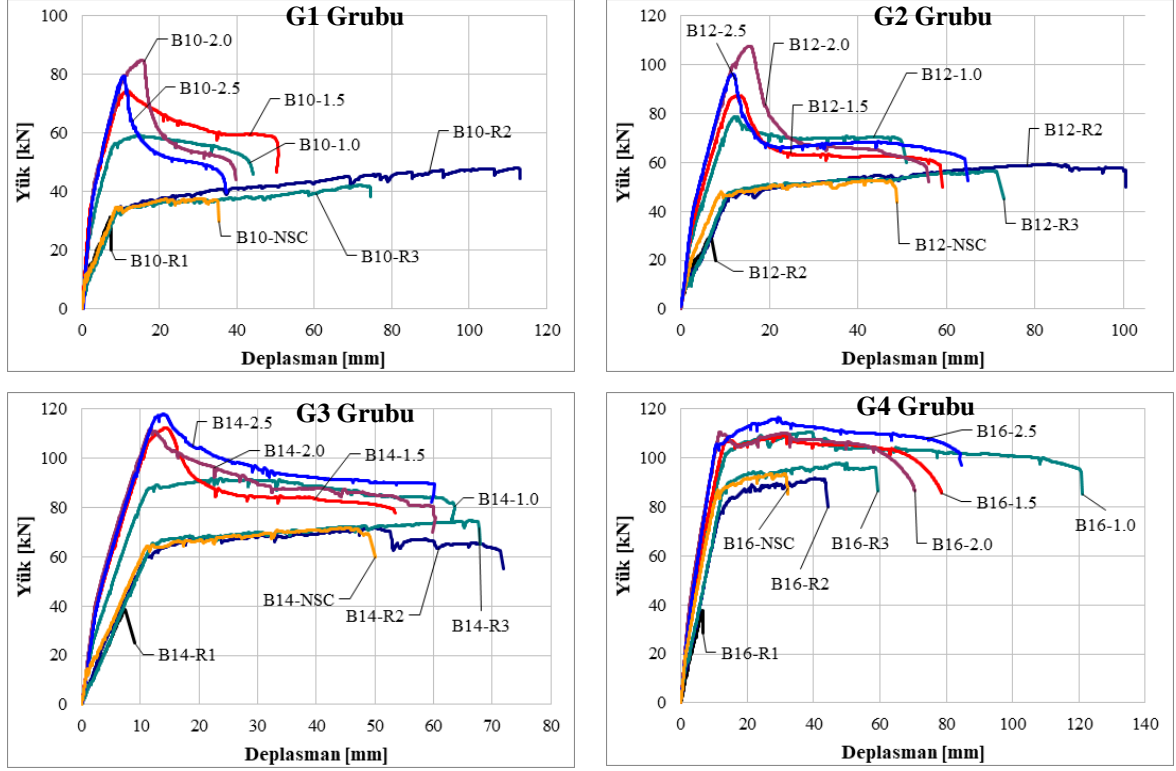
### 2.6.1 Yük-Düşey Deplasman Davranışları

Test kirişlerinden elde edilen yük-deplasman ( $P-\delta$ ) ilişkileri gruplar halinde Şekil 2.26'da verilmiştir.

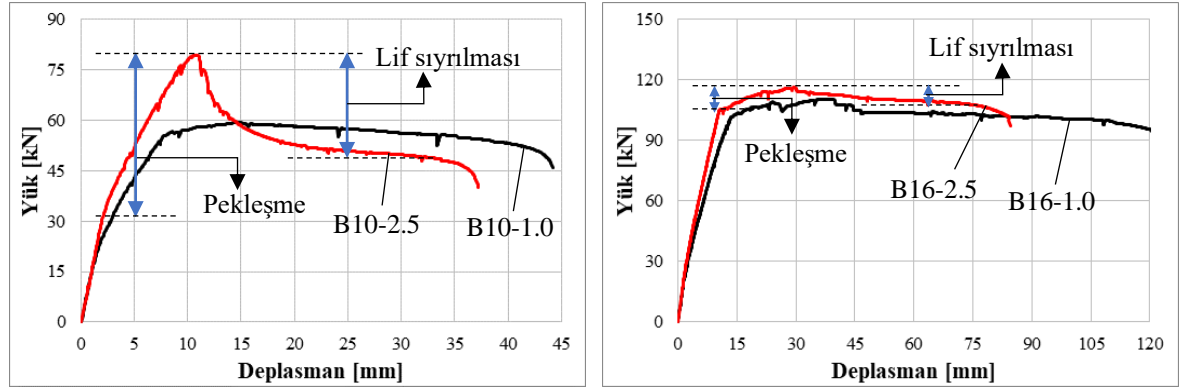
UYDB içeren R2 ve R3 referans kirişlerinde geleneksel betonlu (GB) kirişlerde olduğu gibi, donatıdaki akma sonrası rijitlik azalmakta ve pekleşme etkisi ile yük taşıma kapasitesi bir miktar arttıktan sonra beton ezilmesi ile kırılma gerçekleşmektedir. Ancak UYDB kullanımı (R2 ve R3 kirişlerinde) yüksek dayanımı sayesinde donatının daha fazla uzamasını sağlayarak, GB'li kirişlere göre yük taşıma kapasitesini ve sünekliğini arttırmıştır. G1 ve G2 grubuna ait R2 referans kirişlerinde basınç donatısı sayesinde bu etki çok daha belirgin olmuştur. UYPLB içeren lifli kirişlerde ise liflerin sağladığı çekme dayanımı başlangıç rijitliğini ve yük taşıma kapasitesini lifsiz duruma göre belirgin şekilde arttırmıştır.

UYPLB kirişlerin kırılma deplasmanları en düşük donatı oranında (G1 grubu) GB'li kiriş mertebesinde elde edilmiştir. Donatı oranı arttıkça UYPLB kirişlerin kırılma deplasmanları artmıştır. En yüksek donatılı G4 grubu kirişlerinde GB'li kirişlerin yaklaşık 2 katına ulaşılmıştır (Şekil 2.27).

UYPLB'li kirişlerin tümünde çekme donatılarının akmasından sonraki aşamada çelik liflerin sebep olduğu bir pekleşme davranışı gözlenmektedir. Çelik lif oranı arttıkça pekleşme etkisi artmış, donatı oranı arttıkça pekleşme etkisi azalmıştır (Şekil 2.27). Pekleşme davranışı çekme bölgesindeki liflerin sıyrılması ile sonlanmakta ve bu noktadan sonra yumuşama (dayanım azalması) gözlenmektedir. Çelik lif oranı %2.0 ve %2.5 olan kirişlerde dayanımdaki azalmalar çok daha ani ve büyük olmuştur. Ancak dayanım azalmalarına rağmen tüm lifli kirişlerde lifsiz kirişlerin yük taşıma kapasitelerinden daha yüksek değerler elde edilmiştir (Şekil 2.26).

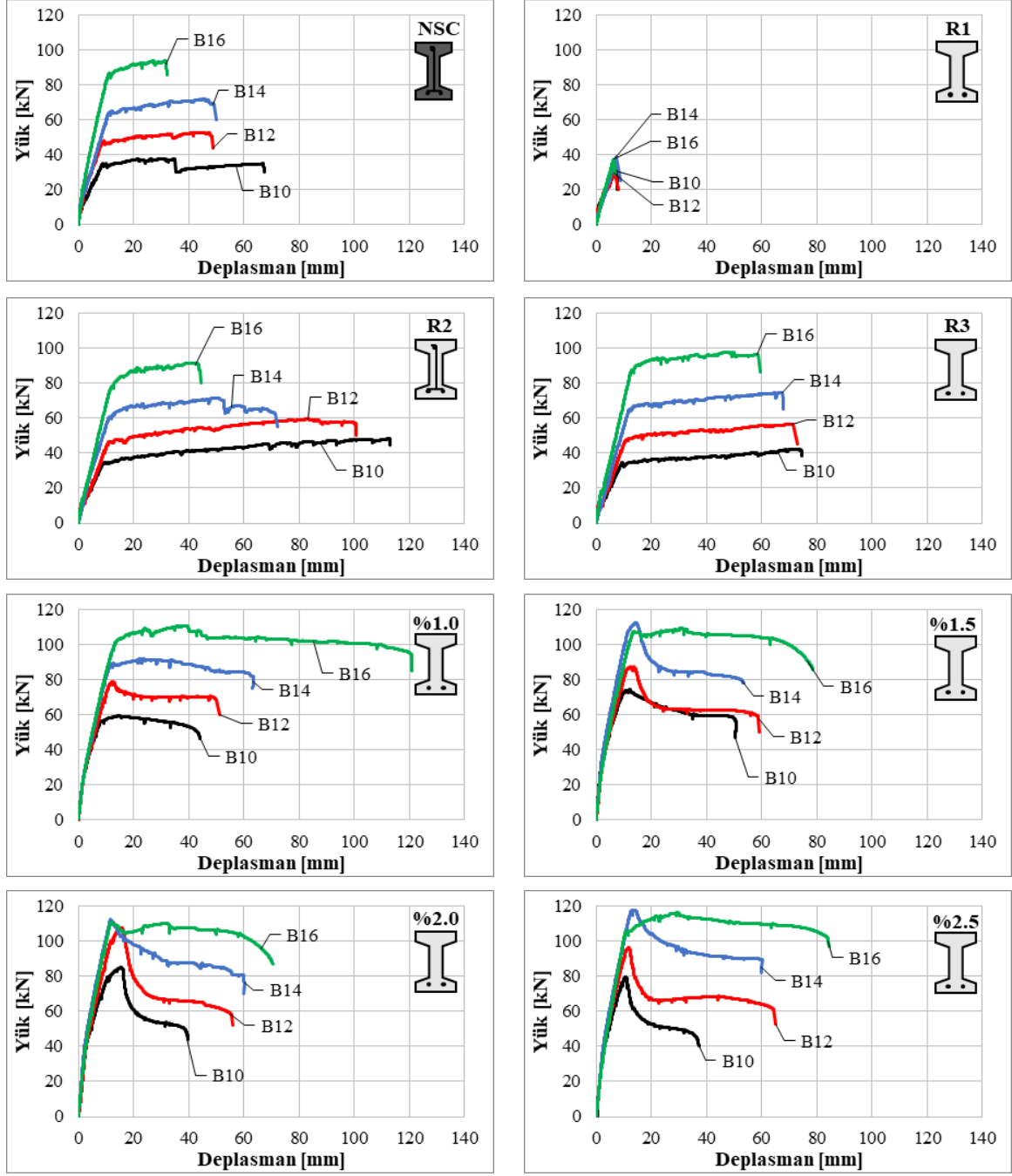


Şekil 2.26: Test kirişlerinin  $P-\delta$  ilişkileri.



Şekil 2.27: Lif oranının  $P-\delta$  davranışı üzerindeki pekleşme ve yumuşama etkisi.

Kirişlerin donatı oranına göre karşılaştırmaları Şekil 2.28'de gösterilmiştir. Şekil 2.28 incelendiğinde GB'li kirişlerde beklenildiği gibi donatı oranı arttıkça maksimum deplasman değeri azalırken, yük kapasitesinde artış gözlenmiştir. R1 kodlu referans kirişlerinde kesme kırılması olduğundan donatı oranının yük kapasitesine önemli bir katkısı olmamıştır. R2 ve R3 kodlu referans kirişlerinde geleneksel betonarmede olduğu gibi donatı oranı arttıkça maksimum deplasman değeri azalmış ve yük kapasitesi artmıştır. Lifli numunelerin genelinde geleneksel betonarme davranışının aksine, donatı artımıyla beraber maksimum deplasman değerinde artış gözlenmiştir. Tüm lif gruplarında maksimum yük sonrası oluşan ani dayanım azalmaları donatı oranının artmasıyla azalmıştır.



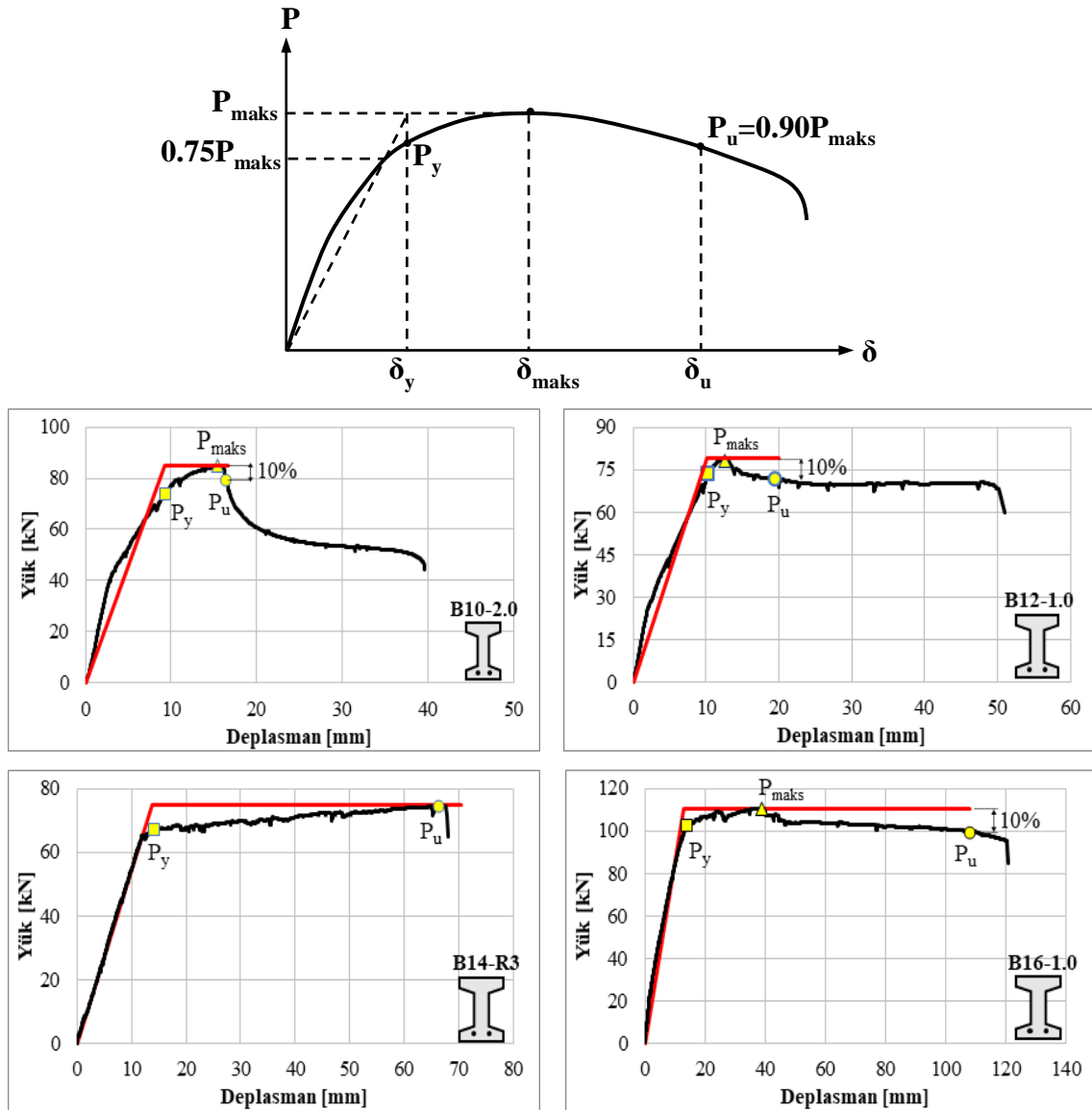
Şekil 2.28: Test kirişlerine ait  $P-\delta$  ilişkilerinin donatı oranına göre karşılaştırılması.

**Deplasman süneklikleri :** Çelik lif içeriğinin deplasman sünekliği üzerindeki etkisini ortaya koymak amacıyla, lifli ve liffsiz referans kirişlerine ait deplasman süneklikleri ( $\mu_\delta$ ) karşılaştırılmıştır. Bunun için öncelikle  $P-\delta$  ilişkileri kullanılarak akma yükü ( $P_y$ ), maksimum deplasmana karşılık gelen yük ( $P_u$ ), akma deplasmanı ( $\delta_y$ ) ve maksimum deplasman ( $\delta_u$ ) değerleri elde edilmiştir. Akma deplasmanının belirlenmesinde, azaltılmış rijitlik ve ideal elasto-plastik davranışı esas alan bir yaklaşım (Park, 1988) kullanılmıştır (Şekil 2.29). Bu yaklaşımda, akma deplasmanı ( $\delta_y$ ), kirişin yük taşıma kapasitesinin ( $P_{maks}$ )



%75'ine karşılık gelen nokta ile eğrinin başlangıcını birleştiren bir kiriş yardımıyla geometrik olarak belirlenmektedir.

Lifli kirişlerde, lifsiz kirişlerden farklı olarak maksimum yük sonrası dayanım azalmaları oluşmaktadır. Özellikle yüksek lif oranları için çok büyük ve ani azalmalar gözlenmektedir. Bu dayanım azalmalarını sınırlamak amacıyla Şekil 2.29'da gösterildiği gibi en fazla %10'luk yük düşüşü göz önüne alınmış ve maksimum deplasmanlar buna bağlı olarak belirlenmiştir (Park, 1988). Şekil 2.29'da B10-2.0, B12-1.0, B14-R3 ve B16-1.0 kirişlerine ait idealleştirmeler örnek olarak gösterilmiştir. Kirişlerin deplasman süneklikleri ve ilgili diğer karakteristik değerler Tablo 2.7'de verilmiştir.



Şekil 2.29:  $P$ - $\delta$  ilişkisinin idealleştirilmesi ve ilgili karakteristik değerler.

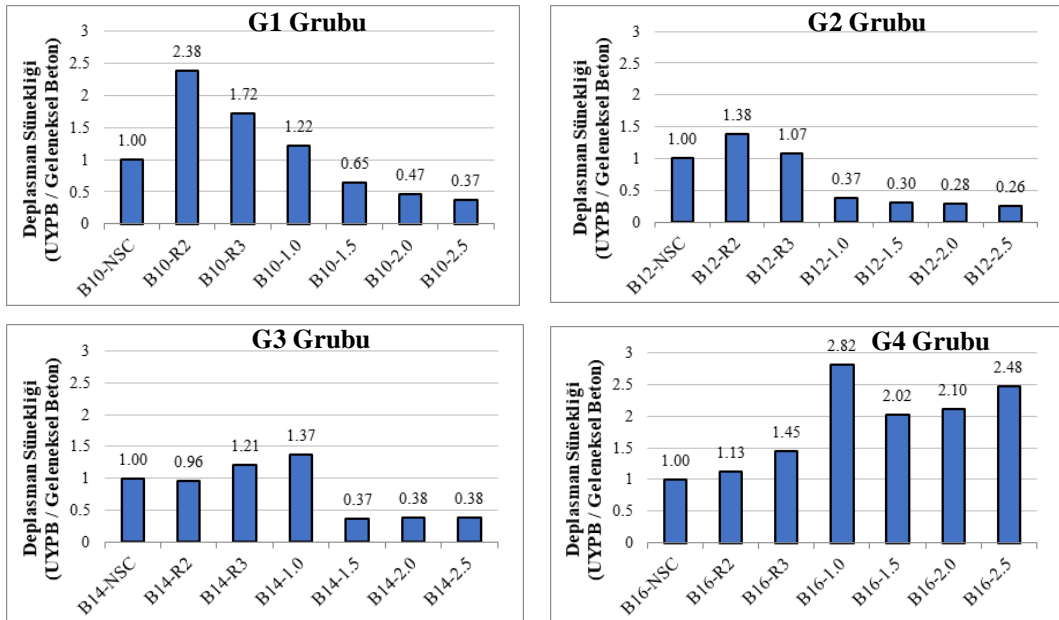
**Tablo 2.7:** Deplasman süneklikleri ve ilgili karakteristik değerler.

Grup No	Numune kodu	$\delta_y$ (mm)	$P_{maks}$ (kN)	$\delta_u$ (mm)	$P_u$ (kN)	$\mu_{\delta}=\delta_u/\delta_y$	$P_u/P_{maks}$
G1	B10-NSC	9.18	37.68	35.29	37.68	3.85	1.00
	B10-R1	-	31.50	-	-	-	-
	B10-R2	12.32	48.12	113.07	47.87	9.17	1.00
	B10-R3	11.25	42.28	74.46	42.28	6.62	1.00
	B10-1.0	7.08	59.38	33.36	53.44	4.71	0.90
	B10-1.5	8.08	74.19	20.20	66.74	2.50	0.90
	B10-2.0	9.26	84.99	16.64	76.49	1.80	0.90
	B10-2.5	8.27	79.44	11.90	71.50	1.44	0.90
G2	B12-NSC	9.21	52.70	48.61	52.70	5.28	1.00
	B12-R1	-	30.02	-	-	-	-
	B12-R2	13.81	59.29	100.54	59.29	7.28	1.00
	B12-R3	12.60	56.56	71.41	56.51	5.67	1.00
	B12-1.0	10.15	78.79	19.96	70.90	1.97	0.90
	B12-1.5	9.88	87.25	15.53	78.45	1.57	0.90
	B12-2.0	11.60	107.61	17.27	96.85	1.49	0.90
	B12-2.5	9.64	96.23	13.07	86.46	1.36	0.90
G3	B14-NSC	11.91	71.80	50.60	71.80	4.03	1.00
	B14-R1	-	38.76	-	-	-	-
	B14-R2	12.93	71.61	53.02	64.45	4.64	0.90
	B14-R3	13.69	74.65	70.48	74.65	5.01	1.00
	B14-1.0	10.70	91.96	62.22	82.63	5.81	0.90
	B14-1.5	10.82	112.26	16.82	100.85	1.55	0.90
	B14-2.0	10.09	112.23	16.32	100.97	1.62	0.90
	B14-2.5	11.91	117.82	18.26	106.01	1.62	0.90
G4	B16-NSC	11.13	93.71	32.46	93.71	2.92	1.00
	B16-R1	-	37.82	-	-	-	-
	B16-R2	13.52	91.58	44.49	91.58	3.29	1.00
	B16-R3	14.11	97.81	59.46	97.81	4.22	1.00
	B16-1.0	13.14	110.51	108.07	99.08	8.23	0.90
	B16-1.5	12.09	109.53	71.4	98.56	5.89	0.90
	B16-2.0	10.33	110.70	63.39	99.61	6.14	0.90
	B16-2.5	11.20	116.40	80.85	104.73	7.22	0.90

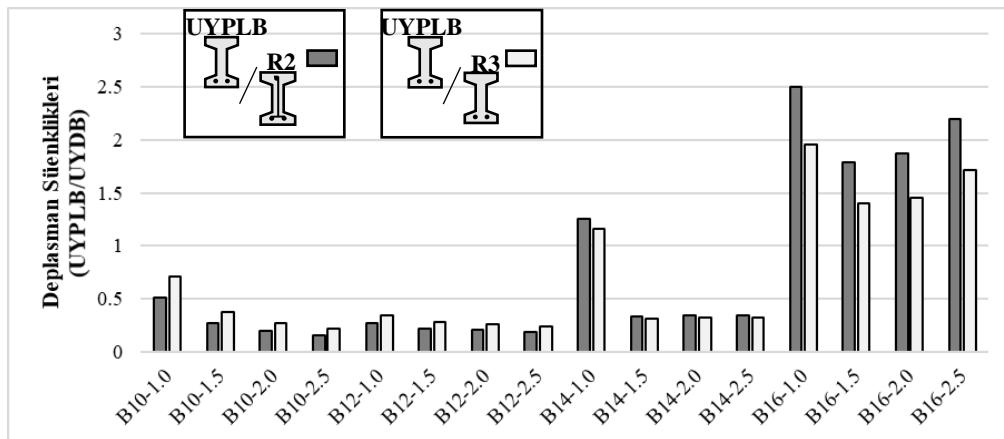
Kirişler için elde edilen deplasman süneklikleri aynı gruptaki GB'li kiriş sünekliklerine oranlanarak UYPLB ve UYDB'nin süneklik üzerindeki etkisi belirlenmiştir (Şekil 2.30). Ayrıca salt lifin etkisini belirlemek amacıyla UYPLB kiriş süneklikleri UYDB kiriş sünekliklerine oranlanarak karşılaştırılmıştır (Şekil 2.31).

UYDB'li kirişler GB'li kirişlerle karşılaştırıldığında (Şekil 2.30); B14-R2 kirişi hariç tüm gruplarda UYDB kullanımının deplasman sünekliğini arttırdığı görülmektedir. UYPLB'li kirişler GB'li kirişlerle karşılaştırıldığında (Şekil 2.30); G1, G2 ve G3 grubu kirişleri için

deplasman sünekliğinde genel olarak azalmaya (%35-74 arası) sebep olurken, G4 grubu kirişlerinde artış sağlamaktadır. Tüm donatı oranları için en yüksek süneklik %1.0 lifli UYPLB’de elde edilmiştir. Buna göre süneklik bakımından en etkili lif oranının %1.0 olduğu söylenebilmektedir. Lif oranı artışı da genel olarak düşük donatılı kirişlerde sünekliği azaltmıştır (Şekil 2.30). Buna karşılık en yüksek donatılı B16 kirişlerinde lif oranı artışı sünekliği olumlu yönde etkilemiştir (Şekil 2.30). UYDB kullanımı, ilk üç gruptaki (G1, G2 ve G3) kirişlerde süneklikleri UYPLB’ye göre önemli ölçüde arttırmış, G4 grubu kirişlerde ise UYPLB kullanımı süneklikleri 1.5-2.0 kat arttırmıştır (Şekil 2.30). UYDB’li kirişlerdeki basınç donatısının deplasman sünekliğine etkisi ile ilgili düzenli bir eğilim bulunmadığı için UYPLB’nin UYDB’ye göre süneklik oranlarında da belirli bir değerlendirme yapılamamıştır (Şekil 2.31).



Şekil 2.30: Deplasman sünekliklerinin GB’li kirişlere göre değişimleri.



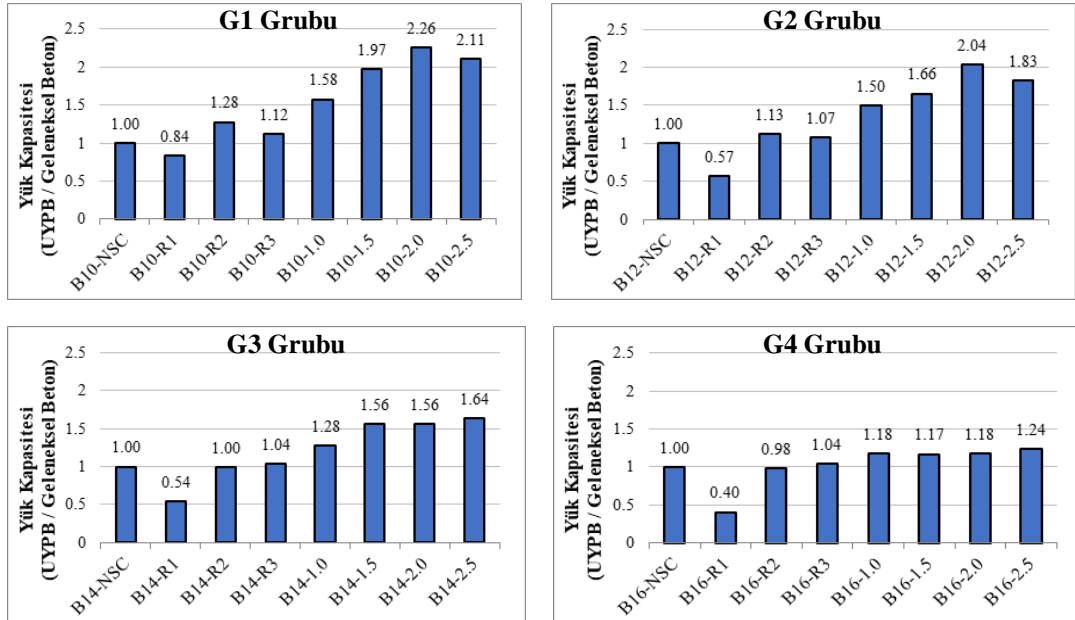
Şekil 2.31: UYPLB deplasman sünekliklerinin UYDB kirişlere göre değişimi.



**Yük taşıma kapasiteleri :** UYPLB ve UYDB'nin yük taşıma kapasitesi üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla her bir kiriş için elde edilen yük taşıma kapasiteleri aynı gruptaki GB'li kirişin kapasitesine oranlanarak karşılaştırılmıştır (Şekil 2.32). Ayrıca salt lifin etkisini belirlemek amacıyla UYPLB kiriş kapasiteleri UYDB kiriş kapasitelerine oranlanarak karşılaştırılmıştır (Şekil 2.33)

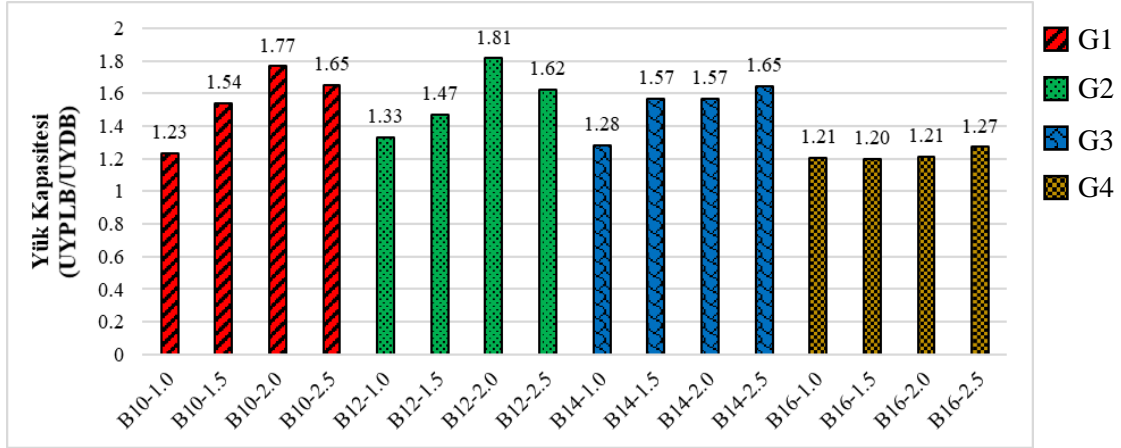
UYPLB'li kirişler GB'li kirişlerle karşılaştırıldığında (Şekil 2.32); tüm kirişler için UYPLB kullanımının yük kapasitesinde artış sağladığı görülmektedir. G1 grubu kirişlerinde lif kullanımı yük kapasitesinde 1.58-2.26 kat arasında artış sağlarken, donatı oranı arttıkça bu artış azalmakta ve kapasite artışı G4 grubu kirişlerinde % 17-24 arasında artış olmaktadır.

UYPLB'li kirişler UYDB'li kirişlerle karşılaştırıldığında (Şekil 2.33) da tüm kirişlerde lif kullanımının yük kapasitesinde artış sağladığı görülmüştür. Bu artış GB'li kirişlerde olduğu gibi donatı oranı arttıkça azalmıştır. Düşük donatı oranlarında (G1 ve G2) lif oranına bağlı olarak kapasitede %70-80 artışlara ulaşılırken, G4 grubu kirişlerinde yaklaşık %20 artış oluşmuştur. Düşük donatı oranlarında (G1 ve G2) lif oranının %2.0'den %2.5'a çıkması kapasitede azalmaya sebep olmuş, yüksek donatı oranlarında (G3 ve G4) ise bir miktar kapasite artışı sağlayabilmiştir.



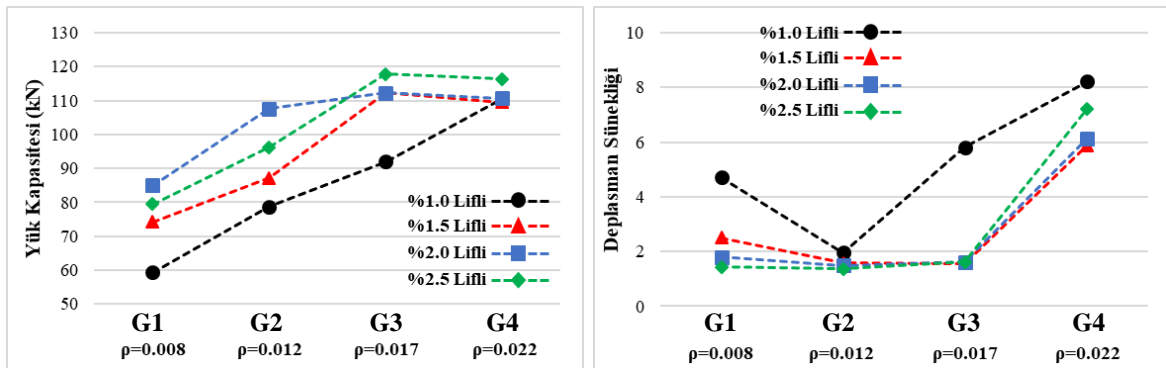
**Şekil 2.32:** Kiriş yük taşıma kapasitelerinin karşılaştırılması.

Etriyesiz ve lifsiz R1 kirişlerinde yaklaşık 30-33 kN'luk yüklerde kesme kırılması gerçekleşirken, etriyesiz UYPLB'li kirişlerde lifler sayesinde kesme kırılması engellenmiştir. Buna göre, lif kullanımının kiriş kesme kapasitesini en az 2.9-3.0 kat arttırdığı söylenebilmektedir.



Şekil 2.33: UYPLB kiriş yük kapasitelerinin UYDB kiriş kapasitelerine oranla değişimi.

UYPLB kirişlerin yük kapasitesi ve deplasman süneklikleri lif ve donatı oranlarına göre Şekil 2.34'de karşılaştırılmıştır.



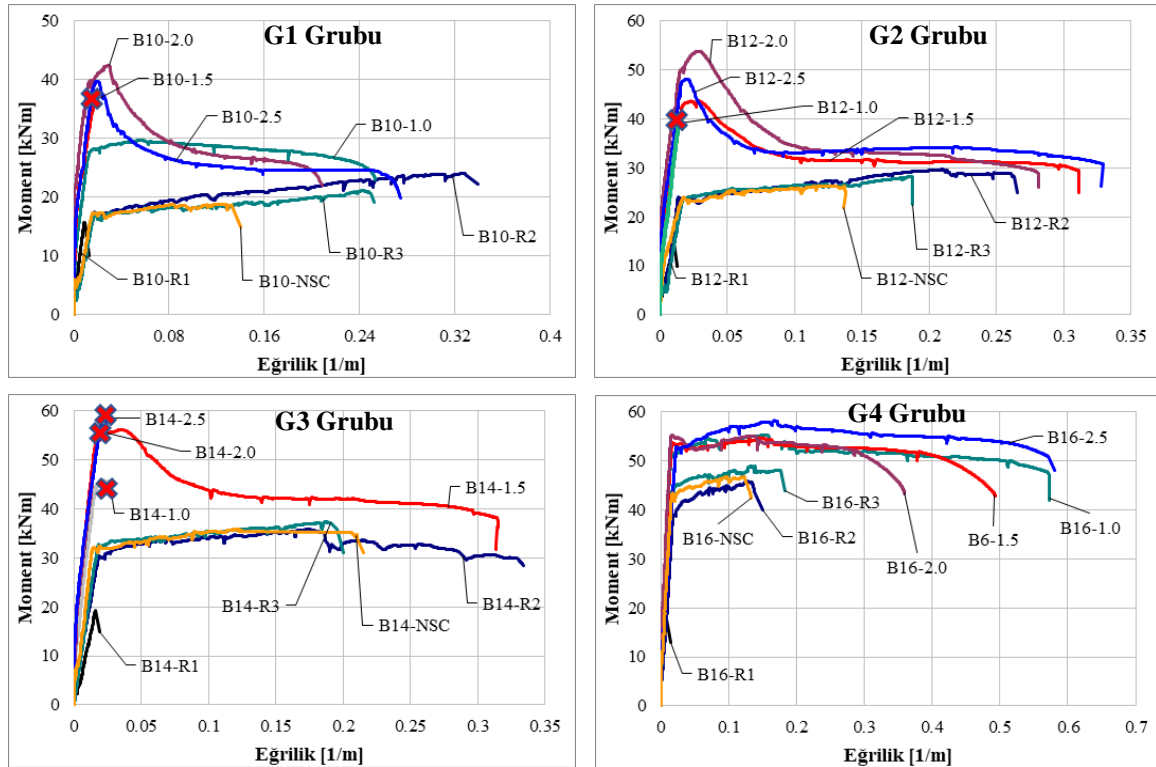
Şekil 2.34: Yük kapasitelerinin ve deplasman sünekliklerinin donatı oranı ile değişimi.

Donatı oranı artışı, tüm lif oranları için ilk üç gruptaki kirişlerde (G1, G2 ve G3) kapasite artışı sağlamış, en yüksek donatı oranına sahip olan G4 grubu kirişlerinde ise sadece %1.0 lif oranı artış sağlamıştır. %1.0 lif oranında kapasite artışı diğer lif oranlarına göre daha az olmakla birlikte, tüm donatı oranlarında düzenli bir artış göstermiştir (Şekil 2.34).

Genel olarak % 1.5, 2.0 ve 2.5 lifli kirişlerin deplasman süneklikleri tüm donatı oranları için birbirine yakın elde edilirken, % 1.0 lifli kirişlerin deplasman süneklikleri bu kirişlere oranla daha fazla elde edilmiştir. % 1.0 lifli kirişlerde genel olarak donatı artımıyla birlikte deplasman sünekliği artış göstermiştir. % 1.5, 2.0 ve 2.5 lifli kirişlerde ise sadece en yüksek donatı oranında (G4) artış olmuş diğer donatı oranlarında donatı oranı artışının deplasman sünekliğine önemli bir etkisi olmamıştır (Şekil 2.34).

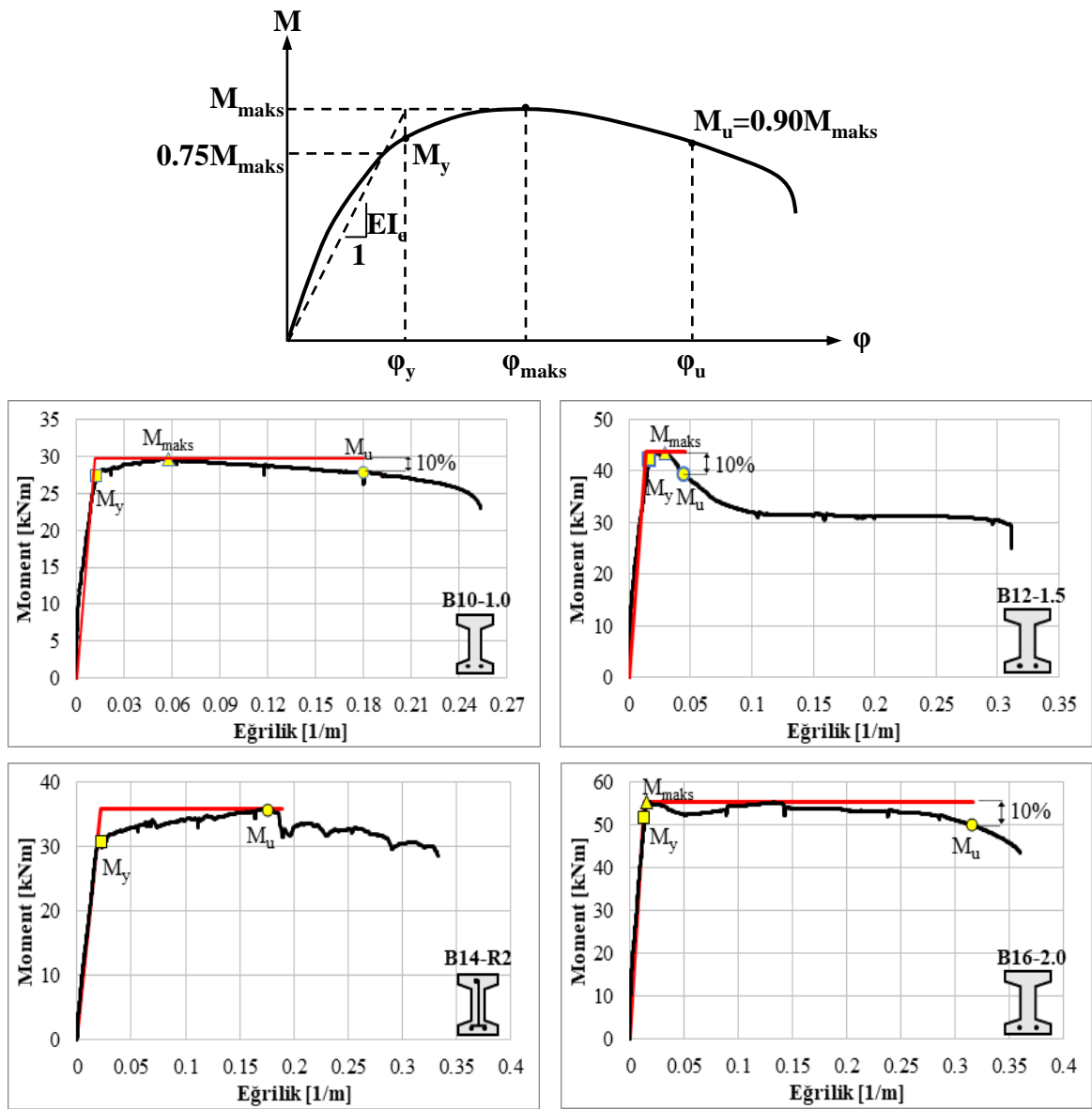
## 2.6.2 Eğrilik Süneklikleri ve Etkin Eğilme Rijitlikleri

Kirişlerin basınç ve çekme bölgelerinde gerçekleştirilen ölçümler kullanılarak kiriş ortasında 300 mm'lik bölgenin ortalama eğrilikleri (birim dönme) hesaplanmış ve ilgili bölgeye etkiyen moment ( $M$ ) ile eğrilik ( $\phi$ ) arasındaki ilişkiler belirlenmiştir (Şekil 2.35). Lifli beton içeren kirişlerde oluşacak büyük çatlakların eğrilığe etkisini gözönüne alabilmek amacıyla kiriş orta bölgesinden iki ayrı ölçüm alınmış ve çatlağı içeren ölçüm sonuçları sunulmuştur. B10-1.5, B12-1.0, B14-1.0, B14-2.0 ve B14-2.5 kirişlerinde oluşan büyük lokal çatlağın ölçüm düzeneğinin dışına çıkması sebebiyle belirli bir aşamadan sonra ölçüm alınamamıştır.



Şekil 2.35: Test kirişlerinin  $M-\phi$  ilişkileri.

Kirişlere ait deneysel  $M-\varphi$  ilişkileri  $P-\delta$  ilişkisinde olduğu gibi idealleştirilerek, eğrilik süneklikleri ( $\mu_\varphi$ ) ve etkin eğilme rijitlikleri ( $EI_e$ ) belirlenmiştir (Şekil 2.36). B10-NSC, B10-R3, B10-1.5 ve B10-2.0 kirişlerine ait idealleştirmeler örnek olarak Şekil 2.36’da gösterilmiştir. Kirişlerde etkin eğilme rijitlikleri ( $EI_e$ ) olarak, ideal-elastoplastik idealleştirmeden elde edilen, maksimum moment ( $M_{maks}$ ) / akma eğriliği ( $\varphi_y$ ) oranı esas alınmıştır (Şekil 2.36).  $M-\varphi$  ilişkisine ait karakteristik değerler (maksimum eğriliğe karşılık gelen moment ( $M_u$ ), akma momenti ( $M_y$ ), akma eğriliği ( $\varphi_y$ ), maksimum eğrilik ( $\varphi_u$ ) ve etkin eğilme rijitliği) Tablo 2.8’de verilmiştir.



Şekil 2.36:  $M-\varphi$  ilişkisinin idealleştirilmesi ve ilgili karakteristik değerler.

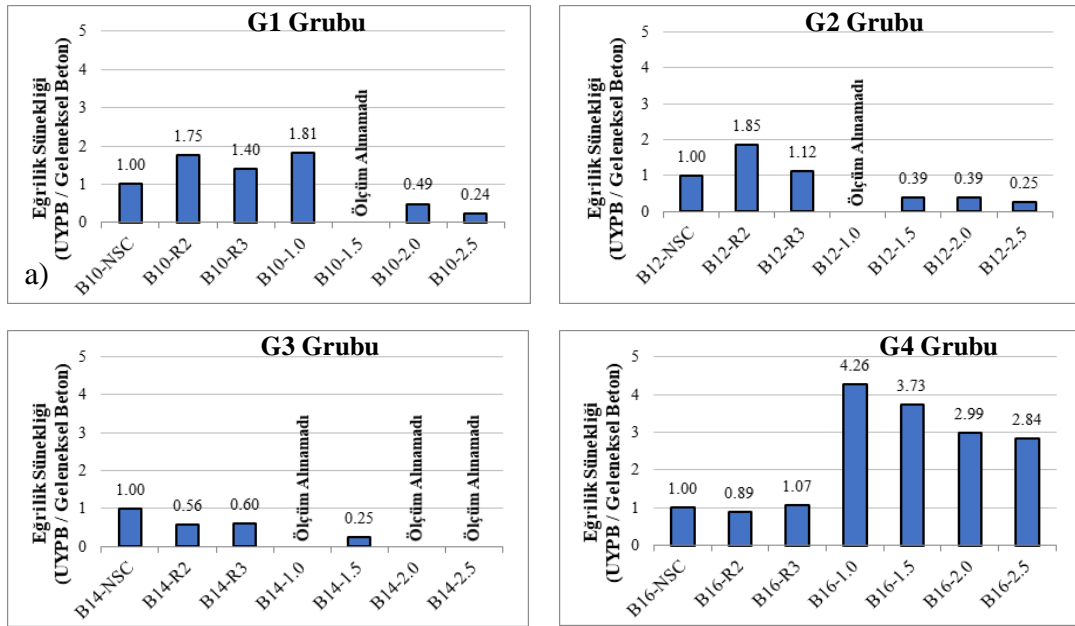
**Tablo 2.8:** Kirişlerin  $M-\varphi$  ilişkisinden elde edilen karakteristik değerler.

Grup No	Numune kodu	$\varphi_y$ (1/m)	$M_{maks}$ (kNm)	$\varphi_u$ (1/m)	$M_u$ (kNm)	$\mu_\varphi = \varphi_u / \varphi_y$	$EI_e$ $= M_{maks} / \varphi_y$ (kNm <sup>2</sup> )
G1	B10-NSC	0.016	18.84	0.14	18.84	8.76	1178
	B10-R1	-	15.75	-	-	-	-
	B10-R2	0.022	24.06	0.34	24.06	15.30	1118
	B10-R3	0.021	21.14	0.25	21.14	12.26	1026
	B10-1.0	0.011	29.69	0.18	26.18	15.89	2617
	B10-1.5	0.013	37.09	-	33.38	-	2805
	B10-2.0	0.009	42.49	0.04	37.74	4.25	4767
	B10-2.5	0.013	39.72	0.03	35.38	2.09	2996
G2	B12-NSC	0.017	26.35	0.14	26.35	8.34	1592
	B12-R1	-	15.01	-	-	-	-
	B12-R2	0.017	29.64	0.26	29.64	15.43	1736
	B12-R3	0.020	28.28	0.19	28.28	9.35	1408
	B12-1.0	0.013	39.39	-	34.43	-	3143
	B12-1.5	0.014	43.63	0.05	39.22	3.23	3108
	B12-2.0	0.013	53.81	0.04	48.42	3.27	4012
	B12-2.5	0.014	48.12	0.03	43.23	2.11	3493
G3	B14-NSC	0.015	35.90	0.23	35.9	15.78	2436
	B14-R1	-	19.38	-	-	-	-
	B14-R2	0.021	35.81	0.19	32.23	8.91	1682
	B14-R3	0.021	37.33	0.2	37.33	9.52	1770
	B14-1.0	0.015	45.98	-	41.32	-	3029
	B14-1.5	0.015	56.13	0.058	50.42	3.97	3845
	B14-2.0	0.016	56.11	-	50.48	-	3456
	B14-2.5	0.017	58.91	-	53.01	-	3456
G4	B16-NSC	0.016	46.85	0.13	46.85	8.31	2922
	B16-R1	-	18.91	-	-	-	-
	B16-R2	0.021	45.79	0.14	45.79	6.67	2148
	B16-R3	0.018	48.90	0.16	48.90	8.89	3415
	B16-1.0	0.014	55.26	0.51	49.54	35.42	3833
	B16-1.5	0.014	54.77	0.44	49.28	31.02	3899
	B16-2.0	0.013	55.35	0.32	49.81	24.85	4353
	B16-2.5	0.023	58.20	0.55	52.36	23.59	2510

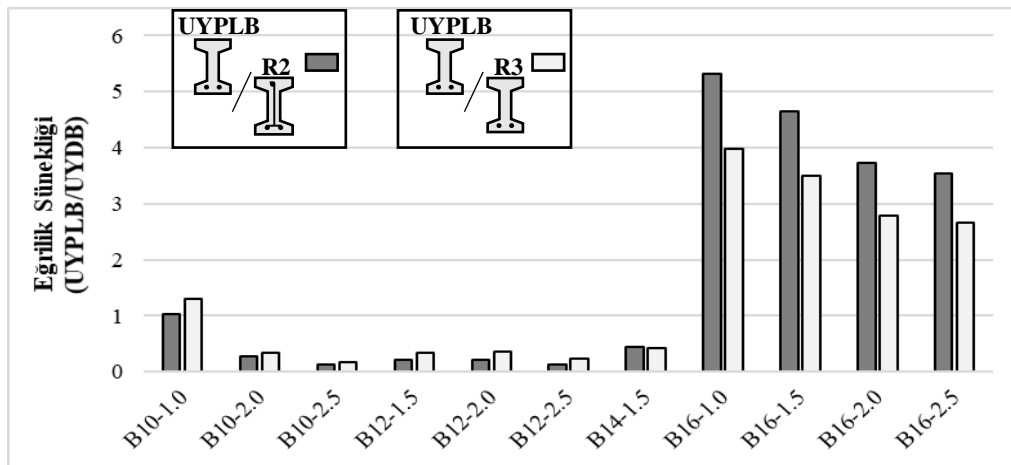
Her bir kiriş için elde edilen süneklikler aynı gruptaki GB'li kirişin sünekliğine oranlanarak UYPLB ve UYDB'nin eğrilik sünekliği üzerindeki etkisi belirlenmiştir (Şekil 2.37). Ölçüm alınabilen eğrilik sünekliklerinde de deplasman sünekliklerine benzer eğilimler elde edilmiştir. UYPLB kullanımı ile en düşük donatı oranında eğrilik sünekliği GB'li kirişlerin %24'üne kadar düşebilmiş, en yüksek donatı oranında GB'li kirişlere göre 4.26 kat artış gösterebilmiştir. UYPLB kirişlerde %1.0 lif oranı eğrilik sünekliğinde de en etkin oran

olmuştur. UYPLB en yüksek donatı oranında en büyük süneklikleri vermiştir. Bu donatı oranı için lif oranı artışı süneklikleri azaltmıştır.

UYPLB’li kirişler UYDB’li kirişlerle karşılaştırıldığında (Şekil 2.38), G4 grubu kirişlerde lif kullanımı eğrilik sünekliğinde artış sağlarken, diğer gruplarda (G1, G2, G3) ölçüm alınan tüm kirişlerde B10-1.0 hariç düşüşe sebep olmuştur. UYDB’li kirişlerdeki basınç donatısının eğrilik sünekliğine etkisi ile ilgili belirli bir eğilim bulunmadığı için UYPLB’nin süneklikler üzerindeki etkisi basınç donatısı bakımından yorumlanamamıştır.

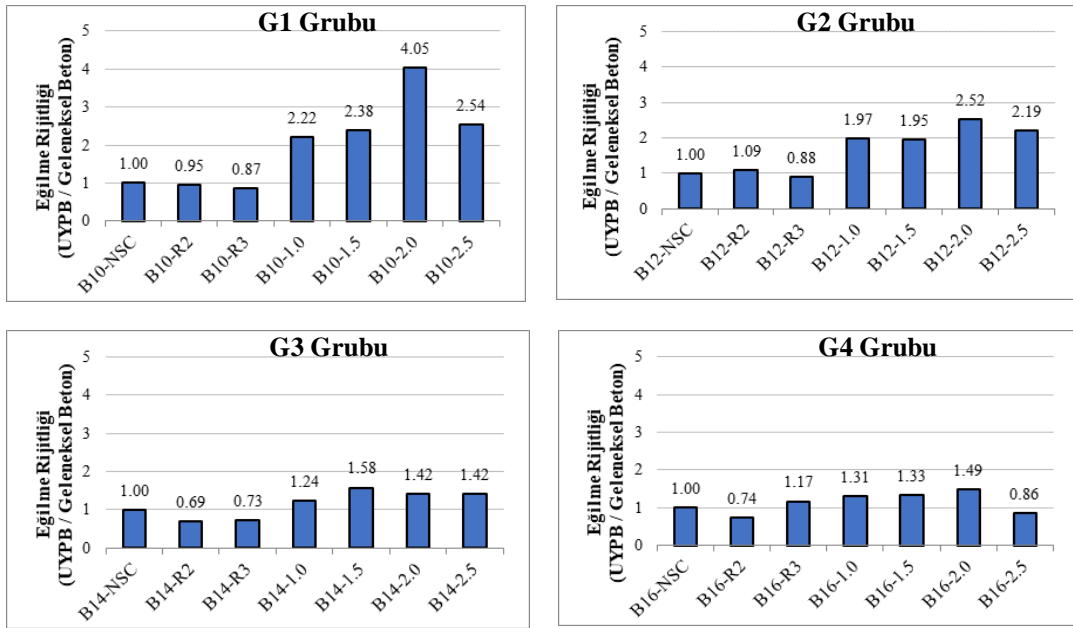


Şekil 2.37: Kiriş eğrilik sünekliklerinin GB’li kiriş sünekliklerine oranla değişimleri.

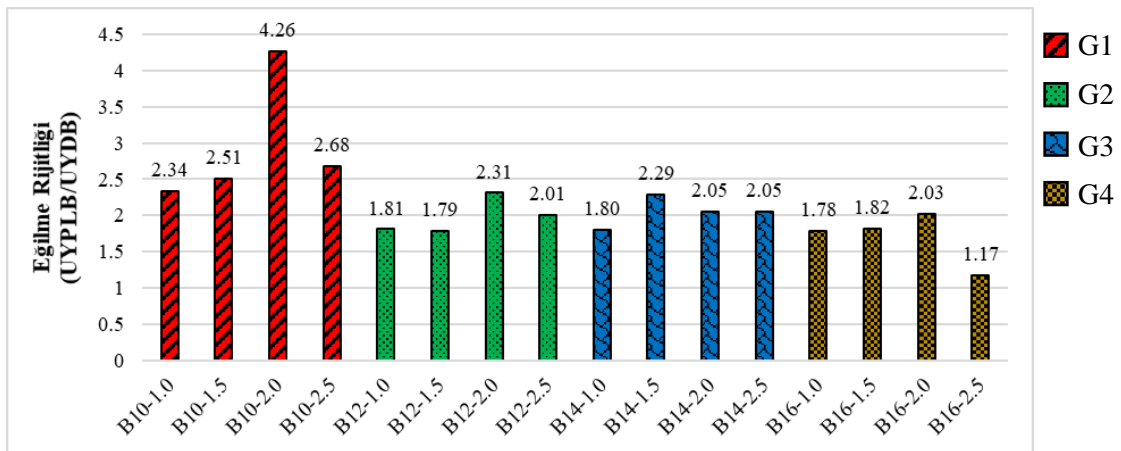


Şekil 2.38: UYPLB kiriş eğrilik sünekliklerinin UYDB kiriş sünekliklerine oranla değişimi.

**Etkin eğilme rijitlikleri:** UYPLB ve UYDB'nin rijitlik üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla her bir kiriş için elde edilen rijitlikler aynı gruptaki GB'li kirişin (NSC) rijitliğine oranlanarak karşılaştırılmıştır (Şekil 2.39). UYDB kiriş etkin eğilme rijitliğinde geleneksel betona göre önemli bir değişim sağlamamıştır. UYPLB kullanımı ise B16-2.5 kirişi hariç tüm kirişlerde artış sağlamıştır. %1 lifli UYPLB 1.31-2.22 kat, %1.5 lifli UYPLB 1.33-2.38 kat, %2 lifli UYPLB 1.42-4.05 kat, %2.5 lifli UYPLB 1.42-2.54 kat artış sağlamıştır. Donatı oranı arttıkça liflerin sağladığı rijitlik azalmıştır. UYPLB kullanımı, UYDB kullanımına göre rijitliklerde GB'li kirişlerdekine benzer artışlar sağlamıştır (Şekil 2.40).



Şekil 2.39: Kiriş etkin eğilme rijitliklerinin GB kiriş rijitliklerine oranla değişimi.

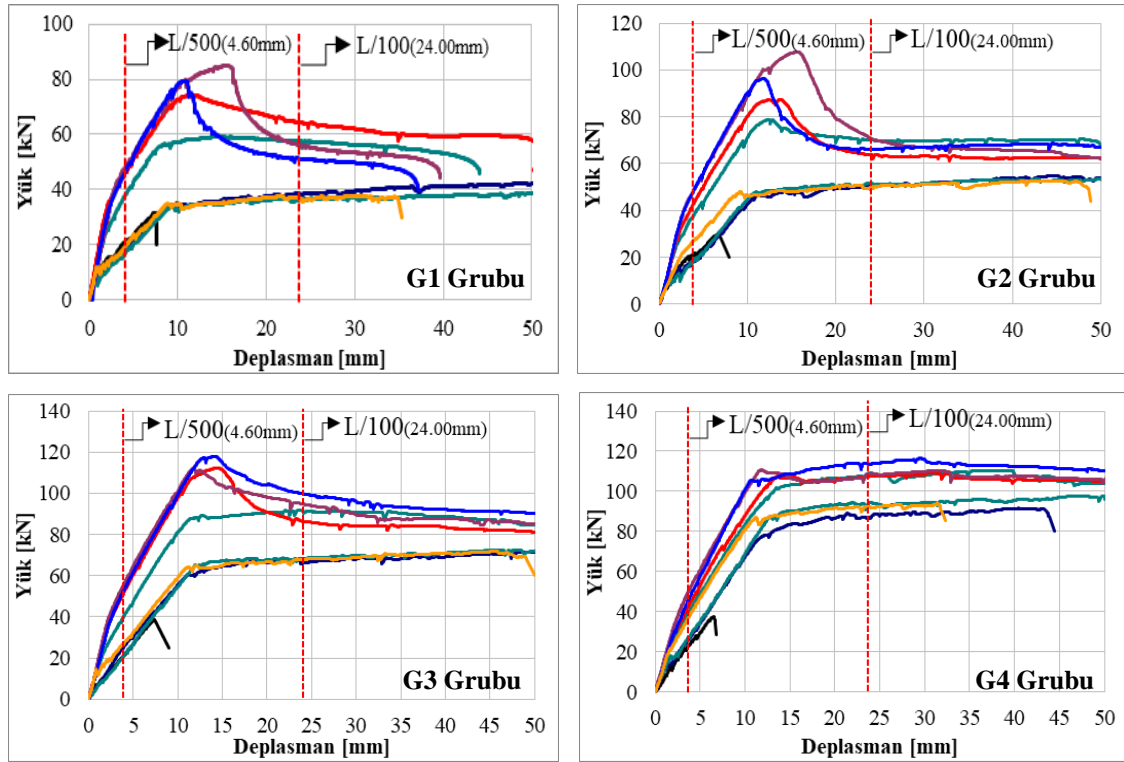


Şekil 2.40: UYPLB eğilme rijitliklerinin UYDB kirişlere göre değişimi.

### 2.6.3 Çatlak Davranışları

Kirişlerin çatlak davranışlarını karşılaştırmak amacıyla,  $P-\delta$  davranışının bazı karakteristik noktalarında çatlak genişlikleri belirlenmiştir. Test esnasında akma deplasmanı ( $\delta_y$ ), maksimum deplasman ( $\delta_u$ ),  $L$  kiriş açıklığını göstermek üzere,  $L/500$ 'lük ve  $L/100$ 'lük deplasmanlarda yükleme durdurulmuş ve gözlenebilen çatlaklar çizilerek genişlikleri çatlak mikroskobu ile ölçülmüştür.

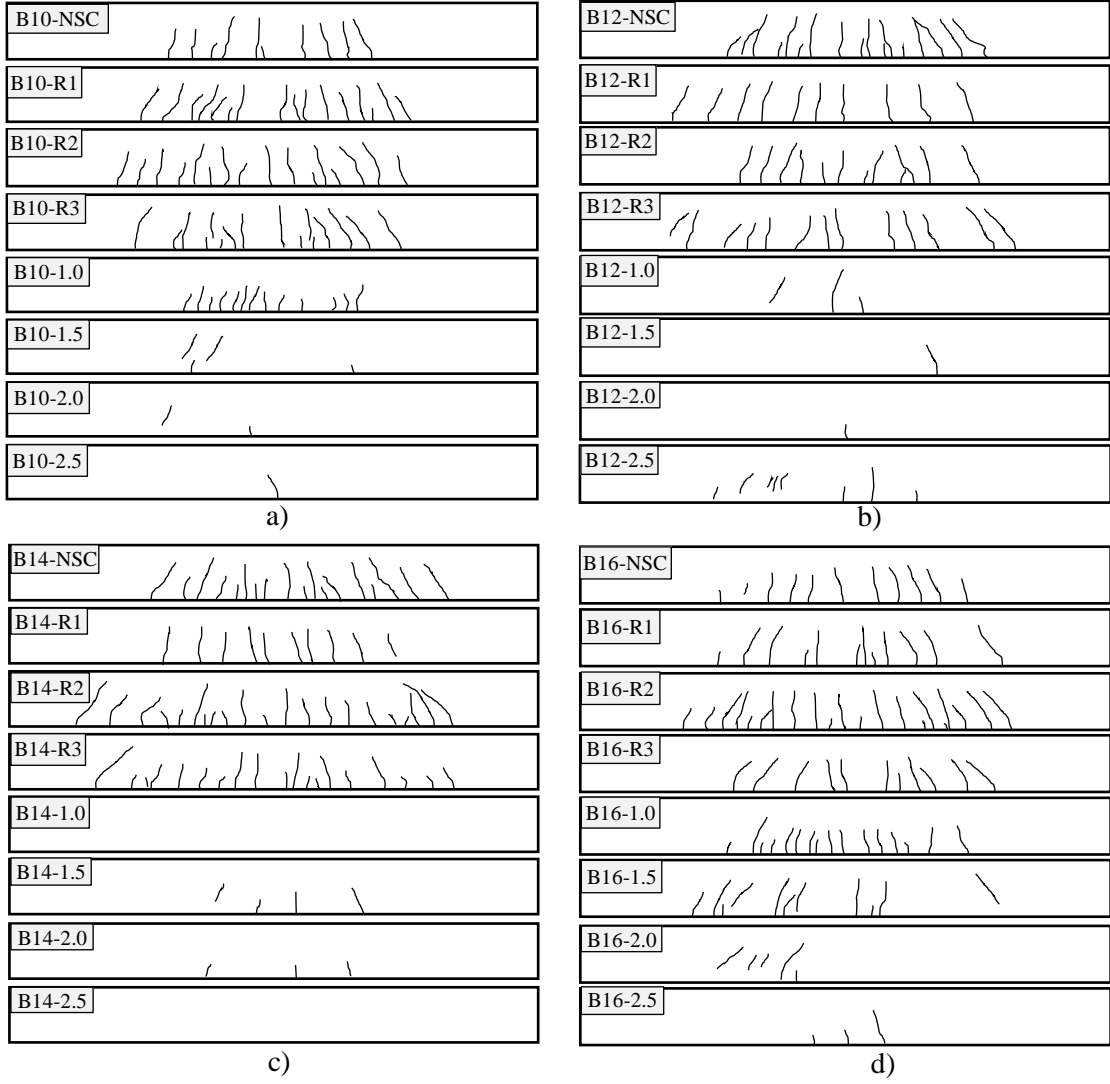
Çalışmada, çatlak davranışında önemli farkların olduğu  $L/500$  ve  $L/100$ 'lük deplasmanlardaki çatlak davranışları sunulmuştur.  $L/500$  deplasmanı tüm kirişlerde elastik davranış bölgesine,  $L/100$  deplasmanı ise önemli plastik şekil değiştirmelerin olduğu plastik bölgeye karşılık gelmektedir (Şekil 2.41). Bu deplasman değerlerinde test kirişlerine işaretlenmiş çatlak dağılımları EK A'da verilmiştir.



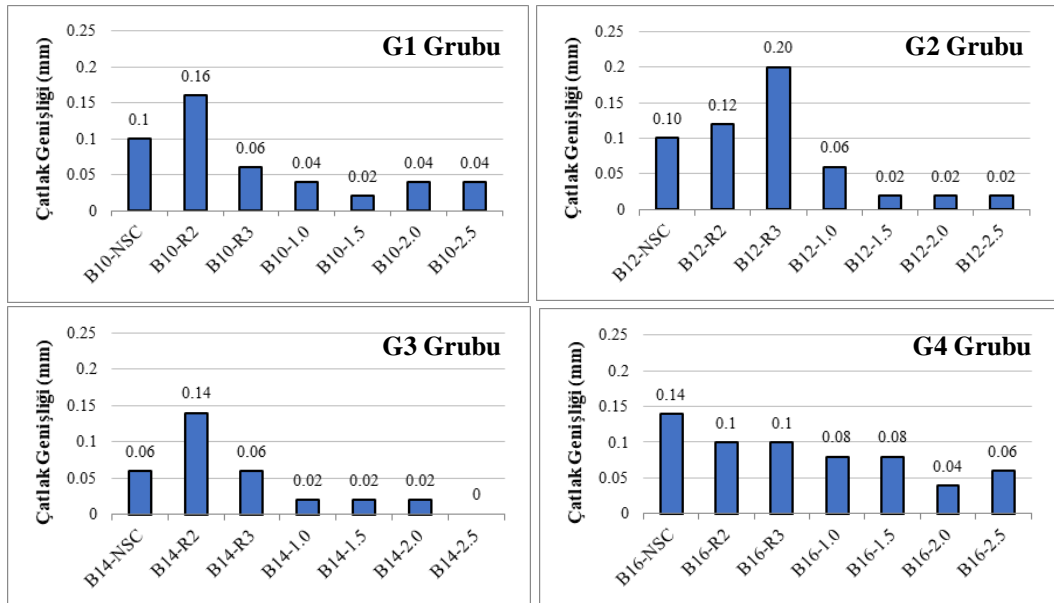
Şekil 2.41:  $P-\delta$  davranışı üzerinde çatlak ölçümü sunulan deplasman değerleri.

$L/500$ 'lük düşey deplasman için elde edilen çatlak dağılımları ve maksimum çatlak genişlikleri Şekil 2.42, 2.43'de,  $L/100$ 'lük düşey deplasman için elde edilen çatlak dağılımları ve maksimum çatlak genişlikleri Şekil 2.44, 2.45'de gösterilmiştir.

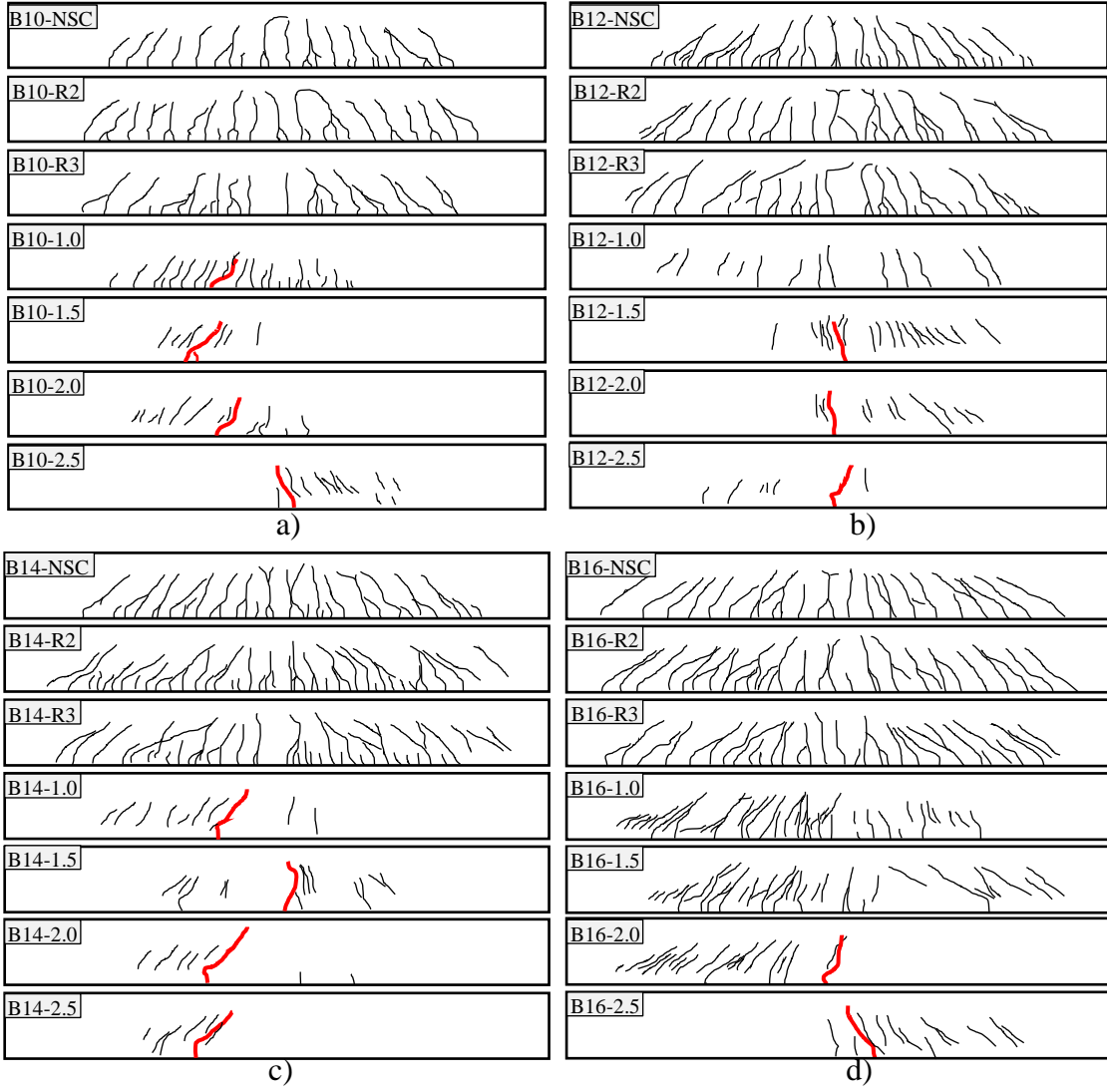




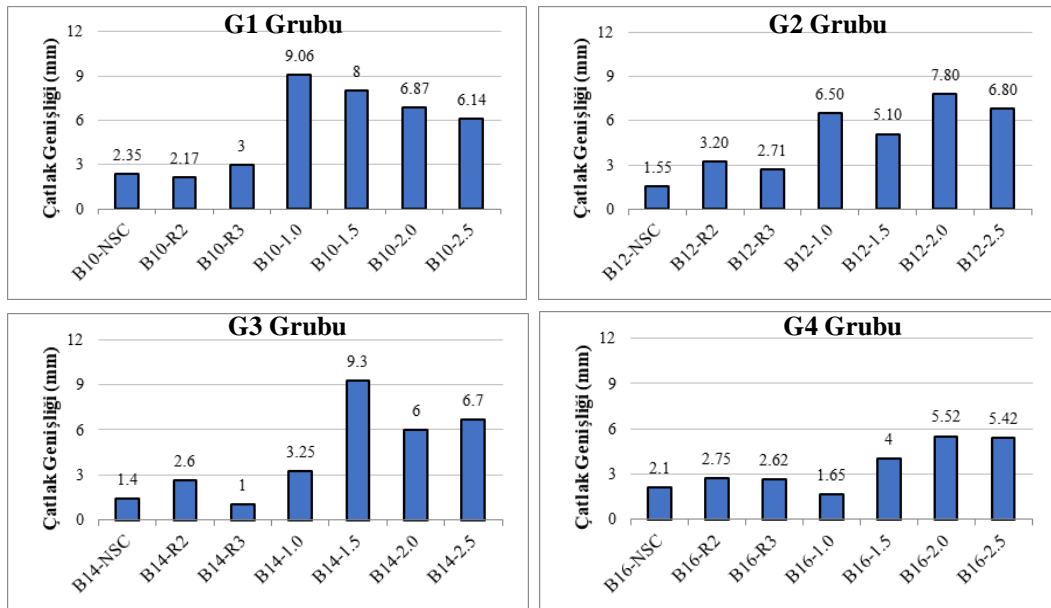
**Şekil 2.42:** Kirişlerin çatlak dağılımları a) G1 grubu kirişleri b) G2 grubu kirişleri, c) G3 grubu kirişleri, d) G4 grubu kirişleri



**Şekil 2.43:** Kirişlerde ölçülen maksimum çatlak genişlikleri (L/500 için).



Şekil 2.44: Kirişlerin çatlak dağılımları a) G1 grubu kirişler, b) G2 grubu kirişler, c) G3 grubu kirişler, d) G4 grubu kirişler.



Şekil 2.45: Kirişlerdeki maksimum çatlak genişlikleri (L/100 için).

Elastik bölgeyi temsil eden L/500'lük deplasman değerinde; UYDB'li kirişlerde ve GB'li kirişlerde benzer çatlak dağılımları elde edilmiştir. UYPLB içeren kirişlerde ise çatlak sayıları ve çatlak genişlikleri belirgin şekilde azalmıştır. UYPLB kirişler arasında en yüksek orana sahip G4 kirişlerinde liflerin çatlakları daha az sınırladığı görülmüştür.

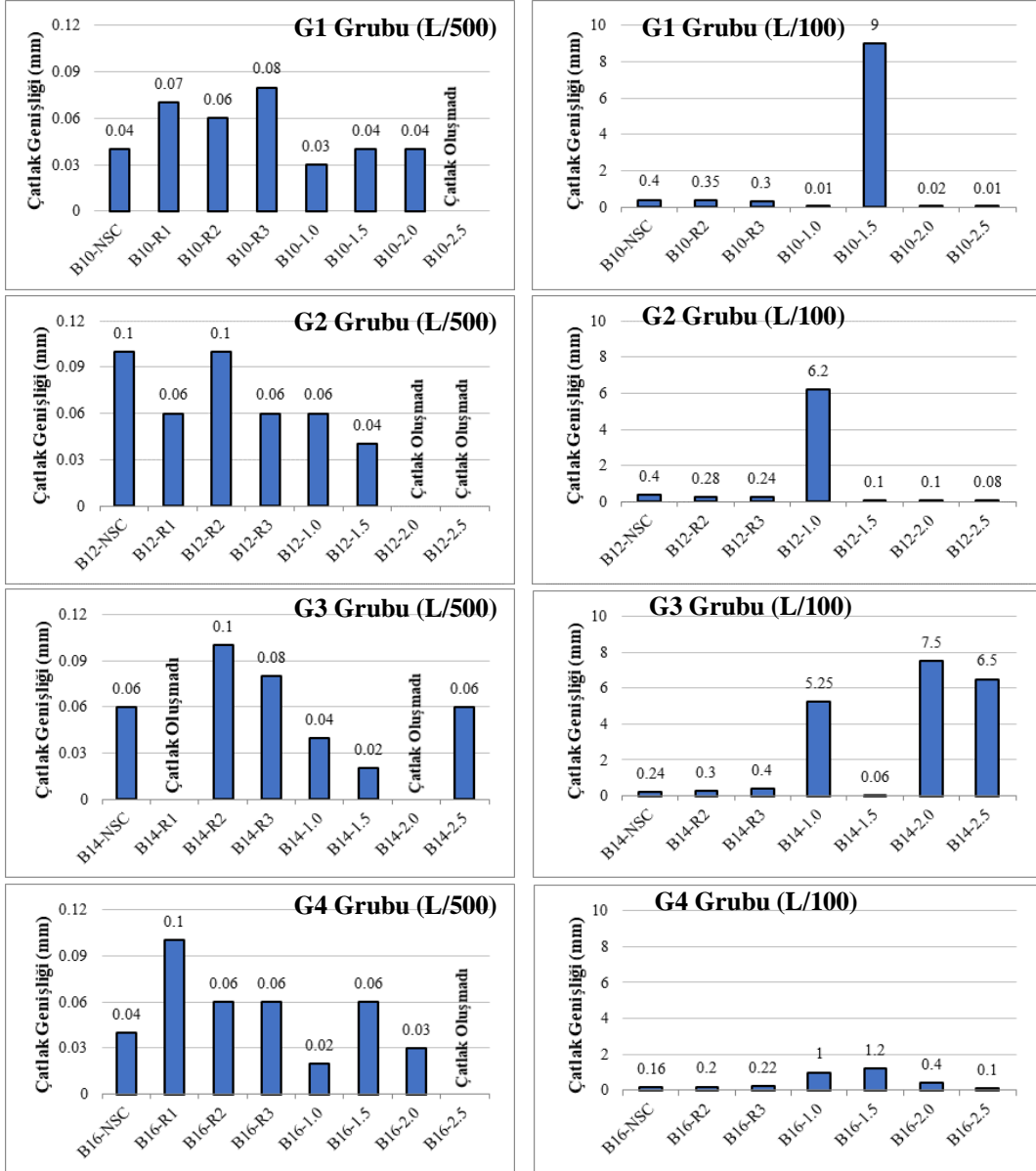
Plastik bölgeyi temsil eden L/100'lük deplasman değerinde; UYDB kullanılan kirişlerde maksimum çatlak genişlikleri GB'li kirişlere benzer elde edilmiştir. UYPLB içeren kirişler GB'li kirişlerle karşılaştırıldığında UYPLB kullanımı belirgin şekilde çatlak sayılarını azaltmış, ancak maksimum yük sonrası büyük çatlak lokalleşmesi sebebiyle çatlak genişlikleri genel olarak GB'li kirişlere göre artış göstermiştir. Bu deplasman değeri B16-2.0 ve B16-2.5 kirişleri için liflerin sağladığı pekleşme bölgesine karşılık geldiğinden büyük çatlak lokalleşmesi oluşmamıştır.

L/500 ve L/100 deplasman değerlerindeki maksimum kesme çatlak genişlikleri Şekil 2.46'da karşılaştırılmıştır. L/500 değerinde %2.0 ve %2.5 lif oranlarında UYPLB kirişlerde çatlak oluşumu büyük ölçüde sınırlandırılmış veya engellenmiştir. %1.0 ve %1.5 lif oranlarında ise GB'li ve UYPLB'li kirişlerde benzer mertebede kesme çatlakları oluşumu gözlenmiştir. Ancak, UYPLB içeren kirişlerdeki kesme çatlakları, orta bölgede büyük eğilme çatlak oluşumu ile birlikte azalmaya başlamıştır.

L/100'lük deplasman değerine ulaşıldığında G1, G2 ve G3 gruplarında, çatlak lokalleşmesi salt eğilme bölgesi içerisinde oluşan UYPLB'li kirişlerde kesme çatlakları hemen hemen kapanmıştır. Ancak çatlak lokalleşmesinin salt eğilme bölgesinin dışında oluşan UYPLB'li kirişlerde büyük (5.25-9mm arası) kesmeli eğilme çatlak oluşmuştur. G4 grubundaki UYPLB'li kirişlerin hepsinde çatlak lokalleşmesi salt eğilme bölgesinde oluşmasına rağmen kirişe gelen kesme kuvvetinin artmasından dolayı özellikle düşük lif oranlarında kesme çatlakları artmıştır.

Diğer etriyeli referans kirişlerinde ise 0.16-0.40 mm arasında değişen kesme çatlak genişlikleri gözlenmiştir. Kesme çatlaklarında lokalleşme oluşmayan durumlarda UYPLB'deki lifler çatlakları etriyeli kirişlere göre daha çok sınırladığı görülmüştür (Şekil 2.46).

Her iki deplasman değerinde de (L/500 ve L/100) UYPLB kirişlerde kesme kuvvetinin GB'li kirişlere göre çok daha yüksek olduğu gözönünde bulundurulduğunda liflerin hem eğilme hem de kesme çatlaklarını sınırlamada oldukça etkili olduğu söylenebilmektedir.



Şekil 2.46: Test kirişlerindeki maksimum kesme çatlak genişlikleri.

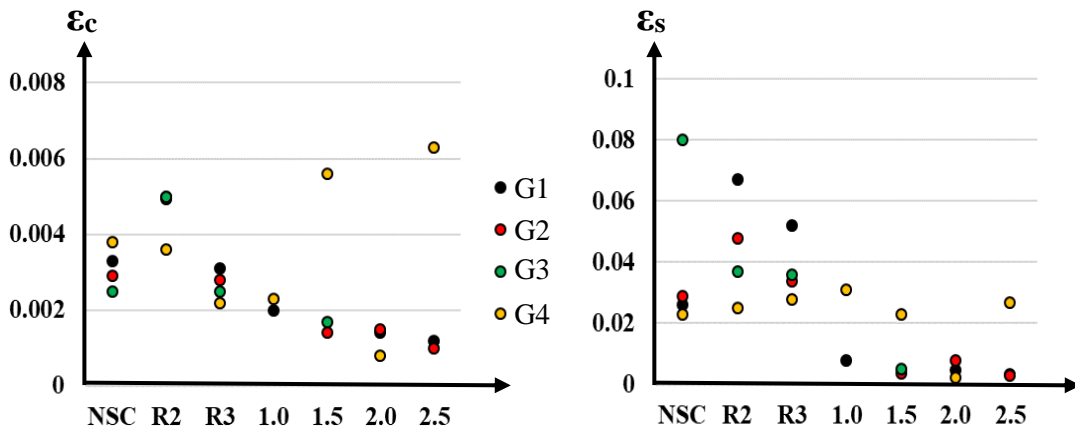
## 2.6.4 Beton ve Donatı Çeliğinin Şekildeğiştirme Davranışları

Kiriş testleri sırasında beton ve donatılar için şekildeğiştirme ölçerlerden (strain gauge) alınan ölçüm ve eğrilik ölçer düzeneğinden elde edilen ölçümler kullanılarak kiriş orta bölgesindeki 300 mm'lik kısmın ortalama beton ( $\epsilon_c$ ) ve çelik ( $\epsilon_s$ ) birim şekildeğiştirme değerleri belirlenmiştir (Ek A, Şekil A.13-A.18). Eğrilik ölçer düzeneğinden alınan ölçümler ile şekildeğiştirme ölçerlere göre daha ileri şekildeğiştirme değerleri elde edilebilmiştir.

Yapılan ölçümlerden kirişlerin  $P-\delta$  davranışında maksimum yüke karşılık gelen beton ve donatı birim şekildeğiştirmeleri belirlenerek Şekil 2.47’de gösterilmiştir. Ayrıca kirişlerin kırılma yüklerine karşılık gelen beton ve donatı şekildeğiştirmeleri de belirlenerek Şekil 2.48’de verilmiştir. Donatı birim şekildeğiştirme değerleri için eğrilik ölçer düzeneğinden elde edilen ortalama değerler esas alınmıştır. Beton birim şekildeğiştirme değerleri için ise genel olarak şekildeğiştirme ölçer değerleri esas alınmış, ancak bazı kirişlerde istenilen deplasman/yük seviyesinde ölçüm alınmadığı için eğrilik ölçer düzeneği sonuçları kullanılmıştır.

UYDB’li ve GB’li kirişlerde eğilme kapasitesine (dayanımına) ulaşıldığında beton birim kısaltmaları  $\varepsilon_c = 0.0022-0.005$  arasında, donatı birim uzamaları  $\varepsilon_s = 0.025-0.062$  arasında elde edilmiştir (Şekil 2.47). UYPLB içeren kirişlerde ise G4 grubu kirişleri dışında  $\varepsilon_c = 0.002$ ’nin,  $\varepsilon_s = 0.01$ ’in altında kalmıştır (Şekil 2.47). En yüksek donatılı G4 kirişlerinde  $\varepsilon_c = 0.0008-0.0063$  arasında,  $\varepsilon_s = 0.027-0.031$  arasında elde edilmiştir.

Bu sonuçlar, G1, G2 ve G3 grubu kirişlerinde maksimum yük sonrası dayanım azalmalarının beton ezilmesinden değil, lif sıyrılmalarından kaynaklandığını göstermektedir. Bu nedenle taşıma gücü limit durumunda geleneksel betonarmedeki kabullerin ( $\varepsilon_c = 0.003$  ve  $\varepsilon_s < 0.01$ ) geçerli olmadığı söylenebilmektedir. Maksimum donatı oranına sahip G4 kirişlerinde ise elde edilen şekildeğiştirmelerin geleneksel betonarmedekine yaklaştığı söylenebilmektedir.

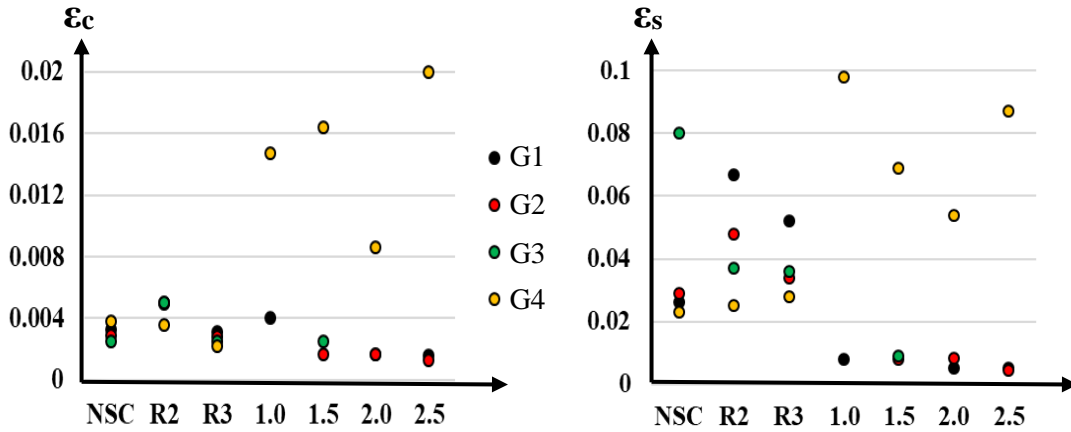


Şekil 2.47: Test kirişlerinde maksimum yüke karşılık gelen  $\varepsilon_c$  ve  $\varepsilon_s$  değerleri.

Kırılma yüküne (maksimum deplasman) ulaşıldığında, UYPLB'li kirişlerde, G4 grubu dışında  $\varepsilon_c = 0.004$ 'ün,  $\varepsilon_s = 0.08$ 'in altında kalmıştır (Şekil 2.48).  $\varepsilon_s$  değerleri ölçümlerde 0.08'in altında görünmesine rağmen çatlak lokalleşmesinin bulunduğu kesitte kopma uzamasına erişmiştir. Ancak ölçüm düzeneğinde kiriş ortasındaki 300mm'lik bölümün ortalama şekildeğiştirmesi gözönüne alındığı için çatlak bölgesindeki gerçek uzamalar belirlenememiştir.

G4 grubu kirişlerde, çatlak lokalleşmesinin etkisi çok daha az olduğu için betonda  $\varepsilon_c$  değerleri 0.02'lere ulaşmış, donatılardaki  $\varepsilon_s$  değerleri 0.10'lara ulaşmıştır.

Buna göre kırılma yükü bakımından da yüksek donatılı G4 grubu kirişlerinde beton ve donatı davranışlarının geleneksel betonarmeye yaklaştığı görülmektedir. Ancak UYPLB'nin sünekliği sayesinde basınç donatısı bulunmamasına rağmen kirişlerde oldukça sünek davranış elde edilebilmiştir (Şekil 2.26).



**Şekil 2.48:** Test kirişlerinde maksimum (kırılma) deplasmana karşılık gelen  $\varepsilon_c$  ve  $\varepsilon_s$  değerleri.

### **3. UYPLB KİRİŞLERİN EĞİLME KAPASİTELERİNİN BELİRLENMESİNE YÖNELİK NÜMERİK ÇALIŞMA**

UYPLB içeren betonarme elemanların davranışı içeriğindeki lifler nedeniyle geleneksel betonarmeden önemli farklılıklar göstermektedir. Lifli betonun özellikle çekme altındaki davranışı betonarme kesitteki dengeleri değiştirmekte bu da lif etkisinin gerilme ve şekildeğiştirme durumlarında gözönüne alınmasını gerektirmektedir. Asal çekme donatısının miktarına bağlı olarak lifin kapasiteye etkisi değişmekle birlikte, özellikle geleneksel betonarmede uygulanan çekme donatısı oranları için şekildeğiştirme durumunda genellikle lifli betonun çekmedeki şekildeğiştirme kapasitesi etkili olmaktadır. Bununla birlikte UYPLB'nin basınçtaki davranışının farklı olması da betonarme elemanlardaki gerilme-şekildeğiştirme davranışını geleneksel betonarmeden farklılaştırmaktadır. Eğilme kapasitesine (dayanımına) ulaşıldıktan sonraki davranış da liflerin etkisiyle değişmektedir. Liflerin küçük çatlakları sınırlandırması, buna karşılık büyük şekildeğiştirmelerin olduğu bölgelerde liflerin sıyrılarak büyük lokal çatlakların oluşması asal donatı uzamasını önemli ölçüde arttırmaktadır.

UYPLB için hazırlanan kılavuz ve standartlarda genellikle betonun çekme ve basınç altındaki davranışlarının malzeme testleri ile belirlenmesi ve betonarme kesit hesaplarında doğrudan testlerden elde edilen idealleştirilmiş modellerin kullanılması öngörülmektedir (Gowripalan ve Gilbert, 2000; JSCE, 2008; AFGC, 2013; NF P 18-710, 2016).

Bu detaylı yaklaşımlara alternatif olarak literatürde, UYPLB'nin kesitteki gerilme ve şekildeğiştirme etkisinin daha basit (amprik) ifadelerle gözönüne alındığı yaklaşımlar da geliştirilmektedir (Khalil ve Tayfur, 2013; Al-Hassani ve diğ., 2015; Chen ve diğ., 2018; Liu ve diğ., 2019; Turker ve diğ., 2019b).

Bu tez çalışmasında, UYPLB kirişlerin eğilme kapasitelerinin hesabına yönelik olarak AFGC 2013'de önerilen detaylı yaklaşım ve literatürde öne çıkan bazı basitleştirilmiş yaklaşımlar incelenmiş ve Bölüm 2'de deneysel olarak incelenen test kirişlerine uygulanmıştır.

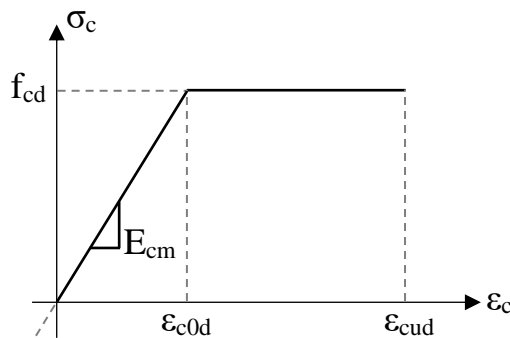
### 3.1 AFGC 2013'e Göre Basit Eğilmeye Maruz Elemanların Tasarımı

Fransa İnşaat Müh. Topluluğu tarafından Eurocode-2 (2008) ile uyumlu olarak hazırlanan AFGC (2013) "Ultra Yüksek Performanslı Beton: Öneriler" isimli dökümanda belirli malzeme testlerine dayanmak koşuluyla oldukça geniş kapsamlı UYPLB uygulamalarına olanak tanınmaktadır. Buna karşılık, mevcut diğer kılavuzlar (Gowripalan, N. ve Gilbert, 2000; JSCE 2008) lif içeriği bakımından belli kategorideki UYPLB uygulamalarında kullanılabilir. Bu nedenle çalışmada, AFGC (2013) dökümanı esas alınmıştır. AFGC (2013)'de eğilme tasarımı, taşıma gücü (dayanım) limit durumu ve kullanılabilirlik limit durumu olmak üzere iki aşamalı olarak yapılmaktadır. Kullanılabilirlik sınır durumu elemanın fonksiyonel yeterliliğini sağlamak amacıyla sehim, çatlak, gerilme sınırlandırmalarını içermektedir. Bu çalışmada, deneysel sonuçlarla karşılaştırmak üzere kirişlerin eğilme kapasitelerinin nümerik hesabı amaçlandığından taşıma gücü limit durumuna göre tasarım açıklanmıştır.

UYPLB içeren betonarme elemanların basit eğilmeye göre tasarımı için öncelikle basınç tasarım modelinin ve geleneksel betonarmeden farklı olarak çekme tasarım modelinin belirlenmesi gerekmektedir. Daha sonra UYPLB'nin çekme ve basınç şekil değiştirme kapasitesini de göz önüne alan taşıma gücü limit durumları ile kesit eğilme kapasiteleri hesaplanmaktadır. Bu aşamalar aşağıda anlatılmıştır.

#### 3.1.1 UYPLB'nin Basınç Tasarım Modelinin Belirlenmesi

AFGC 2013'de taşıma gücü limit durumu için önerilen basınç tasarım modeli Şekil 3.1'de gösterilmiştir.



Şekil 3.1: UYPLB'nin eksenel basınç tasarım modeli.



Bu modelde,  $f_{cd}$  tasarım basınç dayanımını,  $\varepsilon_{c0d}$  tasarım beton birim kısalması elastik sınır değerini,  $\varepsilon_{cud}$  tasarım beton birim kısalması sınır değerini,  $E_{cm}$  ortalama elastisite modülünü göstermektedir.

$f_{cd}$ ,  $\varepsilon_{c0d}$  ve  $\varepsilon_{cud}$  sırasıyla Denklem 3.1, 3.2 ve 3.3 ile belirlenmektedir.

$$f_{cd} = \alpha_{cc} f_{ck} / \gamma_c \quad (3.1)$$

$$\varepsilon_{c0d} = f_{cd} / E_{cm} \quad (3.2)$$

$$\varepsilon_{cud} = [1 + 14(f_{ctm} / f_{cm})] \varepsilon_{c0d} \quad (3.3)$$

Burada;  $\alpha_{cc}$  sünme, büzülme vb. etkileri dikkate alan katsayıyı (0.85 olarak önerilmektedir),  $f_{ck}$  karakteristik beton basınç dayanımını,  $f_{ctm}$  ortalama beton çekme dayanımını,  $\gamma_c$  UYPLB'nin EN 1992-1.1 (2005)'e göre belirlenen güvenlik katsayısını göstermektedir. Bu katsayı kalıcı etkiler durumunda 1.5, geçici etkiler durumunda 1.2 alınmaktadır.

$f_{ck}$  Denklem 3.4 ile belirlenmektedir.

$$f_{ck} = f_{cm} - ak.ss \quad (3.4)$$

Burada;  $f_{cm}$  ortalama beton basınç dayanımını,  $ak$  testi yapılan numune sayısına göre belirlenen azaltma katsayısını (Tablo 3.1),  $ss$  numunelerin basınç dayanımlarına ait standart sapma değerini ifade etmektedir.

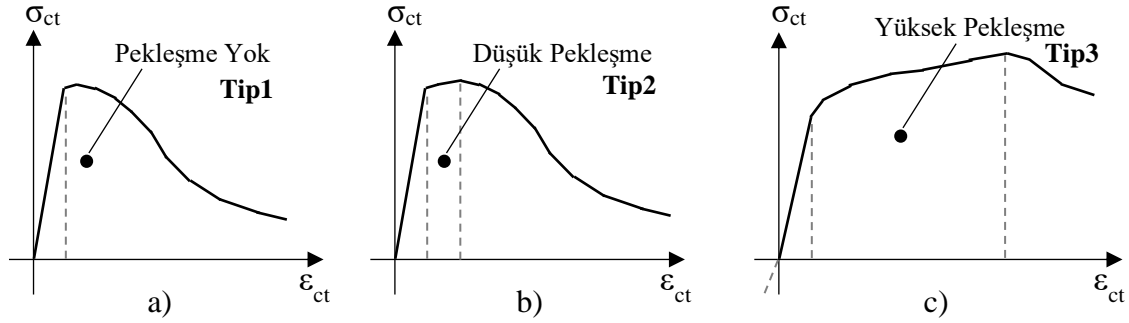
$f_{cm}$  değerinin belirlenmesi için beton numuneleri üzerinde aksel basınç testleri yapılması gerekmektedir. Bu testlerde kullanılacak numune özellikleri ve test koşulları ve istenen kırılma şekilleri EN 12390-1 (2012), EN 12390-2 (2009), EN 12390-3 (2009)'e göre belirlenmektedir. Buna göre 11 mm çapında 22 mm yüksekliğinde silindir numuneler önerilmekte,  $l_f$  lif boyutu,  $D_{maks}$  maksimum agrega çapı olmak üzere  $5x l_f$  ve  $6x D_{maks}$ 'dan az olmayan boyutlardaki küp ve silindir numunelerine de dönüşüm uygulamak koşuluyla izin verilmektedir.  $E_{cm}$  beton basınç dayanımı için yapılan basınç testleri ile belirlenebileceği gibi çekme testlerine ait gerilme-birim uzama değerlerinden de elde edilebilmektedir.

**Tablo 3.1:** Kırılan numune sayısına bağlı  $ak$  katsayıları tablosu.

	Numune Sayısı									
	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
<b>ak</b>	2.920	2.353	2.132	2.015	1.943	1.895	1.860	1.833	1.812	1.796

### 3.1.2 UYPLB'nin Çekme Tasarım Modelinin Belirlenmesi

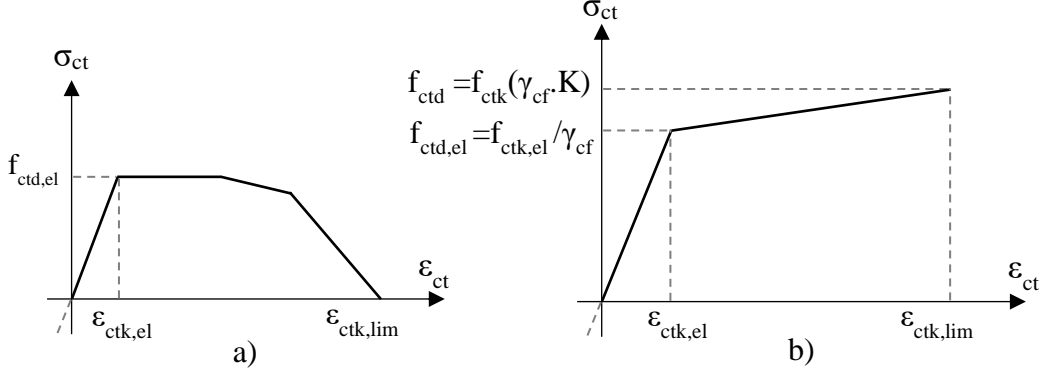
AFGC'de, UYPLB'ler çekme davranışı bakımından üç sınıfa ayrılmaktadır. Bunlar beton çekme gerilmesi - beton birim uzaması ( $\sigma_{ct} - \epsilon_{ct}$ ) formunda Şekil 3.2'de şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.2: UYPLB'nin eksenel çekme altındaki karakteristik  $\sigma_{ct} - \epsilon_{ct}$  ilişkileri a) Tip1, b) Tip2, c) Tip3.

Tip1 olarak isimlendirilen davranışta matrisin elastik dayanımına ( $f_{ctk,el}$ ) ulaşıldıktan sonra yumuşama davranışı gözlenir. Tip2 olarak isimlendirilen davranışta ise elastik dayanım sonrası düşük düzeyde pekleşme gözlenir. Bu iki davranışta genellikle düşük lif oranlarında veya lifli matrisin etkinliğinin düşük olduğu durumlarda karşılaşılr. Tip3 davranışında ise elastik dayanım sonrası önemli ölçüde pekleşme davranışı gözlenir. Bu davranışta pekleşme bölgesinde çok sayıda kılcal çatlak oluşur ve maksimum gerilme sonrası tek büyük çatlak lokalleşmesi gerçekleşir. Tip3 davranışı yüksek ve etkin lif içerikleri durumunda elde edilebilir.

Betonarme elemanların tasarımında gözönüne almak amacıyla bu üç davranış tipi idealleştirilerek çekme için tasarım modelleri önerilmektedir. Bu aşamada lif yönlendirmesinde çok etkili olan en kesit boyutlarını gözönüne almak amacıyla elemanlar “ince” ve “kalın” olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. ( $l_f$ ) lif boyu ve  $e$  eleman kalınlığı olmak üzere  $e \leq 3l_f$  olan elemanlar “ince”  $e > 3l_f$  olan elemanlar “kalın” olarak sınıflandırılmaktadır. Bu çalışmada incelenen kirişler “kalın” sınıfına girdiği için ince elemanlarla ilgili bilgilere yer verilmemiştir. Kalın elemanlar için önerilen modeller Şekil 3.3'de verilmiştir.



**Şekil 3.3:** UYPLB için önerilen çekme tasarım modelleri a) Tip1 ve Tip2 için, b) Tip3 için.

Şekil 3.3'deki grafiklerde  $E_{cm}$  basınç için de kullanılabilen çekme elastisite modülünü,  $f_{ctd,el}$  tasarım beton elastik çekme dayanımını,  $f_{ctd}$  tasarım beton çekme dayanımını,  $f_{ctk,el}$  karakteristik beton elastik çekme dayanımını,  $f_{ctk}$  karakteristik beton çekme dayanımını,  $\varepsilon_{ctk,el}$  karakteristik beton birim uzaması elastik sınır değeri,  $\varepsilon_{ctk,lim}$  karakteristik beton birim uzaması sınır değeri,  $K$  lif yönelme katsayısını göstermektedir.  $\gamma_{cf}$  UYPLB'nin eksenel çekme altındaki güvenlik katsayısını göstermektedir ve kalıcı etkiye maruz yüklemde 1.3, geçici etkiye maruz yüklemde 1.05 alınmaktadır.

$K$  katsayısı lif dağılımının ve yönlendirmesinin çekme dayanımı üzerindeki etkisini ifade etmektedir.  $K_{local}$  ve  $K_{global}$  olmak üzere iki farklı  $K$  katsayısı tanımlanmıştır.  $K_{local}$  belirli bölgelerdeki lif dağılımının önemli olduğu durumlarda (öngerme gerilmelerinin yoğunlaştığı bölgeler gibi) kullanılır.  $K_{global}$  ise lokal kusurların önemli etkisinin olmadığı daha büyük ölçekteki etkisini belirlemede (bir plağın eğilme veya kesme kapasitesi gibi) kullanılır.

$K$  katsayıları, tasarımı gerçekleştirilen elemanın belirli bölgelerinde kesimler yapılarak elde edilen numune (prizma veya çekme numunesi) testleri ile belirlenmektedir. En az altı numune için yapılan test sonuçları kullanılarak  $K$  katsayılarının elde edilmesi prizma numuneleri için denklem 3.5, 3.6'da verilmiştir.

$$K_{global} = \frac{M_{m,max}^{ort}}{M_{s,max}^{ort}} \quad (3.5)$$

$$K_{lokal} = \frac{M_{m,max}^{ort}}{(M_{s,max})_{min}} \quad (3.6)$$

$M_{m,max}^{ort}$ , kalıp ile üretilen prizma numunelerinin eğilme testlerinden elde edilen maksimum momentlerin ortalamasını,  $M_{s,max}^{ort}$  yapı elemanından kesilerek elde edilen prizma testlerine ait maksimum momentlerin ortalamasını göstermektedir.  $(M_{s,max})_{min}$  ise kesilerek elde edilen prizma testlerindeki en küçük eğilme momentini ifade etmektedir. Eğilme testi yerine aksel çekme testi yapılması halinde aynı bağıntılar kullanılmakta ancak moment yerine çekme kuvveti kullanılmaktadır.

$K$  değerinin en az 1.00 alınması gerekmektedir. AFGC’de ön analizler için  $K_{global}=1.25$ ,  $K_{lokal}=1.75$  olarak önerilmektedir.

Tasarım modellerindeki parametrelerin belirlenmesi için direkt aksel çekme testleri yapılabileceği gibi, belirli koşullarda eğilme testleri yapılarak bunlardan dolayı olarak elde edilen sonuçlar da kullanılabilir. Aksel çekme testlerinin uygulanması ve sonuçlarının değerlendirilmesinde karşılaşılan zorluklar nedeniyle AFGC’de eğilme testlerinin kullanılması önerilmektedir. Önerilen eğilme testleri ve yapılacak ölçümler UYPLB tiplerine bağlı olarak Tablo 3.2’de özetlenmiştir.

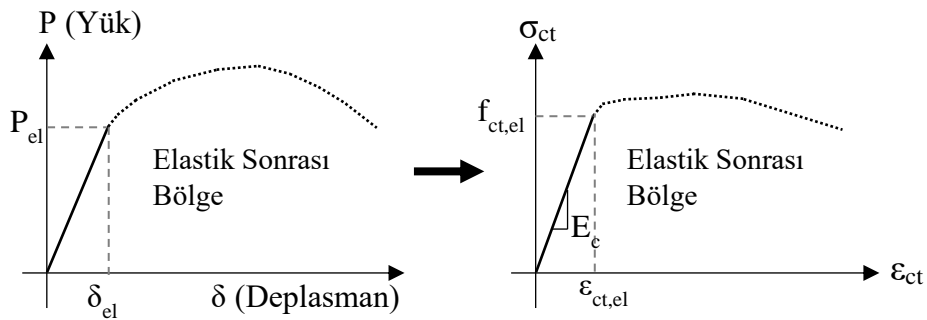
**Tablo 3.2:** UYPLB çekme tasarım modeli için gerekli eğilme testleri ve ölçümleri.

Beton Tipi	Elastik Bölge		Elastik Sonrası Bölge	
	Test Türü	Deneyden Elde Edilen Veri	Test Türü	Deneyden Elde Edilen Veri
Tip1 ve Tip2			3 Noktalı Eğilme Testi (Çentikli Numune)	Yük-çatlak açıklığı ilişkisi
Tip3	4 Noktalı Eğilme Testi	Yük-deplasman ilişkisi	4 Noktalı Eğilme Testi	Yük-birim uzama ilişkisi Yük-deplasman ilişkisi

Tablo 3.2 incelendiğinde, beton tipleri için gerekli testler elastik bölge ve elastik sonrası bölge olarak ikiye ayrılmaktadır. Elastik bölgenin belirlenmesinde tüm beton tipleri için 6 adet prizma numunesi üzerinde dört noktalı eğilme testi yapılması ve test aşamasında yüklerle birlikte açıklık ortasındaki deplasmanın ölçülmesi gerekmektedir. Elde edilen yük-deplasman ( $P-\delta$ ) ilişkisi üzerinde doğrusallığın bozulduğu nokta belirlenmekte ve elemana

ait elastik çekme gerilmesi ( $f_{ctk,el}$ ) ve elastisite modülü ( $E_{cm}$ ) homojen kesitin basit eğilme durumu gözönüne alınarak hesaplanmaktadır (Şekil 3.4).

Eksenel çekme altındaki elastik çekme dayanımını elde etmek için eğilmeden elde edilen değere bir dönüşüm katsayısı uygulanması gerekmektedir. Ancak, geleneksel beton gibi gevrek malzemelerde önemli olan bu dönüşüm katsayısı sünek malzemelerde çok daha küçük (1'e yakın) olmaktadır (AFGC, 2013). Bu nedenle, çalışmada kullanılan beton için eğilme testlerinden elde edilen elastik çekme dayanımı için dönüşüm katsayısı uygulanmamıştır ( $f_{cm}=f_{ct,fl}$ ).



**Şekil 3.4:** Malzemesinin elastik bölgesinin belirlenmesi.

Elastik sonrası bölgede, Tip1 ve Tip2 betonları için üç noktalı eğilme testi yapılması ve test aşamasında yük ile birlikte açıklık ortasındaki çatlak genişliğinin ölçülmesi gerekmektedir. Elde edilen yük-çatlak genişliği ( $P-w$ ) ilişkisinden yararlanılarak betonun çekme gerilmesi - çatlak genişliği ( $\sigma-w$ ) ilişkisinin elde edilmesi hedeflenmiştir. Bunun için AFGC kesitteki denge durumunu ve çatlak oluşumunu esas alan bir “geri analiz yöntemi” önermektedir (Tablo 3.3).

Tip3 betonları için ise elastik sonrası bölgede dört noktalı eğilme testleri istenmektedir. Bu testlerden alınacak ölçüm için iki alternatif sunulmuştur. Alternatiflerin birinde yük ile birlikte açıklık ortasında kesit alt lifindeki birim uzama miktarı ( $\epsilon_{ct}$ ) belirlenmektedir. Test sonucunda elde edilen moment-birim uzama ( $M-\epsilon_{ct}$ ) ilişkisi üzerine, en kesite ait gerilme ve birim uzama durumlarını esas alan bir “geri analiz yöntemi” uygulanarak betonun  $\sigma_{cr}-\epsilon_{ct}$  davranışı elde edilmektedir. Diğer alternatifte ise yük ile birlikte açıklık ortası düşey deplasmanı ( $\delta$ ) belirlenmektedir. Bu durumda birim uzama ( $\epsilon_{ct}$ ) direkt olarak belirlenemediği için öncelikle  $P-\delta$  ilişkisinden yararlanılarak açıklık ortasındaki moment-eğrilik ( $M-\varphi$ ) ilişkisinin belirlenmesi hedeflenir. Bunun için testi yapılan elemanın deplasman, dönme ve

eğrilik ilişkilerini esas alan bir “geri analiz” yöntemi kullanılır (Tablo 3.3). Orta kesite ait  $M-\varphi$  ilişkisi belirlendikten sonra bu kesite ait gerilme ve birim uzama durumlarını esas olan bir başka geri analiz yöntemi uygulanarak  $\sigma_{ct}-\varepsilon_{ct}$  ilişkisi elde edilir (Tablo 3.3).

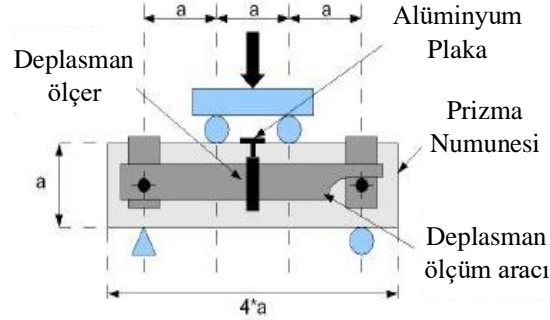
**Tablo 3.3:** Çekme tasarım modelinin elastik sonrası bölgesi için eğilme testlerine uygulanacak geri analizler.

UYPLB	Deneyden Elde Edilen Veri	Geri Analiz Yöntemi ile Elde Edilen Veri	Tasarım $\sigma_{ct}-\varepsilon_{ct}$ Modeli
Tip1 ve Tip2			
Tip3			

Bu çalışma kapsamında yapılan testler sonucunda kullanılan betonun Tip3 sınıfında olduğu belirlenmiş ve çekme davranışına ait parametreler için dört noktalı prizma eğilme testleri kullanılmıştır. Eğilme testlerinde  $P-\delta$  ilişkisi elde edilmiş ve yukarıda belirtilen geri analiz yaklaşımları ile  $\sigma_{ct}-\varepsilon_{ct}$  ilişkisi belirlenmiştir. Bu nedenle çalışmada sadece Tip3 betonu ve  $P-\delta$  ilişkisinin elde edildiği dört noktalı eğilme testi detaylı olarak açıklanmış, diğerlerine yer verilmemiştir.

### 3.1.2.1 Tip3 Beton Sınıfı İçin Çekme Tasarım Modelinin Belirlenmesi

AFGC'ye göre Tip3 beton sınıfı için dört noktalı prizma eğilme testi ile çekme tasarım modelinin belirlenmesi için Şekil 3.5'de verilen deney düzeneği kullanılmaktadır.

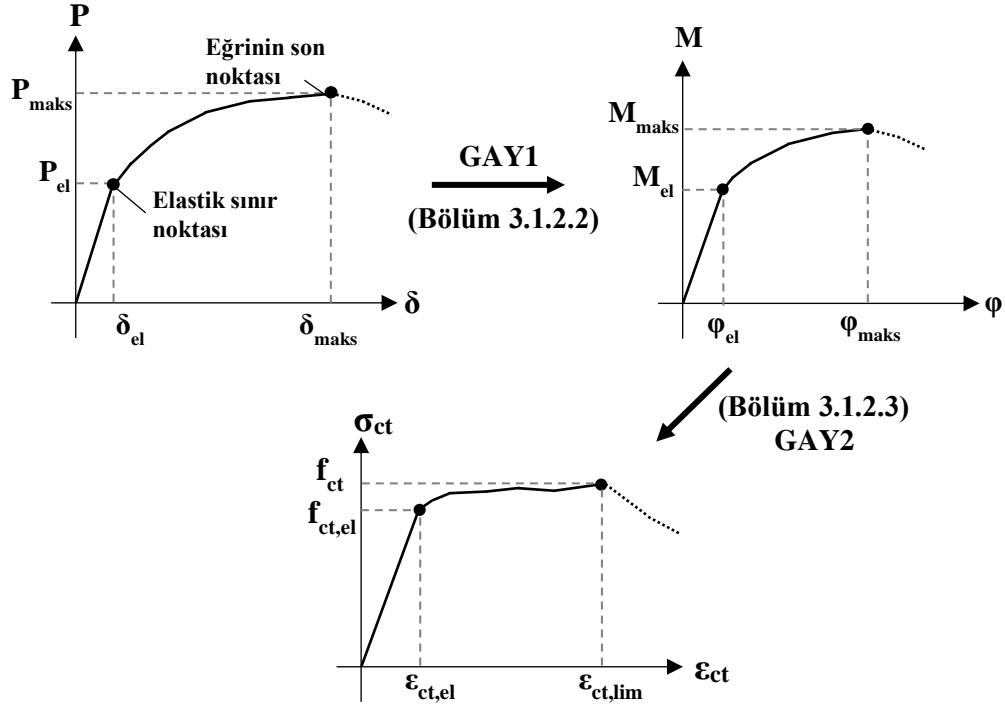


Şekil 3.5: 4 noktalı eğilme test düzeneği.

Düzenekte sabit ve kayıcı mesnetler üzerine yerleştirilen prizma numunesine aralarında kesit yüksekliği kadar mesafe bulunan iki tekil yük uygulanmaktadır. Yükleme hızı olarak piston kontrollü yükleme durumunda 0.25 mm/dk, numune deplasmanı kontrollü yükleme durumunda 1mm/dk önerilmektedir. Test esnasında yük ve açıklık ortası deplasmanı ölçülmektedir. Kare enkesitli olması gereken prizmalarda lif boyuna bağlı olarak farklı boyutlarda prizmalar (7x7x28 cm, 10x10x40 cm, 14x14x56 cm) kullanılabilir (AFGC, 2013).

Deney sonucunda yapılan ölçümlerden  $P-\delta$  ilişkisi elde edilmektedir.  $P-\delta$  ilişkisinde, lineerliğin gözle görünür şekilde bozulduğu nokta elastik sınır noktasıdır.  $P-\delta$  ilişkisinde maksimum yük sonrasında dayanım azalması ve büyük çatlak lokalleşmesi başladığı için bu yumuşama bölümü gözönüne alınmamaktadır.

Böylece elastik ve elastik sonrası bölümü belirlenen  $P-\delta$  ilişkisinin elastik sonrası kısmına ( $\delta_{el}-\delta_{maks}$  arasında) Bölüm 3.1.2.2 ve Bölüm 3.1.2.3'de açıklanan geri analizler uygulanarak ilk önce kesite ait  $M-\varphi$  ilişkisi daha sonra betonun  $\sigma_{ct}-\epsilon_{ct}$  ilişkisi elde edilmektedir (Şekil 3.6). Sonuç  $\sigma_{ct}-\epsilon_{ct}$  ilişkisinde lineerliğin bittiği nokta, beton elastik çekme dayanımına ( $f_{ct,el}$ ) ve maksimum gerilme, beton maksimum çekme dayanımına ( $f_{ct}$ ) karşılık gelmektedir.



Şekil 3.6: Prizma testinden eleman  $\sigma_{ct} - \epsilon_{ct}$  ilişkisinin elde edilmesi.

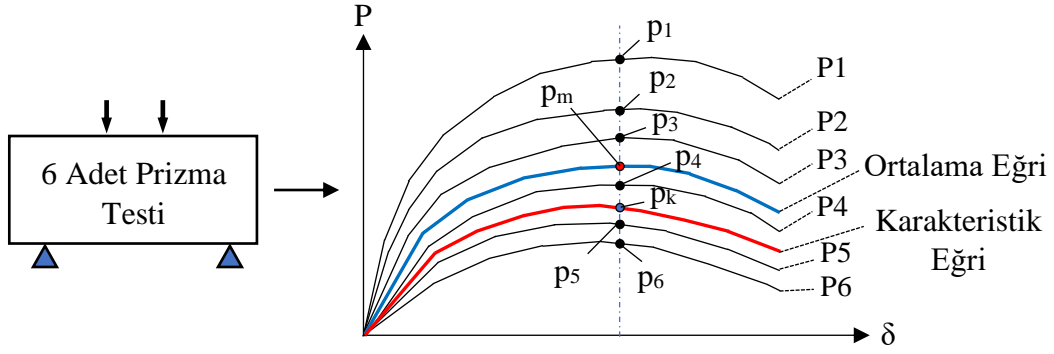
AFGC'ye göre UYPLB'e ait çekme modelinin belirlenmesi için en az 6 adet prizma testi yapılması ve elde edilen  $P-\delta$  ilişkilerinden ortalama  $P-\delta$  ve karakteristik  $P-\delta$  ilişkisinin belirlenmesi gerekmektedir. Test sonucunda elde edilen  $P-\delta$  ilişkilerinin her bir kesitindeki yük değerlerine Denklem 3.7 uygulanarak ortalama  $P-\delta$  ilişkisi elde edilmektedir. Elde edilen ortalama  $P-\delta$  ilişkisinin her bir noktası için Denklem 3.8 uygulanarak karakteristik  $P-\delta$  ilişkisi belirlenmektedir (Şekil 3.7). Şekil 3.7'de 6 adet prizma testi için ortalama eğri ve karakteristik eğrinin belirlenmesi şematik olarak gösterilmiştir.

$$p_k = p_m - ak.ss \quad (3.7)$$

$$p_m = \left( \sum_{i=1}^{ns} p_i \right) / ns \quad (3.8)$$

Burada;  $p_k$   $P-\delta$  ilişkilerinin her birinde aynı deplasman değerlerine göre belirlenen karakteristik yük değerini,  $p_m$  ortalama yük değerini,  $ns$  test yapılan numune sayısını,  $p_i$   $i$  nolu numuneye ait  $P-\delta$  ilişkisinin ilgili yük değerini göstermektedir (Şekil 3.7). Bu işlem  $P-\delta$  ilişkisinin karakteristiğini temsil edecek şekilde yeter sayıda nokta için tekrarlanmalıdır.

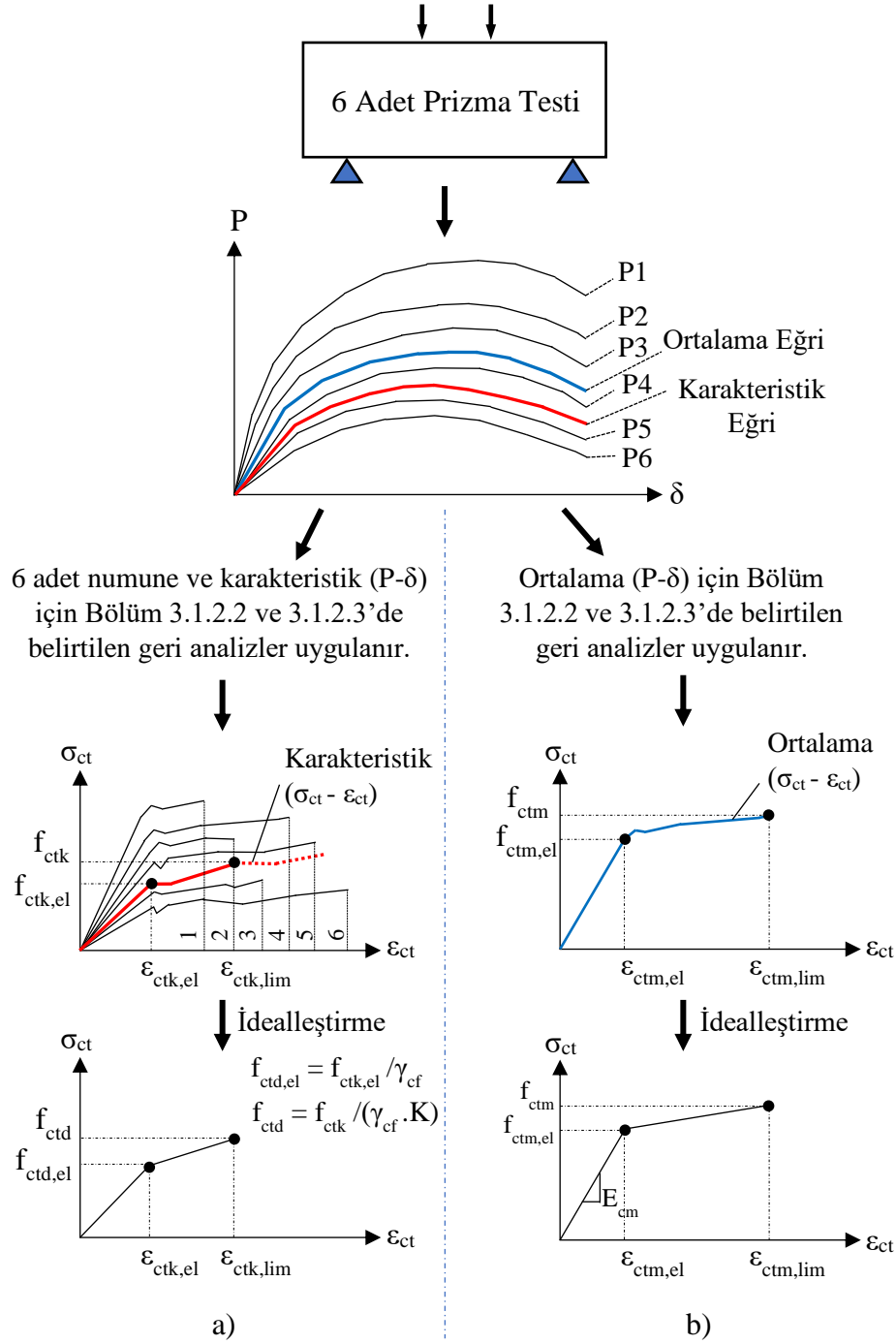




**Şekil 3.7:** 6 adet prizma testinden ortalama ve karakteristik  $P-\delta$  ilişkisinin elde edilmesi.

6 adet numuneye ait  $P-\delta$  ilişkileri ve bu eğrilerin ortalamasından elde edilen karakteristik  $P-\delta$  ilişkisine Bölüm 3.1.2.2 ve 3.1.2.3’de verilen geri analiz yöntemleri uygulanarak  $\sigma_{cr}-\varepsilon_{ct}$  ilişkisi elde edilmektedir. Karakteristik eğrinin maksimum birim uzama değeri, 6 adet numune için elde edilen  $\varepsilon_{ct,lim}$  değerlerinin en küçük ikincisi alınarak belirlenir. Ayrıca bu değer 0.0025 ile sınırlandırılır (AFGC 2013). Sonuç olarak elde edilen karakteristik  $\sigma_{cr}-\varepsilon_{ct}$  ilişkisinde elastik ve maksimum gerilme değerlerine göre iki doğru parçası ile idealleştirme yapılır. Buna ilgili güvenlik katsayıları uygulanarak tasarım çekme modeli belirlenir (Şekil 3.8a).

Çalışma kapsamında AFGC tasarım modelinden farklı olarak, test kirişlerine ait sonuçları karşılaştırmak amacıyla, ortalama dayanımların ve deplasmanların kullanıldığı, güvenlik katsayılarının göz önüne alınmadığı ayrı bir çekme hesap modeli belirlenmiştir (Şekil 3.8b). Bu hesap modeli için 6 adet numuneye ait  $P-\delta$  ilişkisinden elde edilen ortalama  $P-\delta$  ilişkisine Bölüm 3.1.2.2 ve 3.1.2.3’de verilen geri analiz yöntemleri uygulanarak ortalama  $\sigma_{cr}-\varepsilon_{ct}$  ilişkisi elde edilmiştir. Bu ilişki elastik ve maksimum gerilme değerleri üzerinden lineerleştirme yapılarak “ortalama dayanımlar için hesap modeli” elde edilmiştir.

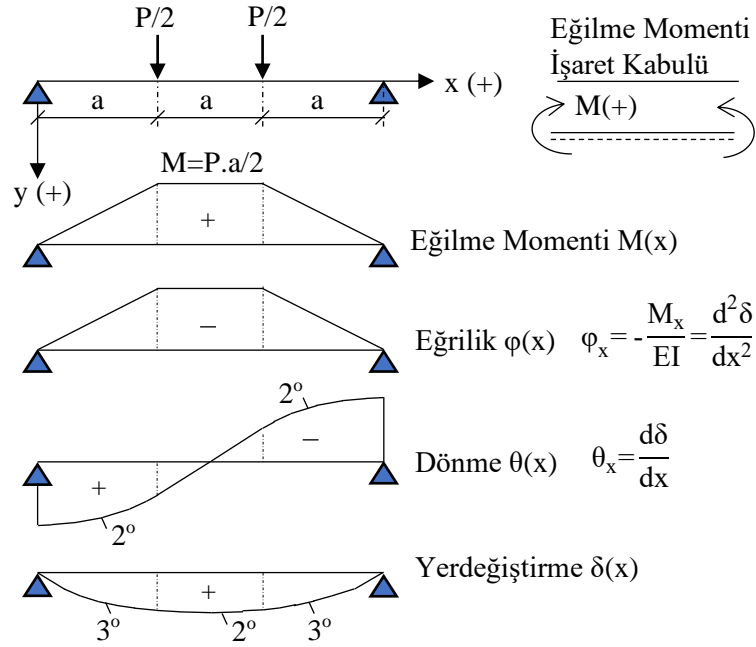


**Şekil 3.8:** Çekme modelinin belirlenmesi a) Tasarım dayanımı için, b) Ortalama dayanım için.

### 3.1.2.2 Moment Deplasman İlişkisinden Geri Analiz ile $M-\phi$ İlişkisinin Belirlenmesi (GAY1)

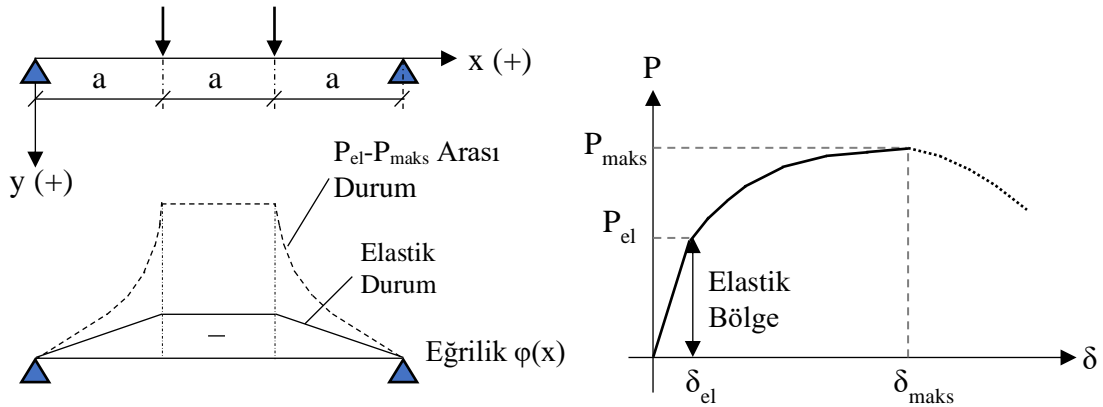
Prizma numunelerinin dört noktalı eğilme testleri sonucunda açıklık ortasına ait  $P-\delta$  ilişkisi elde edilmektedir. Bu ilişkidен yararlanılarak açıklık ortası kesitine ait  $M-\phi$  ilişkisinin belirlenmesi için elemanın deplasman-dönme-eğrilik fonksiyonlarından

yararlanılabilmektedir. İlk çatlama öncesi elastik durumda incelenen elemana ait deplasman, dönme, eğrilik ve moment fonksiyonu ve aralarındaki diferansiyel bağıntılar Şekil 3.9’da gösterilmiştir. Bu bağıntılarda kayma şekildeğiştirmelerinin etkisi ihmal edilmiştir.



**Şekil 3.9:** Dört noktalı yüklenen basit kirişte moment, eğrilik, dönme ve deplasman fonksiyonları ve aralarındaki bağıntılar.

Betonda çatlamanın başlamasından sonra eğrilik, dönme ve deplasman fonksiyonları elastik duruma göre değişmektedir. Çatlak lokalleşmesinin başladığı maksimum yük değerine kadar yükleme noktaları arasındaki bölgede eğrilik sabit fonksiyonunu koruyarak artmakta, yük mesnet arası bölgede ise lineerliği kaybederek artmaktadır (Şekil 3.10).

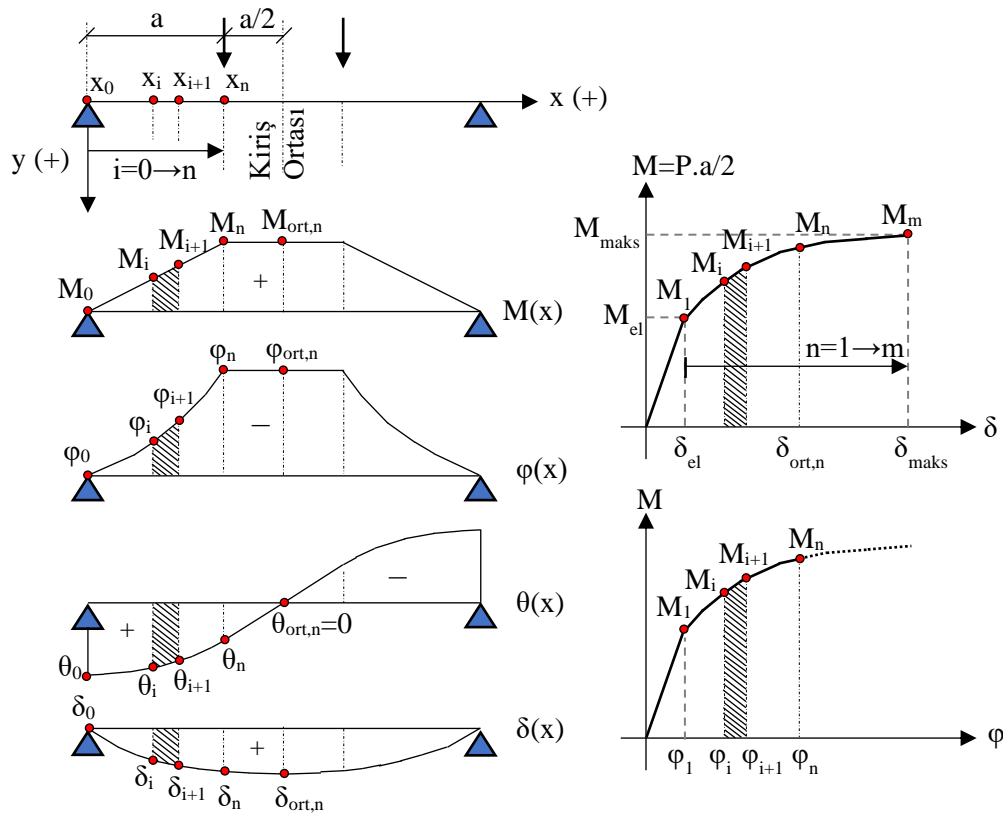


**Şekil 3.10:** İlk çatlama ve maksimum yük arasındaki eğrilik değişimi.

Maksimum yük sonrası ise açıklık ortasında büyük bir çatlak oluşumu (lokalleşme) ile eğrilik dağılımı tekrar değişmektedir.

Yüksek pekleşme etkisine sahip Tip3 sınıfına giren elemanlarda maksimum yüke kadar olan  $\sigma_{ct}-\varepsilon_{ct}$  ilişkisinin belirlenmesi yeterli olmaktadır. İlk çatlama yükü ile maksimum yük arasındaki bölgede moment, eğrilik, dönme ve deplasman dağılımları Şekil 3.11’de şematik olarak gösterilmiştir.

Şekil 3.11’de;  $i$  eleman üzerindeki kesit numarasını,  $n$  P- $\delta$  ilişkisindeki nokta numarasını,  $\varphi_i$   $i$ . kesitteki eğrilik değerini,  $\theta_i$   $i$ .kesitteki dönme değerini,  $\delta_i$   $i$ .kesitteki deplasman değerini,  $\varphi_{ort,n}$  kiriş ortasındaki eğrilik değerini,  $\delta_{ort,n}$  kiriş ortasındaki deneysel deplasman değerini,  $x_i$   $i$ . kesitin sol mesnetten uzaklığını,  $M_i$   $i$ . kesitteki moment değerini,  $M_{ort,n}$  kiriş ortasındaki deneysel moment değerini göstermektedir.



**Şekil 3.11:** İlk çatlama ve maksimum yük arasındaki eğrilik değişimi.

Düşey deplasman sırasıyla eğrilik ve dönme fonksiyonlarının integrasyonundan oluştuğundan deneysel deplasmandan geriye geçiş yapılarak eğrilik elde edilebilmektedir.

Literatürde geri analiz olarak isimlendirilen bu yaklaşım için çeşitli yöntemler bulunmaktadır (Qian ve Li, 2008; Rigaud ve diğ., 2011; Baby ve diğ., 2012). Bu çalışmada aşağıda açıklanan iteratif yöntem kullanılmıştır. Düşey deplasmandan eğrilige geçiş için kullanılan bu yöntem çalışmada Geri Analiz Yöntemi 1 (GAY1) olarak adlandırılmıştır.

Deney esnasında yapılan ölçümlerden açıklık ortası deplasmanı  $\delta_{ort,n}$  belirlenmektedir. Yükler arasındaki bölgede eğriliğin sabit olması ve orta noktada dönmenin sıfır olması şartları kullanılarak sol yükleme altındaki kesite ait  $\varphi_n$ ,  $\theta_n$  ve  $\delta_n$  için eğrilik ve dönme fonksiyonları ile Denklem 3.9, 3.10 ve 3.11 elde edilebilir. Yük mesnet arasındaki bölgede ise yeterince küçük aralıklara sahip ardışık kesitler arasındaki eğrilik ilişkisi doğrusal kabul edilerek bu bölgeye ait dönme ve deplasman bağıntıları Denklem 3.12 ve 3.13 ile ifade edilebilir. Bu denklemlerdeki  $x_i$  Denklem 3.14 ile belirlenir.

$$\varphi_i = \varphi_{ort,n} \quad (3.9)$$

$$i = n \quad \theta_i = \varphi_i \cdot a \quad (3.10)$$

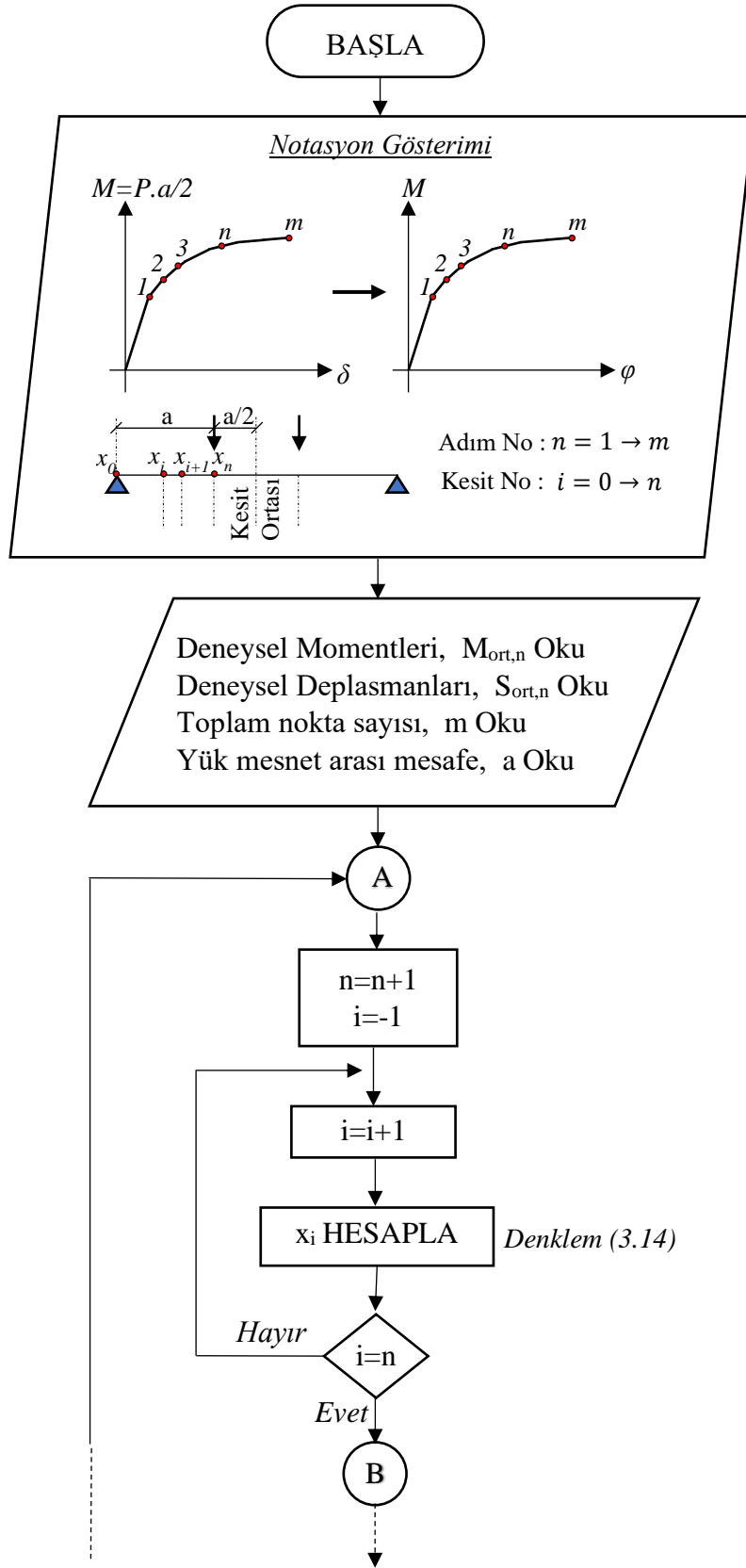
$$\delta_i = \delta_{ort,n} - \theta_i \cdot a/2 \quad (3.11)$$

$$0 \leq i < n \quad \theta_i = \theta_{i+1} - \left( \frac{(\varphi_{i+1} + \varphi_i)(x_{i+1} - x_i)}{2} \right) \quad (3.12)$$

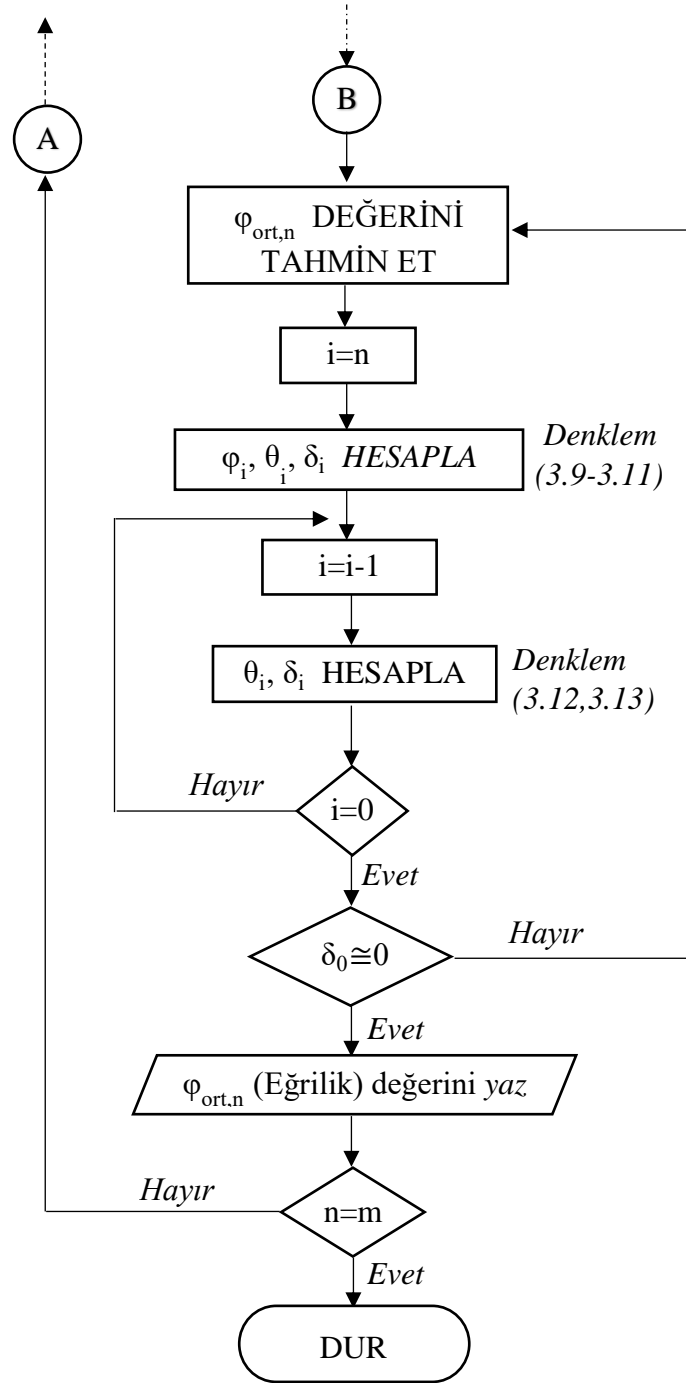
$$\delta_i = \delta_{i+1} - \left( \frac{(\varphi_{i+1} + 2 \cdot \varphi_i)(x_{i+1} - x_i)^2}{2} + \theta_i(x_{i+1} - x_i) \right) \quad (3.13)$$

$$x_i = (M_i/M_n)a \quad (3.14)$$

Sonuç olarak, açıklık ortasındaki eğrilik değerinin ( $\varphi_d$ ) tahmin edildiği ve mesnetteki yerdeğiştirmeye sınır şartı ( $\delta_0=0$ ) ile kontrol edildiği bir iterasyon uygulanarak eğrilik değeri belirlenebilmektedir. Bu işlem  $P-\delta$  ilişkisindeki yeter sayıda koordinat için uygulanarak  $M-\varphi$  ilişkisi elde edilir. Çalışma kapsamında bu geri analizi uygulamak üzere Excel arayüzünü kullanan visual basic tabanlı bir yazılım hazırlanmıştır. Yazılıma ait algoritma akış diyagramı Şekil 3.12’de, hazırlanan yazılım kodu EK B’de verilmiştir.



**Şekil 3.12:** GAY1 yönteminin akış diyagramı.

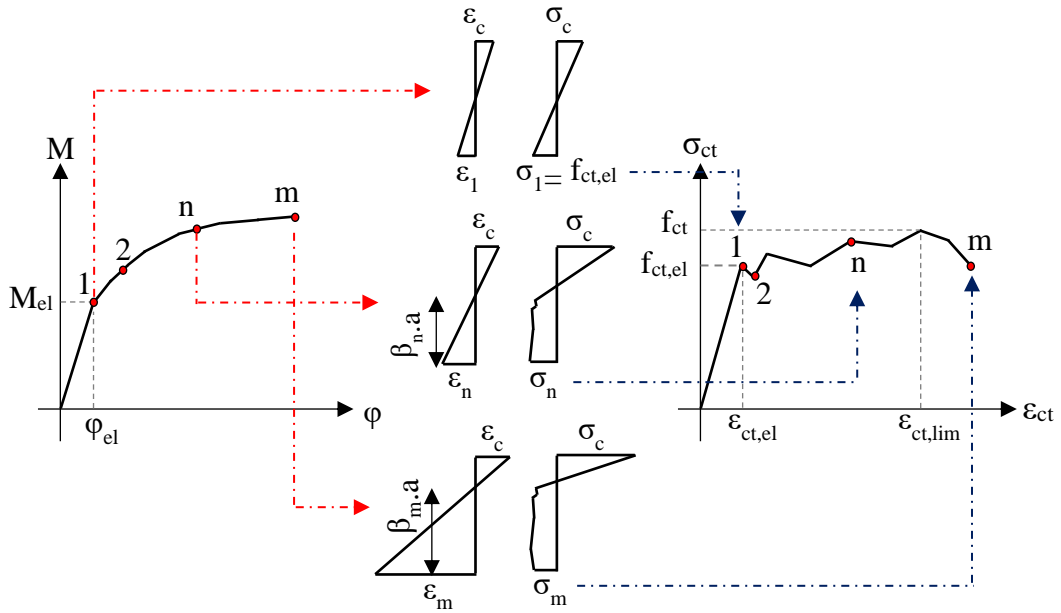


Şekil 3.12 (Devam)

### 3.1.2.3 $M-\varphi$ İlişkisinden Geri Analiz ile Betonun $\sigma_{ct} - \varepsilon_{ct}$ İlişkinin Belirlenmesi

(GAY2)

$M-\varphi$  ilişkisi bilinen bir kesitin her bir adımındaki gerilme ve şekil değiştirme durumlarından yararlanarak kesitin en alt lifine ait gerilme ve birim uzama değerleri elde edilebilmektedir. Etkiyen moment ve şekil değiştirme durumu belirli olan kesitten birim uzamaya ve ilgili gerilmeye geri geçiş yapıldığından bu prosedür de literatürde geri analiz olarak isimlendirilmektedir (Şekil 3.13) (AFGC, 2013). Çalışmada aşağıda açıklanan iteratif yöntem kullanılmış ve bu yöntem Geri Analiz Yöntemi 2 (GAY2) olarak isimlendirilmiştir.



Şekil 3.13: Kesite ait  $M-\varphi$  ilişkisinden geri analizle  $\sigma_{ct}-\varepsilon_{ct}$  ilişkisinin elde edilmesi.

Elastik bölgede tarafsız eksen kesit ortasındadır ve gerilme dağılımı doğrusaldır. Elastik ötesi bölgede çatlakların oluşmasıyla beraber, basınç bölgesi azalmakta ve çekme bölgesindeki gerilme dağılımı eğriselleşmektedir (Şekil 3.13).

$M-\varphi$  ilişkisinin elastik bölgesinde Hooke kanunu geçerlidir. İlk adıma ait gerilme değeri Denklem 3.15 ile, birim uzama değeri ise Denklem 3.16 ile hesaplanabilmektedir (Şekil 3.13).

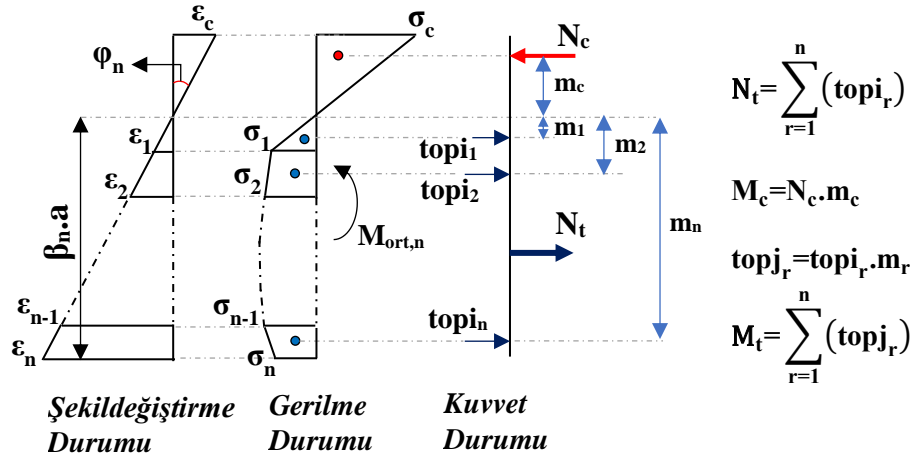
$$\sigma_1 = 6M_1 / (a^3) \quad (3.15)$$

$$\varepsilon_1 = (\sigma_1 \cdot \varphi_1 \cdot a^4) / (6M_1) \quad (3.16)$$



Burada;  $M_1$ , ilk adıma ait moment değerini,  $\varphi_1$ , ilk adıma ait eğrilik değerini,  $a$  kare prizma numunesine ait enkesit boyutunu göstermektedir.

$M-\varphi$  ilişkisinin plastik bölgesine ait adımlarda tarafsız eksen ve kesitin en alt lifine ait birim uzama ve gerilme değerleri bilinmemektedir. Ancak, tarafsız eksenin yerinin ( $\beta_n$ ) tahmin edilmesi durumunda, kesitin en alt lifindeki birim uzama ( $\varepsilon_n$ ) değeri, Denklem 3.17 ile hesaplanabilmektedir (Şekil 3.14).



Şekil 3.14: n. adıma ait şekildeğiştirme, gerilme ve kuvvet dağılımları.

$$\varepsilon_n = \varphi_n \beta_n a \quad (3.17)$$

Kesitin en alt lifine ait gerilme değerinin belirlenmesi için enkesitteki kuvvetlerin yatay dengesi ve kesitteki moment dengesinden yararlanılmaktadır (Şekil 3.14). Kesitteki yatay kuvvet dengesi Denklem 3.18’de verilmiştir.

$$N_c + N_t = 0 \quad (3.18)$$

Denklem 3.18’de  $N_c$  basınç bölgesindeki toplam kuvveti ifade etmekte ve Denklem 3.19 ile hesaplanmakta,  $N_t$  değeri ise çekme bölgesindeki toplam kuvveti ifade etmekte ve Denklem 3.20, 3.21 ile hesaplanmaktadır (Şekil 3.14).

$$N_c = -\frac{1}{2} (1 - \beta_n)^2 a^3 \cdot \varphi_n \cdot \sigma_1 / \varepsilon_1 \quad (3.19)$$

$$N_t = \sum_{r=1}^n topi_r \quad (3.20)$$

$$\text{topi}_r = (\varepsilon_r - \varepsilon_{r-1}) \left( \frac{\sigma_r + \sigma_{r-1}}{2} \right) \frac{a}{\varphi_n} \quad (3.21)$$

Denklem 3.18, Denklem 3.19-3.21'den yararlanılarak aşağıdaki şekilde düzenlenebilir.

$$N_c + \left( \sum_{r=1}^{n-1} \text{topi}_r + (\varepsilon_n - \varepsilon_{n-1}) \left( \frac{\sigma_n + \sigma_{n-1}}{2} \right) \frac{a}{\varphi_n} \right) = 0 \quad (3.22)$$

Denklem 3.22'de ilgili düzenlemeler yapılarak kesit yatay dengesini sağlayan gerilme değeri ( $\sigma_{n,1}$ ) Denklem 3.23 ile elde edilir.

$$\sigma_{n,1} = \left( \frac{-\varphi_n (N_c + nt)}{(\varepsilon_n - \varepsilon_{n-1}) \cdot a} \right) \cdot 2 - \sigma_{n-1} \quad (3.23)$$

$$nt = \sum_{r=1}^{n-1} \text{topi}_r \quad (3.24)$$

Kesitteki moment dengesi Denklem 3.25 ile hesaplanmaktadır.

$$M_{\text{ort},n} = M_c + M_t \quad (3.25)$$

Denklem 3.25'de  $M_{\text{ort},n}$  n. adımdaki deneysel moment değerini ifade etmektedir.  $M_c$  basınç bölgesindeki kuvvetlerin oluşturduğu moment değerini ifade etmekte ve Denklem 3.26 ile hesaplanmakta,  $M_t$  değeri ise çekme bölgesindeki kuvvetlerin oluşturduğu moment değerini ifade etmekte ve Denklem 3.27, 3.28 ile hesaplanmaktadır (Şekil 3.14).

$$M_c = \frac{a^4}{3} (1 - \beta_n)^3 \varphi_n \cdot \sigma_1 / \varepsilon_1 \quad (3.26)$$

$$M_t = \sum_{r=1}^n \text{topj}_r \quad (3.27)$$

$$\text{topj}_r = (\varepsilon_r - \varepsilon_{r-1}) \left( \frac{(2\varepsilon_r + \varepsilon_{r-1})\sigma_r + (2\varepsilon_{r-1} + \varepsilon_r)\sigma_{r-1}}{6} \right) \cdot \frac{a}{(\varphi_n)^2} \quad (3.28)$$

Denklem 3.25, Denklem 3.26-3.28'den yararlanılarak aşağıdaki şekilde düzenlenebilir.

$$M_{ort,n} = M_c + \left( \sum_{r=1}^{n-1} topj_r + (\varepsilon_n - \varepsilon_{n-1}) \left( \frac{(2\varepsilon_n + \varepsilon_{n-1})\sigma_n + (2\varepsilon_{n-1} + \varepsilon_n)\sigma_{n-1}}{6} \right) \cdot \frac{a}{(\varphi_n)^2} \right) \quad (3.29)$$

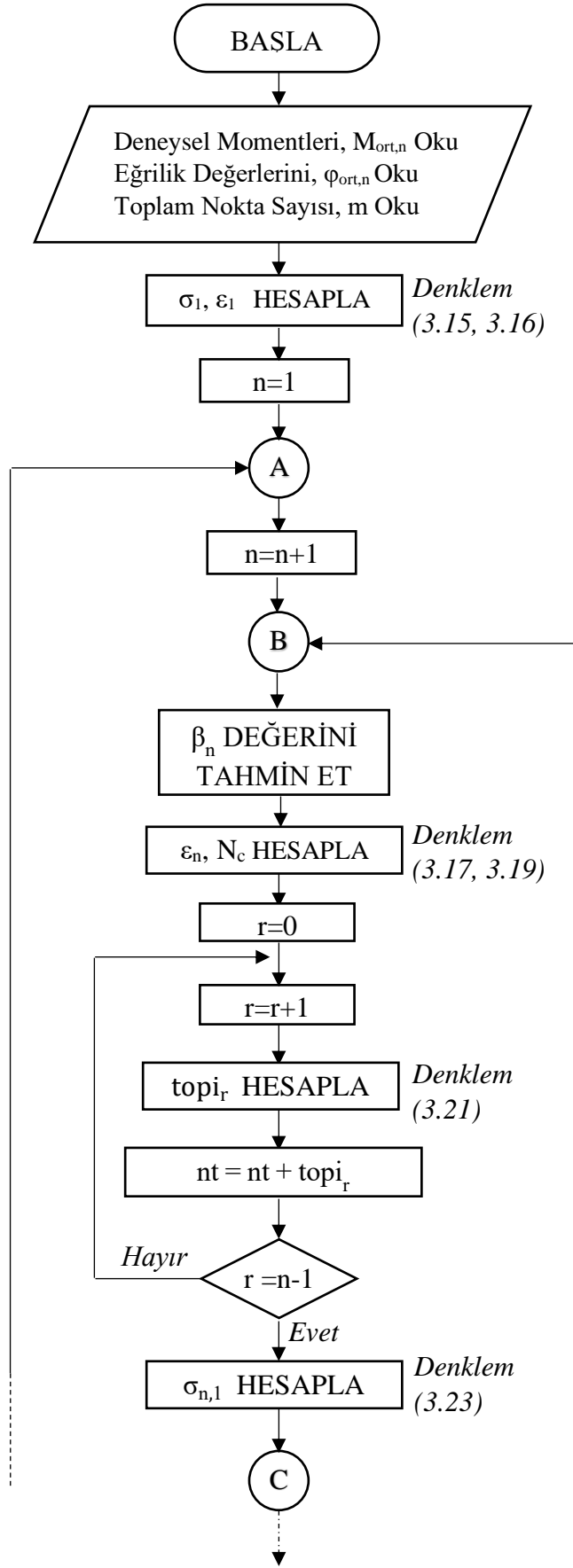
Denklem 3.29'da ilgili düzenlemeler yapılarak kesit moment dengesini sağlayan gerilme değeri ( $\sigma_{n,2}$ ) Denklem 3.30 ile elde edilir.

$$\sigma_{n,2} = \left( \frac{\left( \varphi_n^2 (M_{ort,n} - M_c - mt) \frac{6}{a(\varepsilon_n - \varepsilon_{n-1})} \right) - (2\varepsilon_{n-1} + \varepsilon_n)\sigma_{n-1}}{(2\varepsilon_n + \varepsilon_{n-1})} \right) \quad (3.30)$$

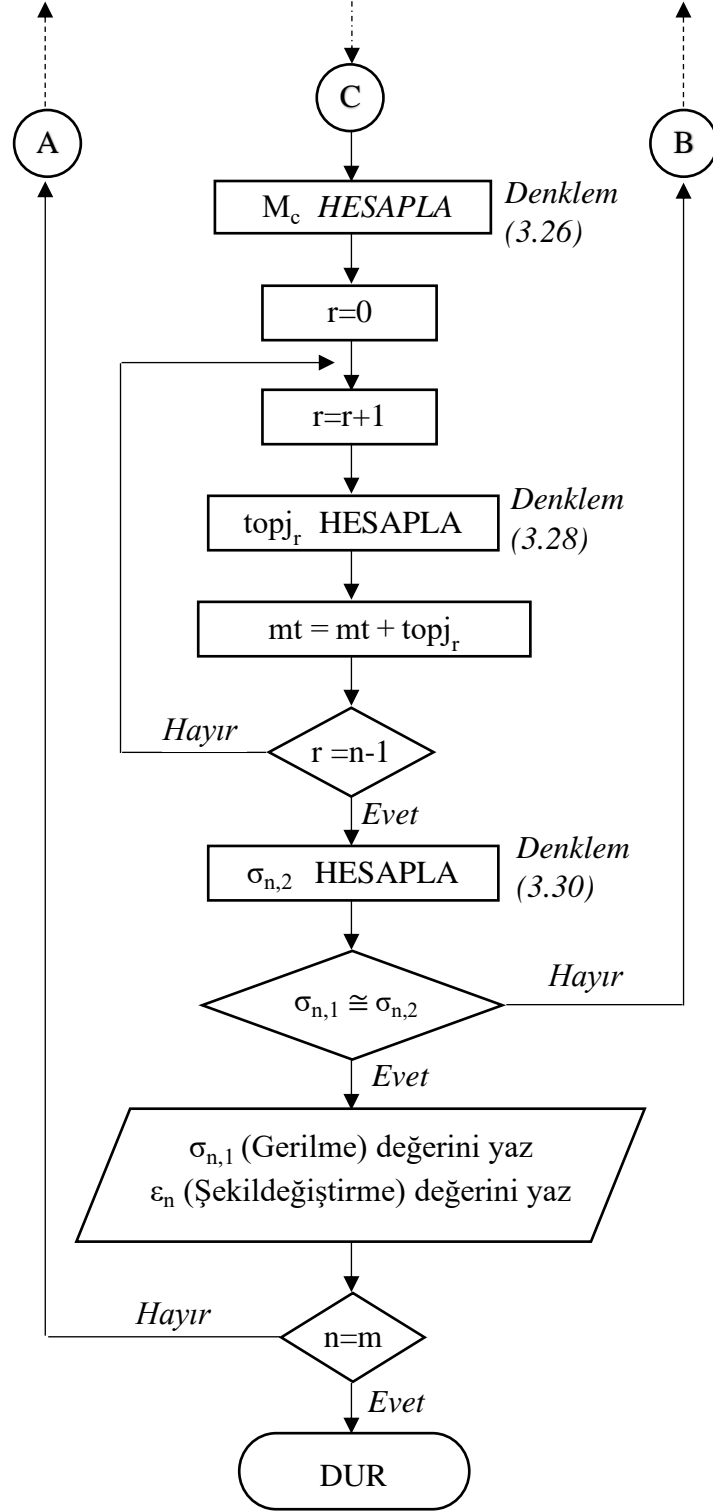
$$mt = \sum_{r=1}^{n-1} topj_r \quad (3.31)$$

Hesaplanan  $\sigma_{n,1}$  ve  $\sigma_{n,2}$  değerleri yeteri kadar yakın olması durumunda ilgili adımdaki birim uzama ve gerilme değerleri bulunmuş olmaktadır. Aksi durumda tarafsız eksen yerinin tahmini değiştirilerek işlemler tekrarlanır. Bu işlemler yeteri kadar nokta için tekrarlanarak ilgili kesitteki betona ait  $\sigma_{ct} - \varepsilon_{ct}$  ilişkisi elde edilmektedir.

Çalışma kapsamında bu geri analiz yöntemini uygulamak üzere Excel arayüzünü kullanan visual basic tabanlı bir yazılım hazırlanmıştır. Yazılıma ait algoritma akış diyagramı Şekil 3.15'de, hazırlanan yazılım kodu EK B'de verilmiştir.



Şekil 3.15: GAY2 yönteminin akış diyagramı.

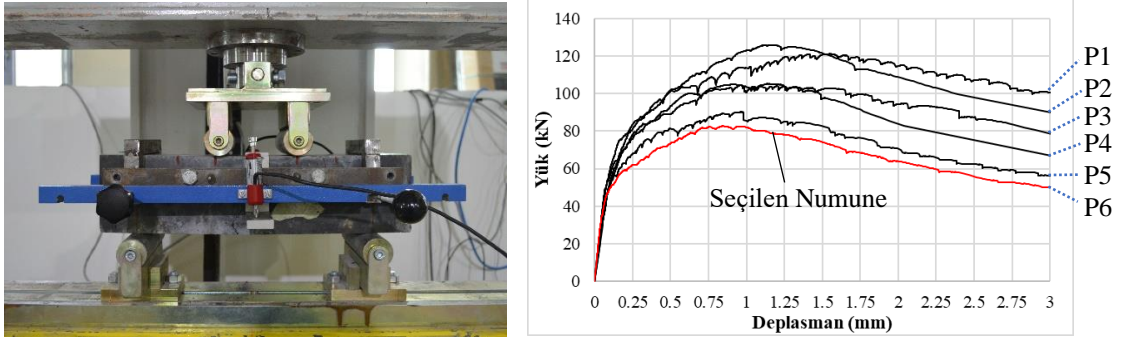


Şekil 3.15 (Devam)

### 3.1.2.4 Çekme Tasarım Modeline Ait Açıklamalı Nümerik Örnek

Bu bölümde, deneysel çalışmada farklı lif içerikleriyle üretilen UYPLB'lerden biri için AFGC'ye göre çekme tasarım (hesap) modelinin elde edilişi ayrıntılı olarak açıklanmıştır. Ayrıca deneysel sonuçları karşılaştırmak amacıyla ortalama dayanımların kullanıldığı çekme hesap modeline de yer verilmiştir.

Örnek olarak %2 lif oranına sahip UYPLB seçilmiş ve bu beton için Bölüm 2'de verilen prizma eğilme testi sonuçları kullanılmıştır. AFGC 2013'e göre uygulanan eğilme testi sonucunda elde edilen  $P-\delta$  ilişkileri Şekil 3.16'da verilmiştir. 6 numuneye ait  $P-\delta$  ilişkisi için ayrı ayrı uygulanacak olan geri analiz prosedürünün sadece P6 numunesi için uygulaması gösterilmiştir.



Şekil 3.16: %2 lif oranına sahip UYPLB için prizma eğilme testi ve elde edilen  $P-\delta$  ilişkileri

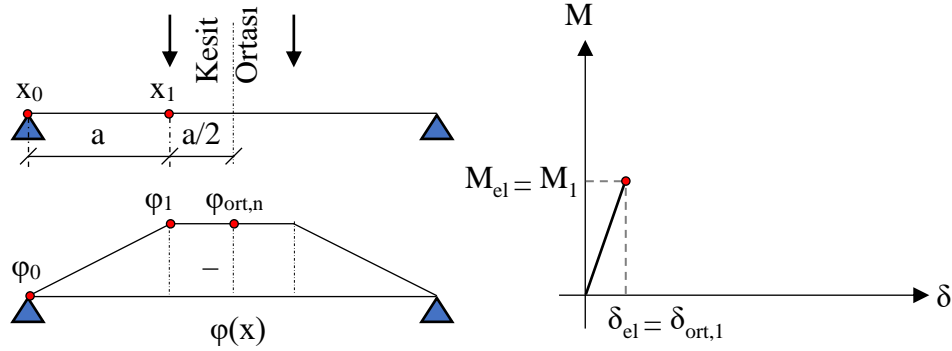
İlk olarak  $P-\delta$  ilişkisi, geri analizlerde oluşabilecek matematiksel stabilite sorunlarını engellemek ve örnek sunumunu kolaylaştırmak amacıyla az sayıda koordinat kullanılarak idealleştirilmiştir. Seçilen numuneye ait idealleştirme ve ilgili koordinatlar Tablo 3.4'de verilmiştir.

**Tablo 3.4:** Seçilen prizma numunesine ait  $P-\delta$  ilişkisi ve idealleştirilmesi.

Nokta No	$\delta$ (mm)	$P$ (kN)	$M = P.a/2$ (kNmm)	$P-\delta$ İlişkisi
0	0	0	0	
1	0.034	28	1400	
2	0.075	45.5	2275	
3	0.17	58	2900	
4	0.7	82	4100	
5	0.95	82.2	4110	

**$P-\delta$  ilişkisinden geri analiz ile  $M-\phi$  ilişkisinin elde edilmesi:** İdealleştirilen  $P-\delta$  ilişkisinde her bir nokta için Bölüm 3.1.2.2’de açıklanan GAY1 uygulanarak eğrilik değerleri belirlenir.

**1.Noktaya ait eğriliğin belirlenmesi:** 1. noktaya kadar davranış lineer elastik olduğu için aşağıda gösterilen üç kesite ait özellikler (eğrilik, dönme, deplasman) kullanılarak orta kesite ait eğrilik belirlenmiştir (Şekil 3.17).



**Şekil 3.17:** 1. noktaya ait eğriliğin belirlenmesi.

Deneysel eğrilik değeri  $\phi_1 = -0.35478 \times 10^{-6}$  1/mm olarak tahmin edilmiş ve Denklem 3.9, 3.10 ve 3.11 ile  $\phi_1$ ,  $\theta_1$ ,  $\delta_1$  belirlenmiştir.

$$\phi_1 = \phi_{ort,1} = -0.35478 \times 10^{-6} \text{ 1/mm}$$

$$\theta_1 = -\phi_1 \cdot a/2 = 0.35478 \times 10^{-6} \times 100/2 = 0.17739 \times 10^{-3} \text{ radyan}$$

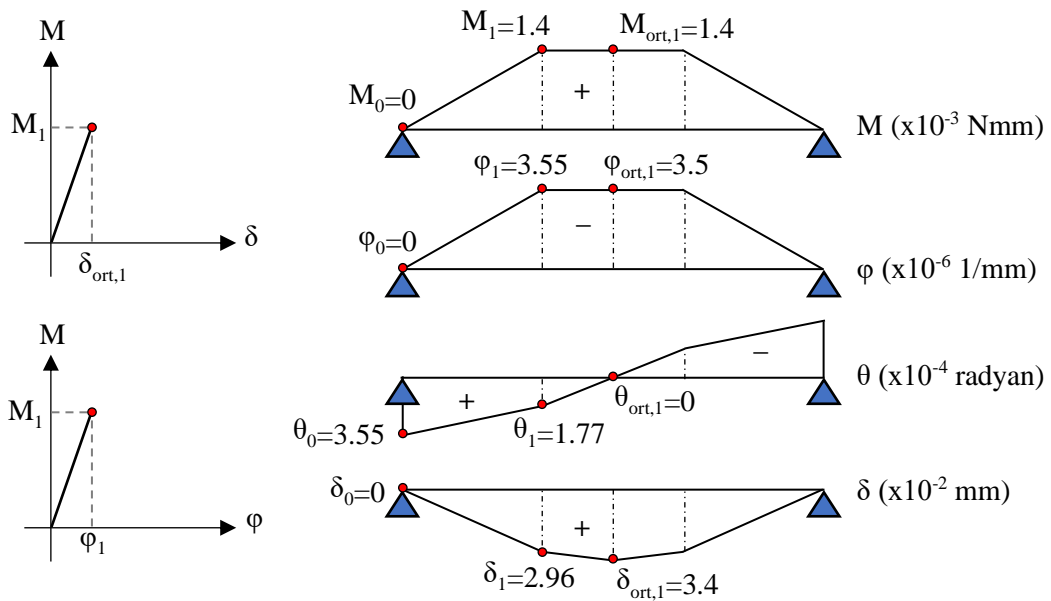
$$\delta_1 = \delta_{ort,1} - \theta_1 \cdot a/2 = 0.034 - 0.17739 \times 10^{-3} \times 100/2 = 0.0296 \text{ mm}$$

Denklem 3.12 ve 3.13 kullanılarak mesnet kesitindeki dönme  $\theta_0$  ve deplasman  $\delta_0$  belirlenmiştir.

$$\theta_0 = \theta_1 - \left( \frac{(\varphi_1 + \varphi_0)(x_1 - x_0)}{2} \right) = 1.7739 \times 10^{-4} - \left( \frac{(-3.5478 \times 10^{-6} + 0)(100 - 0)}{2} \right) = 0.35478 \times 10^{-3} \text{ radyan}$$

$$\delta_0 = \delta_1 - \left( \frac{(\varphi_1 + 2\varphi_0)(x_1 - x_0)^2}{6} + \theta_0(x_1 - x_0) \right) = 0.029565 - \left( \frac{(-3.5478 \times 10^{-6} + 2 \times 0)(100 - 0)^2}{6} + 3.5478 \times 10^{-4} (100) \right)$$

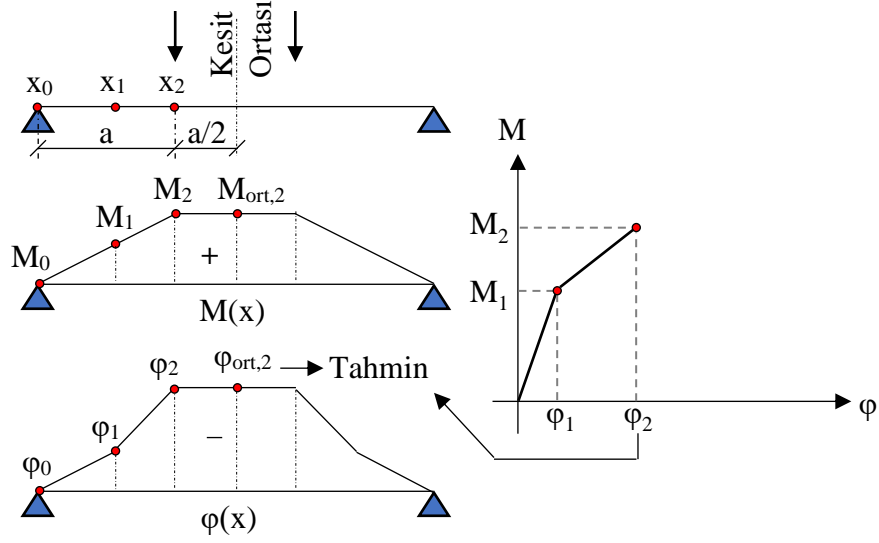
$\delta_0 = 2.5 \times 10^{-8} \text{ mm} < 10^{-3} \text{ mm}$  olduğundan mesnetteki deplasman sınır şartının sağlandığı kabul edilmiş ve bir sonraki adıma geçilmiştir. Sınır şartının sağlanmaması durumunda eğrilik değeri uygun şekilde değiştirilerek şart sağlanana kadar devam edilmesi gerekmektedir. İlk nokta için elde edilen eğrilik, dönme ve deplasman dağılımları Şekil 3.18'de gösterilmiştir.



**Şekil 3.18:**  $M_1$  momentine ulaşan numunede moment, eğrilik, dönme ve deplasman dağılımları.

**2. noktaya ait eğriliğin belirlenmesi:** 2.adımda ilk adımda belirlenen eğrilik ve moment değeri de kullanılarak toplam dört kesit için işlem yapılmış ve yük-mesnet arasındaki doğrusal olmayan davranış gözönüne alınmaya başlamıştır (Şekil 3.19).





**Şekil 3.19:** 2. noktaya ait eğriliğin belirlenmesi.

Bu aşamada  $M_1$  momentine karşılık gelen  $x_1$ , lineer moment dağılımından  $x_1 = (M_1/M_2) \cdot a = (1400/2275) \times 100 = 61.358$  mm olarak belirlenmiştir.

$M-\varphi$  ilişkisinin 2. noktasına ait eğrilik değeri  $\varphi_2 = -8.2568 \times 10^{-6}$  1/mm olarak tahmin edilmiş ve Denklem 3.9-3.10-3.11 ile

$$\begin{aligned}\varphi_2 &= \varphi_{\text{ort},2} = -8.2568 \times 10^{-6} \text{ 1/mm} \\ \theta_2 &= -\varphi_2 \cdot a / 2 = 8.2568 \times 10^{-6} \times 100 / 2 = 0.41284 \times 10^{-3} \text{ radyan} \\ \delta_2 &= \delta_{\text{ort},2} - \theta_2 \cdot a / 2 = 0.075 - 0.41284 \times 10^{-3} \times 100 / 2 = 0.0647 \text{ mm}\end{aligned}$$

olarak elde edilmiştir. Denklem 3.12 ve 3.13 kullanılarak bu adıma ait 1 ve 0 kesitlerindeki dönme ve deplasman değerleri aşağıdaki gibi belirlenmiştir.

$$\begin{aligned}\theta_1 &= \theta_2 - \left( \frac{(\varphi_2 + \varphi_1)(x_2 - x_1)}{2} \right) = 4.1284 \times 10^{-4} - \left( \frac{(-8.2568 \times 10^{-6} - 3.5478 \times 10^{-6})(100 - 61.518)}{2} \right) \\ \theta_1 &= 6.3985 \times 10^{-4} \text{ radyan}\end{aligned}$$

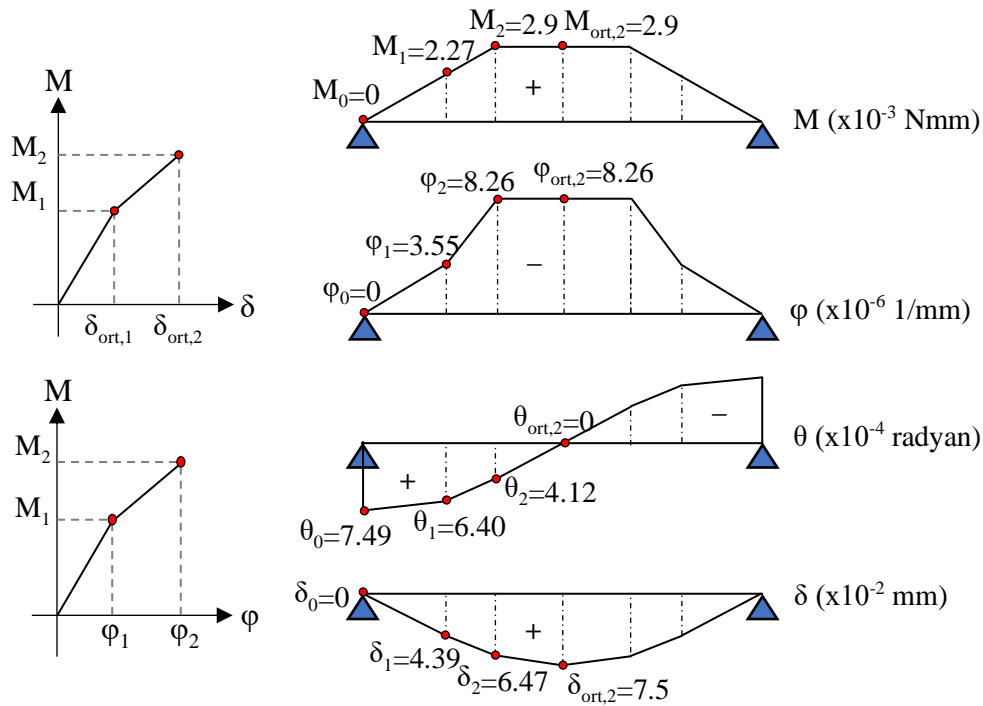
$$\begin{aligned}\delta_1 &= \delta_2 - \left( \frac{(\varphi_2 + 2\varphi_1)(x_2 - x_1)^2}{6} + \theta_1(x_2 - x_1) \right) \\ \delta_1 &= 0.0647 - \left( \frac{(-8.2568 \times 10^{-6} + 2 \times -3.5478 \times 10^{-6})(100 - 61.518)^2}{6} + 6.3985 \times 10^{-4} \times (100 - 61.518) \right) \\ \delta_1 &= 0.0439 \text{ mm}\end{aligned}$$

$$\theta_0 = \theta_1 - \left( \frac{(\varphi_1 + \varphi_0)(x_1 - x_0)}{2} \right) \theta_0 = 6.39852 \times 10^{-4} - \left( \frac{(-3.5478 \times 10^{-6} + 0)(100 - 0)}{2} \right) = 7.4902 \times 10^{-4} \text{ radyan}$$

$$\delta_0 = \delta_1 - \left( \frac{(\varphi_1 + 2\varphi_0)(x_1 - x_0)^2}{6} + \theta_0(x_1 - x_0) \right)$$

$$\delta_0 = 0.0439 - \left( \frac{(-3.5478 \times 10^{-6} + 2 \times 0)(61.518 - 0)^2}{6} + 7.4902 \times 10^{-4}(61.518 - 0) \right)$$

$\delta_0 = 4.7 \times 10^{-8} < 10^{-3}$  mm olduğundan mesnetteki deplasman sınır şartı sağlanmış böylece  $M-\varphi$  ilişkisinin 2.noktasına ait eğrilik belirlenmiştir (Şekil 3.20).



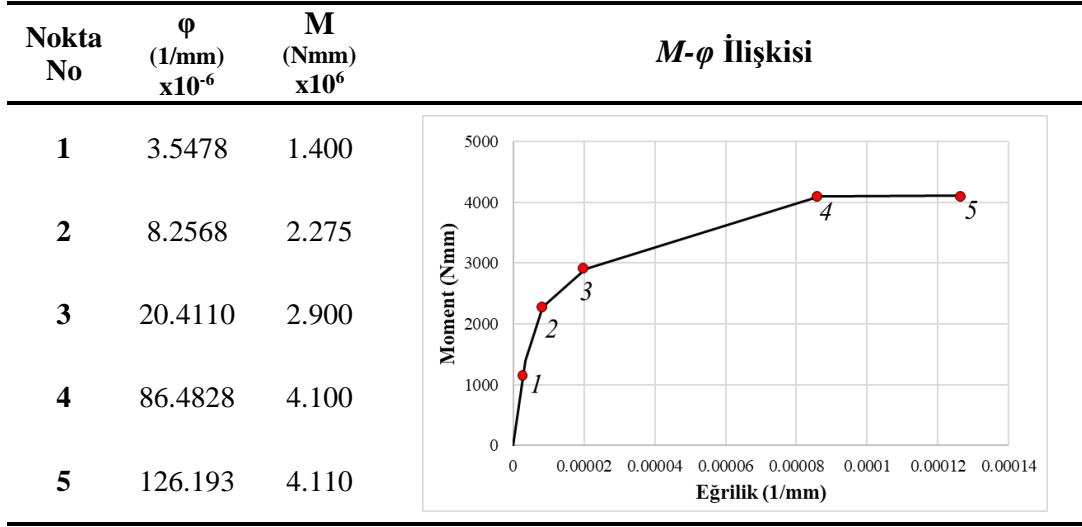
**Şekil 3.20:**  $M_2$  momentine ulaşan numunedeki moment, eğrilik, dönme ve deplasman dağılımları.

Diğer üç nokta için de benzer işlemler tekrarlanarak bu noktalara ait eğrilik, dönme ve deplasman değerleri belirlenmiş, eleman üzerindeki diğer karakteristiklerle beraber Tablo 3.5’de gösterilmiştir. Sonuç olarak geri analiz ile  $P-\delta$  ilişkisinden elde edilen  $M-\varphi$  ilişkisi ve ilgili koordinatlar Tablo 3.6’da gösterilmiştir.

**Tablo 3.5:**  $P$ - $\delta$  ilişkisinin 3. 4. ve 5. noktalarına karşılık gelen eğrilik, dönme ve deplasman dağılımları.

Nokta No	Kesit No	x (mm)	M (kNm)	$\varphi$ (1/mm) $\times 10^{-6}$	$\theta$ (rad) $\times 10^{-3}$	$\delta$ (mm)	Eğrilik, Dönme ve Deplasman Dağılımları
3	Kiriş Ortası	150	2900	-20.41	0	0.170	
	3	100	2900	-20.41	1.021	0.144	
	2	78.5	2275	-8.257	1.330	0.119	
	1	48.3	1400	-3.548	1.508	0.076	
	0	0	0	0	1.593	0.000	
4	Kiriş Ortası	150	4100	-86.43	0	0.700	
	4	100	4100	-86.48	4.324	0.592	
	3	70.73	2900	-20.41	5.888	0.438	
	2	55.49	2275	-8.257	6.107	0.346	
	1	34.15	1400	-3.548	6.233	0.214	
0	0	0	0	6.293	0.000		
5	Kiriş Ortası	150	4110	-126.2	0	0.950	
	5	100	4110	-126.2	6.311	0.792	
	4	99.57	4100	-86.48	6.336	0.791	
	3	70.56	2900	-20.41	7.901	0.578	
	2	55.35	2275	-8.257	8.1114	0.456	
1	34.06	1400	-3.548	8.241	0.282		
0	0	0	0	8.300	0.000		

**Tablo 3.6:** Geri analiz ile elde edilen  $M-\varphi$  ilişkisi ve ilgili koordinatlar.

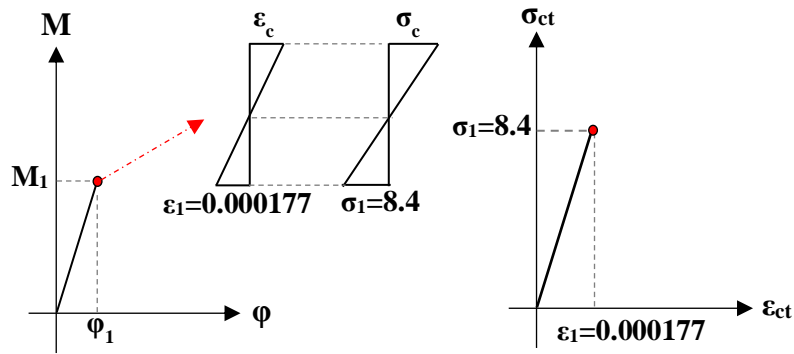


**$M-\varphi$  ilişkisinden geri analiz ile  $\sigma_{ct} - \varepsilon_{ct}$  ilişkisinin elde edilmesi :** İdealleştirilen yük-deplasman ilişkisinde her bir nokta için Bölüm 3.1.2.3’de açıklanan GAY2 uygulanarak eğrilik değerleri belirlenir.

**1. noktanın belirlenmesi :**  $M-\varphi$  ilişkisinin 1. noktası ilk çatlama noktasına karşılık geldiğinden Denklem 2.15, 2.16 ile homojen ve simetrik kesite ait  $\sigma_1$  ve  $\varepsilon_1$  belirlenmiştir. 1.adımda elde edilen gerilme ve birim uzama dağılımı Şekil 3.21’de gösterilmiştir.

$$\sigma_1 = 6M_1 / (a^3) = 6 \times 1400000 / (100^3) = 8.4 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma_1 \cdot \varphi_1 \cdot a^4}{6M_1} = \frac{8.4 \times 3.5478 \times 10^{-6} \times 100^4}{6 \times 1400000} = 0.00017739$$



**Şekil 3.21:**  $M-\varphi$  ilişkisinin 1. noktasındaki gerilme ve birim uzama durumu.

**2. noktanın belirlenmesi :** Bu aşamada çatlama kesitteki gerilme dağılımının belirlenmesi için tarafsız eksen oranı  $\beta_2 = 0.5656$  olarak tahmin edilmiştir. Buna göre  $\varepsilon_2$  ve basınç bölgesindeki toplam kuvvet  $N_c$  Denklem 3.17 ve Denklem 3.19 ile belirlenmiştir.

$$\varepsilon_2 = \varphi_2 \cdot \beta_2 \cdot a = 0.0000082568 \times 0.5656 \times 100 = 0.000467$$

$$N_c = -\frac{1}{2}(1 - \beta_2)^2 \cdot a^3 \cdot \varphi_2 \cdot \sigma_1 / \varepsilon_1 = -\frac{1}{2}(1 - 0.5656)^2 \times 100^3 \times 8.2568 \times 10^{-6} \times 8.4 / 0.000177 = -36890 \text{ N}$$

Daha sonra ikinci adıma ait çekme bölgesindeki n. life kadar olan toplam kuvvet  $nt$  değeri Denklem 3.21 ve 3.24 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\text{topi}_1 = (\varepsilon_1 - \varepsilon_0) \left( \frac{\sigma_1 + \sigma_0}{2} \right) \cdot \frac{b}{\varphi_2} = (0.00017739 - 0) \left( \frac{8.4 + 0}{2} \right) \cdot \frac{100}{8.2568 \times 10^{-6}} = 9023 \text{ N}$$

$$nt = \sum_{r=1}^1 \text{topi}_r = \text{topi}_1 = 9023 \text{ N}$$

Bu değerler kullanılarak yatay kuvvet dengesini sağlayan gerilme değeri  $\sigma_{2,1}$  Denklem 3.23 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\sigma_{2,1} = \left( \frac{-\varphi_2(N_c + nt)}{(\varepsilon_2 - \varepsilon_1) \cdot a} \right) \cdot 2 - \sigma_1 = \left( \frac{-8.2568 \times 10^{-6}(-36890 + 9023)}{(0.000467 - 0.00017739) \cdot 100} \right) \cdot 2 - 8.4 = 7.489 \text{ MPa}$$

Basınç bölgesindeki bileşke kuvvetin oluşturduğu moment değeri  $M_c$  Denklem 3.26 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$M_c = \frac{a^4}{3}(1 - \beta_2)^3 \varphi_2 \cdot \sigma_1 / \varepsilon_1 = \frac{100^4}{3}(1 - 0.5656)^3 \times 8.2568 \times 10^{-6} \times 8.4 / 0.000177 = 1068341 \text{ Nmm}$$

Daha sonra çekme bölgesindeki kuvvetlerin n. life kadar olan toplam momenti  $mt$  değeri Denklem 3.28 ve 3.31 kullanılarak hesaplanmıştır.

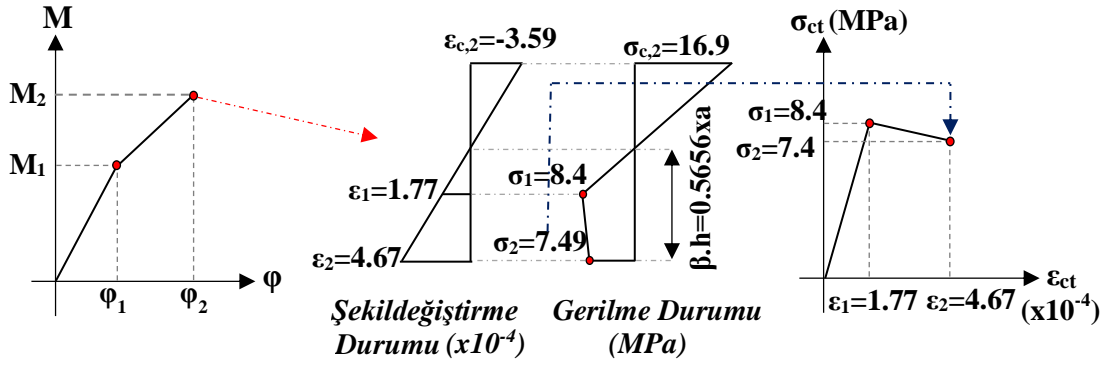
$$\text{topj}_1 = (\varepsilon_1 - \varepsilon_0) \left( \frac{(2\varepsilon_1 + \varepsilon_0)\sigma_1 + (2\varepsilon_0 + \varepsilon_1)\sigma_0}{6} \right) \cdot \frac{a}{(\varphi_2)^2} = 129238 \text{ Nmm}$$

$$mt = \sum_{r=1}^1 \text{topj}_r = \text{topj}_1 = 129238 \text{ Nmm}$$

Kesite ait moment dengesini sağlayan gerilme değeri  $\sigma_{2,2}$  değeri Denklem 3.30 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\sigma_{2,2} = \left( \frac{\left( (\varphi_2)^2 (M_2 - M_c - mt) \frac{6}{a(\varepsilon_2 - \varepsilon_1)} \right) - (2\varepsilon_1 + \varepsilon_2)\sigma_1}{(2\varepsilon_2 + \varepsilon_1)} \right) = 7.490 \text{ MPa}$$

Elde edilen  $\sigma_{2,1} = 7.489 \text{ MPa}$  ve  $\sigma_{2,2} = 7.490 \text{ MPa}$  değerleri birbirine yeteri kadar yakın olduğundan bu değer 2.noktaya ait gerilme değeri olarak alınmış ve bir sonraki adıma geçilmiştir. Değerlerin birbirlerine yeteri kadar yakın olmaması durumunda tarafsız eksen oranı değiştirilerek tüm işlemlerin tekrarlanması gerekmektedir. 2.nokta için elde edilen birim uzama ve gerilme dağılımları Şekil 3.22’de gösterilmiştir.



Şekil 3.22:  $M-\varphi$  ilişkisinin 2. noktasındaki gerilme ve birim uzama durumu.

**3. noktanın belirlenmesi:** Kesitteki gerilme dağılımının belirlenmesi için tarafsız eksen oranı  $\beta_3 = 0.6772$  olarak tahmin edilmiştir. Buna göre  $\varepsilon_3$  ve basınç bölgesindeki toplam kuvvet  $N_c$  Denklem 3.17 ve Denklem 3.19 ile belirlenmiştir.

$$\varepsilon_3 = \varphi_3 \cdot \beta_3 \cdot a = 0.000020411 \times 0.6772 \times 100 = 0.00138$$

$$N_c = -\frac{1}{2} (1 - \beta_3)^2 \cdot a^3 \cdot \varphi_3 \cdot \sigma_1 / \varepsilon_1 = -\frac{1}{2} (1 - 0.6772)^2 \times 100^3 \times 20.411 \times 10^{-6} \times 8.4 / 0.000177 = -50356 \text{ N}$$

Daha sonra ikinci adıma ait çekme bölgesindeki n. life kadar olan toplam kuvvet  $nt$  değeri Denklem 3.21 ve 3.24 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\text{topi}_1 = (\varepsilon_1 - \varepsilon_0) \left( \frac{\sigma_1 + \sigma_0}{2} \right) \cdot \frac{a}{\varphi_3} = (0.00017739 - 0) \left( \frac{8.4 + 0}{2} \right) \cdot \frac{100}{20.411 \times 10^{-6}} = 3650 \text{ N}$$

$$topi_2 = (\varepsilon_2 - \varepsilon_1) \left( \frac{\sigma_2 + \sigma_1}{2} \right) \cdot \frac{a}{\varphi_3} = ((4.67 - 1.77)10^{-4}) \left( \frac{7.49 + 8.4}{2} \right) \cdot \frac{100}{20.411 \times 10^{-6}} = 11288 \text{ N}$$

$$nt = \sum_{r=1}^2 topi_r = topi_1 + topi_2 = 3650 + 11288 = 14938 \text{ N}$$

Bu değerler kullanılarak yatay kuvvet dengesini sağlayan gerilme değeri  $\sigma_{2,1}$  Denklem 3.23 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\sigma_{3,1} = \left( \frac{-\varphi_3(N_c + nt)}{(\varepsilon_3 - \varepsilon_2) \cdot a} \right) \cdot 2 - \sigma_2 = \left( \frac{-20.411 \times 10^{-6}(-50356 + 14938)}{(0.00138 - 0.000467) \cdot 100} \right) \cdot 2 - 7.49 = 8.329 \text{ MPa}$$

Basınç bölgesindeki bileşke kuvvetin oluşturduğu moment değeri  $M_c$  Denklem 3.26 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$M_c = \frac{a^4}{3} (1 - \beta_3)^3 \varphi_3 \cdot \sigma_1 / \varepsilon_1 = \frac{100^4}{3} (1 - 0.6772)^3 \times 20.411 \times 10^{-6} \times 8.4 / 0.000177 = 1083655 \text{ Nmm}$$

Daha sonra çekme bölgesindeki kuvvetlerin n. life kadar olan toplam momenti  $mt$  değeri Denklem 3.28 ve 3.31 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$topj_1 = (\varepsilon_1 - \varepsilon_0) \left( \frac{(2\varepsilon_1 + \varepsilon_0)\sigma_1 + (2\varepsilon_0 + \varepsilon_1)\sigma_0}{6} \right) \cdot \frac{a}{(\varphi_3)^2} = 21149 \text{ Nmm}$$

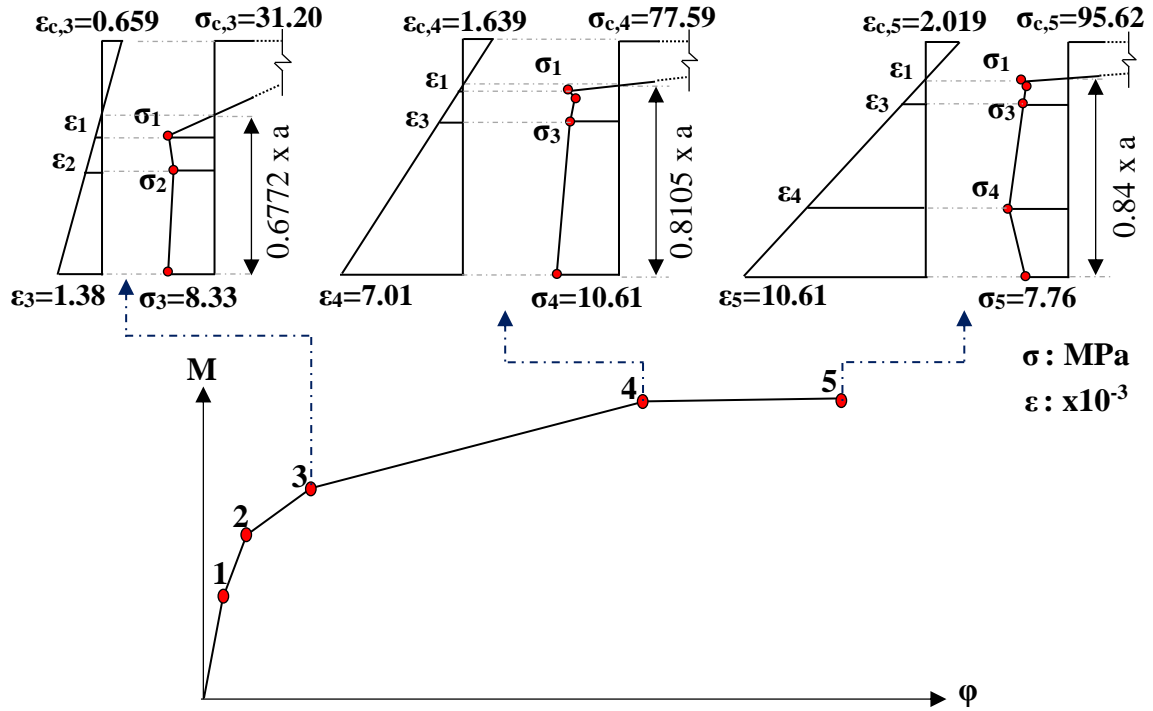
$$topj_2 = (\varepsilon_2 - \varepsilon_1) \left( \frac{(2\varepsilon_2 + \varepsilon_1)\sigma_2 + (2\varepsilon_1 + \varepsilon_2)\sigma_1}{6} \right) \cdot \frac{a}{(\varphi_3)^2} = 145790 \text{ Nmm}$$

$$mt = \sum_{r=1}^2 topj_r = topj_1 + topj_2 = 21149 + 145790 = 166939 \text{ Nmm}$$

Kesite ait moment dengesini sağlayan gerilme değeri  $\sigma_{2,2}$  değeri Denklem 3.30 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\sigma_{3,2} = \left( \frac{\left( (\varphi_3)^2 (M_3 - M_c - mt) \frac{6}{a(\varepsilon_3 - \varepsilon_2)} \right) - (2\varepsilon_2 + \varepsilon_3)\sigma_2}{(2\varepsilon_3 + \varepsilon_2)} \right) = 8.334 \text{ MPa}$$

Elde edilen  $\sigma_{3,1} = 8.329$  MPa ve  $\sigma_{3,2} = 8.334$  MPa değerleri birbirine yeteri kadar yakın olduğundan bu değer 3.noktaya ait gerilme değeri olarak alınır.  $M-\phi$  ilişkisinin diğer noktaları (4,5) için aynı işlemler uygulanarak bu noktalara ait birim uzama ve gerilme dağılımları elde edilmiş ve her bir noktadaki en alt beton lifine ait  $\sigma_{ct} - \varepsilon_{ct}$  ilişkisi elde edilmiştir (Şekil 3.23). Sonuç olarak seçilen prizma numunesinden geri analizler ile elde edilen beton çekme davranışı ( $\sigma_{ct} - \varepsilon_{ct}$ ) ve ilgili koordinatlar Tablo 3.7’de sunulmuştur.



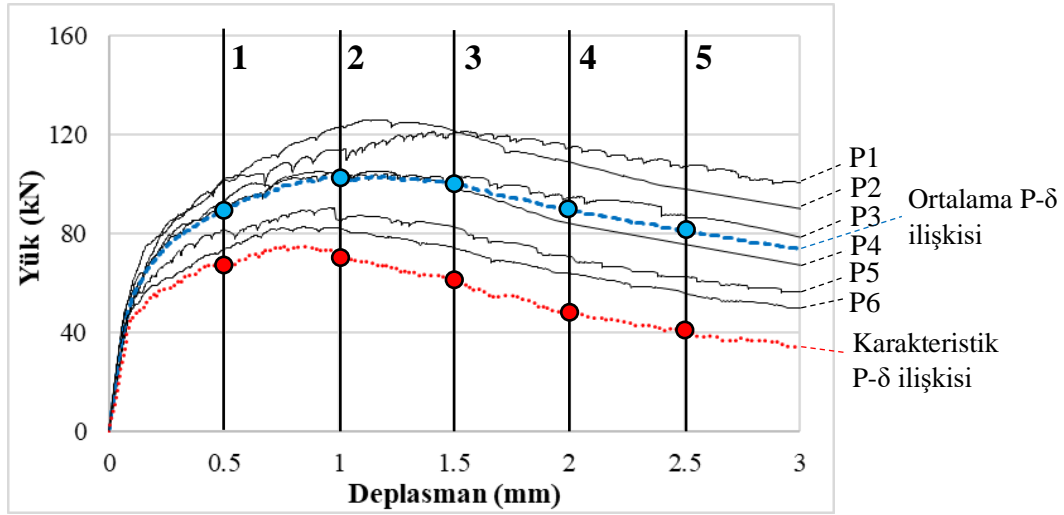
Şekil 3.23:  $M-\phi$  ilişkisinin 3,4 ve 5. noktalarındaki gerilme ve birim uzama durumu.

Tablo 3.7: Prizma numunesinden geri analizler sonucunda elde edilen  $\sigma_{ct} - \varepsilon_{ct}$  ve ilgili koordinatlar.

Nokta No (n)	$\varepsilon_n$ (mm/mm) $\times 10^{-3}$	$\sigma_n$ (MPa)	$\sigma_{ct} - \varepsilon_{ct}$ İlişkisi
1	0.1774	8.4	
2	0.4670	7.49	
3	1.3822	8.33	
4	7.0098	10.61	
5	10.613	7.76	



**Karakteristik ve ortalama dayanımlar için  $\sigma_{ct}$  -  $\varepsilon_{ct}$  ilişkilerinin belirlenmesi :** Ortalama ve karakteristik  $P$ - $\delta$  ilişkilerinin belirlenmesi için 6  $P$ - $\delta$  ilişkisine Denklem 3.7 ve 3.8 uygulanmıştır. Örnek olarak beş nokta için yük değerlerinden ortalama ve karakteristik yüke geçiş gösterilmiştir (Şekil 3.24, Tablo 3.8). Yeteri kadar nokta için aynı işlemler uygulanarak ortalama ve karakteristik  $P$ - $\delta$  ilişkileri elde edilmiştir (Şekil 3.24).



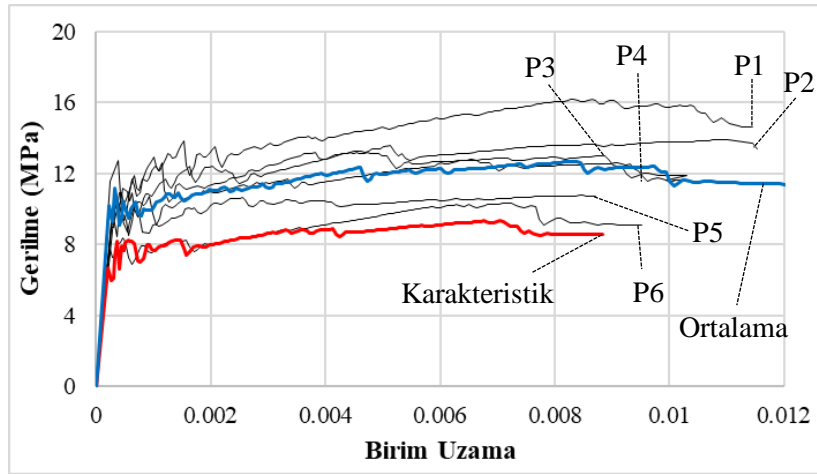
**Şekil 3.24:** Ortalama ve karakteristik  $P$ - $\delta$  ilişkilerinin elde edilmesi.

**Tablo 3.8:** Ortalama ve karakteristik  $P$ - $\delta$  ilişkilerinin elde edilmesi.

Dep. (mm)	Her Bir Numune İçin Yük Değerleri (kN)						Ortalama Değerler ( $p_m$ )	Standart Sapma (ss)	Karakteristik değerler ( $p_k = p_m - ak.ss$ )
	P1	P2	P3	P4	P5	P6			
0.5	101	102	93	89	82	73	<b>89</b>	11	<b>67</b>
1	114	123	101	104	85	82	<b>101</b>	16	<b>70</b>
1.5	121	121	102	97	83	74	<b>100</b>	19	<b>61</b>
2.0	115	109	95	84	71	64	<b>89</b>	20	<b>48</b>
2.5	107	98	87	75	62	56	<b>81</b>	20	<b>41</b>

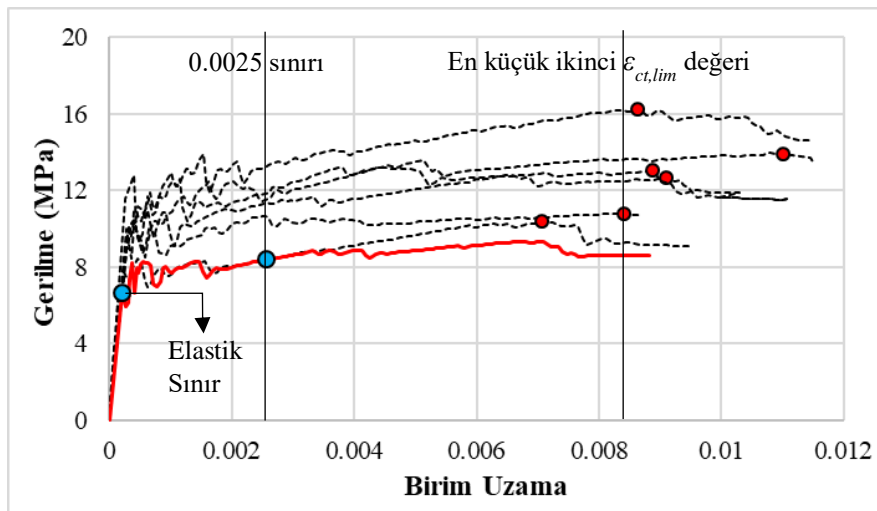
Öncelikle  $P$ - $\delta$  ilişkilerindeki deneysel hatalar ve lif sıyrılmalarından kaynaklanan ani yük azalması ve yük artımlarının geri analizlerde oluşturacağı stabilite problemlerini yok etmek için genel karakteristiği bozmadan tüm eğrilere düzeltme (filtreleme) işlemi uygulanmış ve koordinat sayısı azaltılarak idealleştirilmiştir. Bu filtreleme işlemi hazırlanan bir yazılım ile yapılmıştır (Ek B, Şekil B.3). Daha sonra  $P$ - $\delta$  ilişkilerine Bölüm 3.1.2.2 ve 3.1.2.3'de

açıklanan geri analizler (GAY1 ve GAY2) uygulanmış ve  $\sigma_{ct} - \varepsilon_{ct}$  ilişkileri elde edilmiştir (Şekil 3.25).



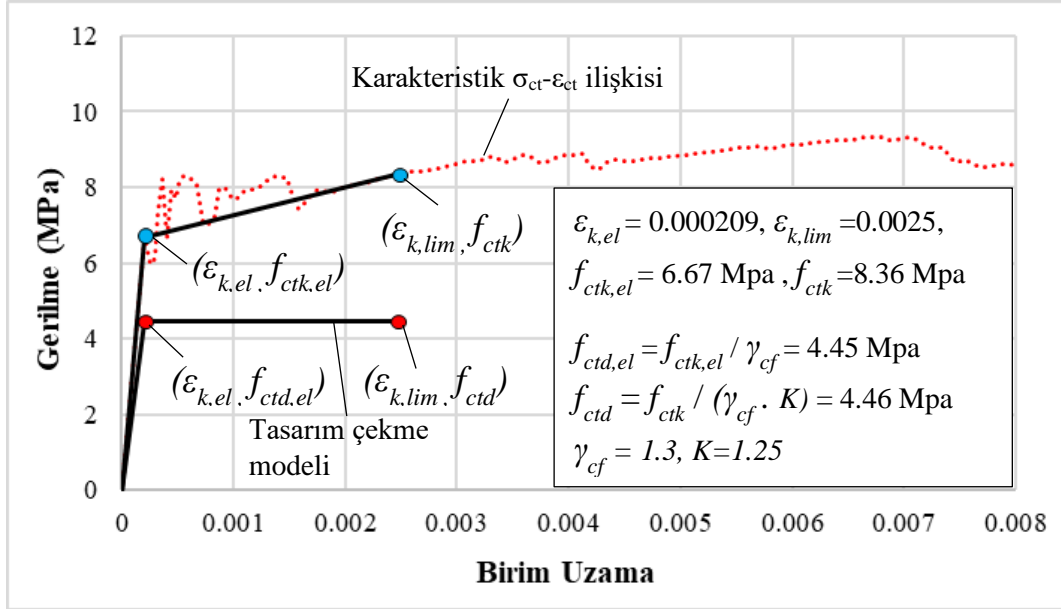
Şekil 3.25: %2 lifli UYPLB için geri analizlerden elde edilen  $\sigma_{ct} - \varepsilon_{ct}$  ilişkileri.

Tasarım çekme modelinin belirlenmesi için elastik sınırı belli olan karakteristik  $\sigma_{ct} - \varepsilon_{ct}$  ilişkisinin limit noktası belirlenmiştir. Bunun için, 6 adet numuden elde edilen limit noktalarının en küçük ikinci birim uzama değerine karşılık gelen nokta belirlenmiştir (Şekil3.26). AFGC'ye göre maksimum 0.0025'den büyük olmasına izin verilmediği için bu değer 0.0025 ile karşılaştırılarak uzama limit noktası elde edilmiştir (Şekil 3.26).



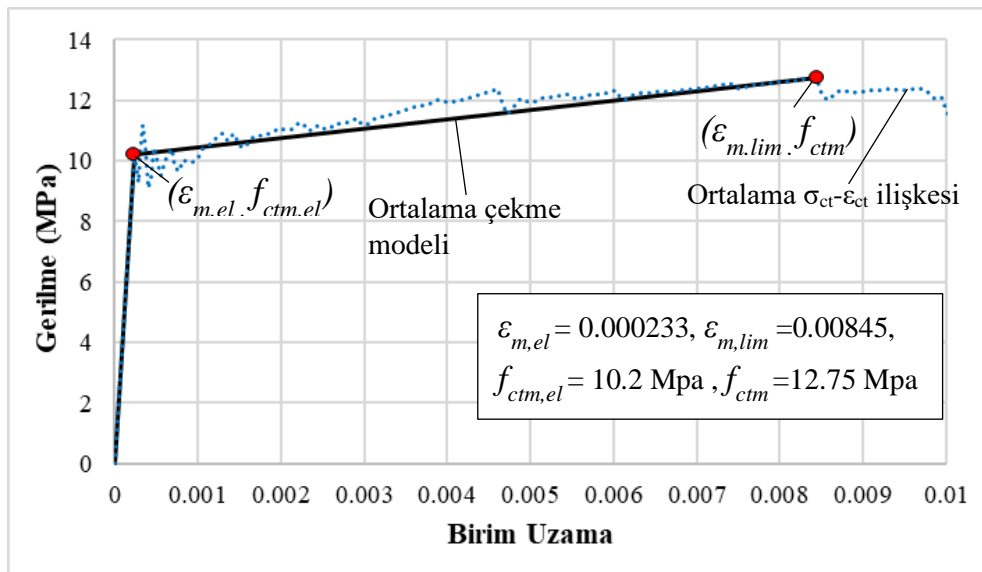
Şekil 3.26: Karakteristik çekme modelinde elastik ve limit çekme dayanımlarının belirlenmesi.

Karakteristik  $\sigma_{ct} - \varepsilon_{ct}$  ilişkisi üzerinde elde edilen elastik ve limit noktalarına AFGC'de öngörülen güvenlik katsayıları uygulanarak tasarım çekme modeli elde edilmiştir (Şekil 3.27).



Şekil 3.27: %2.0 lifli UYPLB için karakteristik ve tasarım çekme modeli.

Deneysel sonuçları karşılaştırmak amacıyla kullanılacak olan ortalama  $\sigma_{ct} - \varepsilon_{ct}$  ilişkisinde elastik ve limit çekme dayanımları ortalama eğri üzerinden belirlenerek idealleştirilmiştir (Şekil 3.28).



Şekil 3.28: %2.0 lifli UYPLB'de ortalama dayanım için çekme hesap modeli.

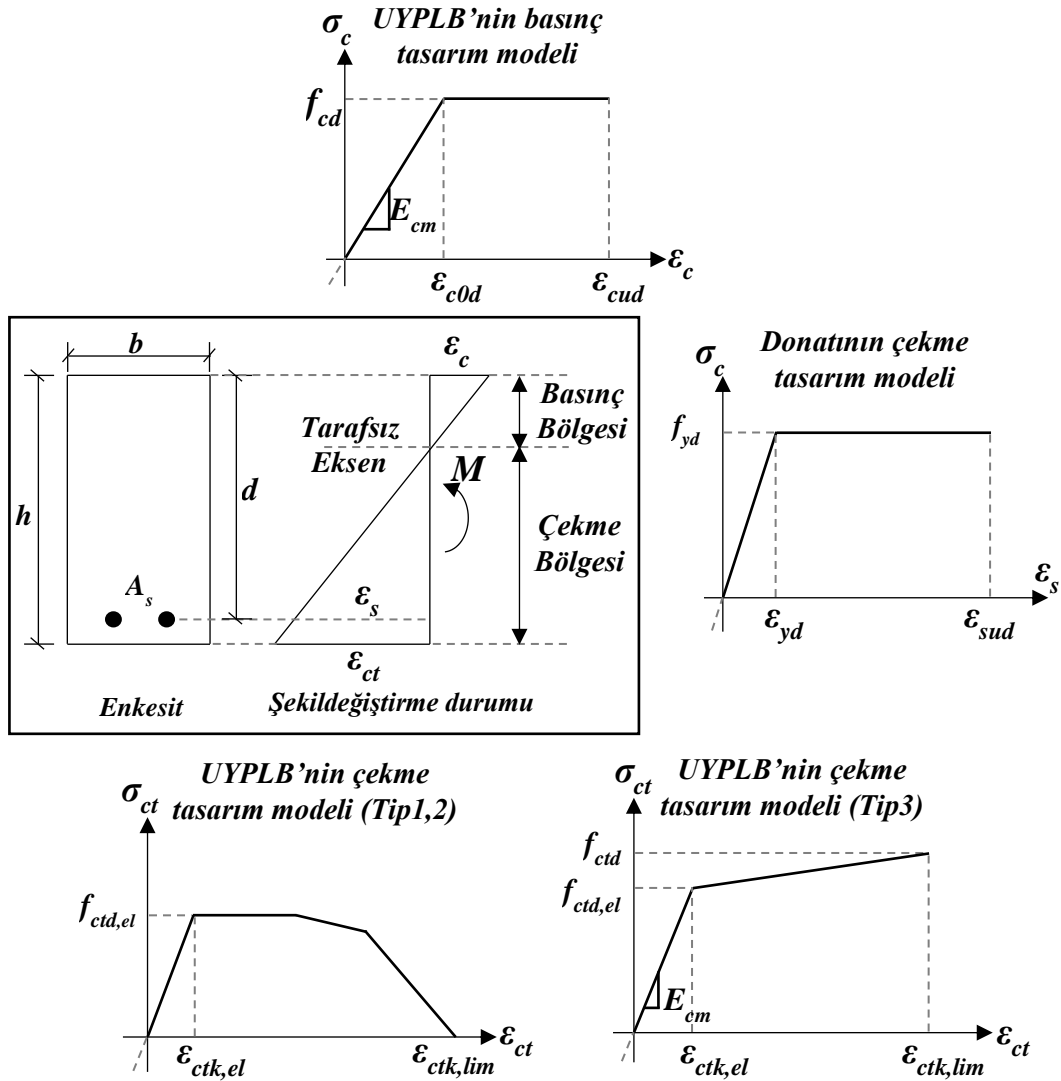
### 3.1.3 Eğilme Kapasitesi İçin Limit Durumlar ve Kapasite Hesabı İçin Açıklamalı

#### Nümerik Örnek

AFGC (2013)'de eğilme kapasitelerinin (dayanımlarının) hesabı için verilen esaslar, donatılı (normal veya öngermeli) veya donatısız UYPLB elemanların bileşik eğilme durumlarını içermektedir. Ancak, bu çalışmada normal donatılı kiriş elemanları incelendiği için AFGC'deki esaslar basit eğilme durumuna indirgenerek açıklanmıştır. Eğilme etkisindeki elemanlarda şekildeğiştirme durumları için geleneksel betonarme elemanlarda olduğu gibi;

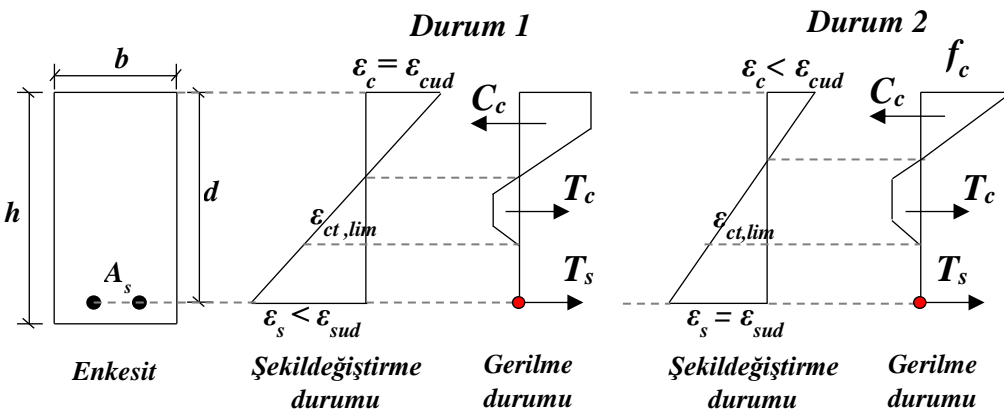
- Düzlem kesitler eğilmeden sonra düzlem kalır,
- Donatılar ile onu çevreleyen beton arasında tam aderans vardır.

kabulleri yapılmaktadır. Taşıma gücü limit durumunda basınç bölgesindeki beton için Bölüm 3.1.1'de açıklanan basınç tasarım modeli, çekme bölgesindeki beton tipine (*Tip1*, *Tip2*, *Tip3*) bağlı olarak çekme tasarım modeli ve EN 1992-1.1 (2005)'de verilen donatı tasarım modeli esas alınmaktadır (Şekil 3.29).



Şekil 3.29: Taşıma gücü limit durumu için kullanılan gerilme-şekildeştirme modelleri.

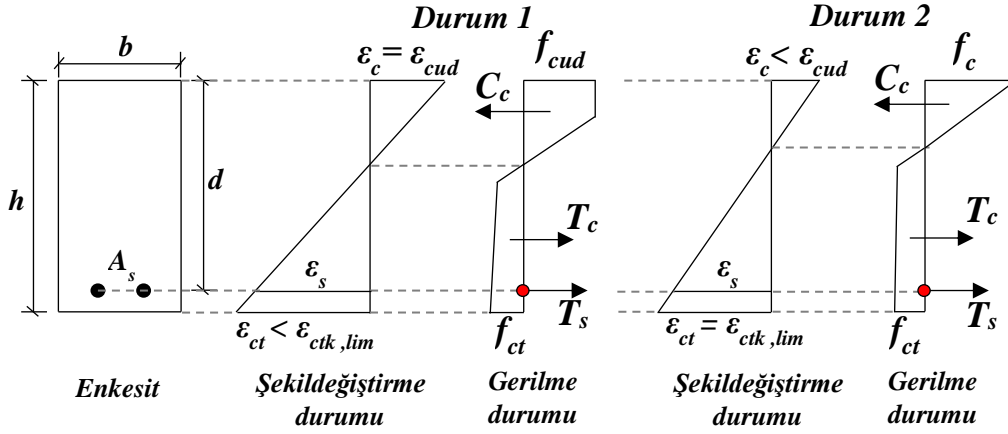
UYPLB sınıfının Tip1 ve Tip2 olması durumunda, çekme bölgesinde betonun sadece çekme dayanımına olan katkısı gözönüne alınmakta, şekildeğiştirme kapasitesi ( $\epsilon_{ct,lim}$ ) sınır durum olarak kullanılmamaktadır. Bu durumda taşıma gücü limit durumu için geleneksel betonarmede olduğu gibi basınç betonu ve çekme donatısı şekildeğiştirme limitleri esas alınmaktadır. Buna göre basınç bölgesindeki betonun sınır birim kısalmasına ulaşması ( $\epsilon_c = \epsilon_{cud}$ ) ve donatının sınır şekildeğiştirmesine ulaşması ( $\epsilon_s = \epsilon_{sud}$ ) durumlarından hangisi önce gerçekleşirse taşıma gücünü belirlemektedir. Her bir durumda taşıma gücüne karşılık gelen eğilme momenti, geleneksel betonarmede olduğu gibi yatay denge denklemini ve moment denge denklemini kullanarak elde edilebilmektedir (Şekil 3.30).



**Şekil 3.30:** Tip1 ve Tip2 betonlu elemanlarda taşıma gücü limit durumları.

Şekil 3.30'da  $C_c$  basınç bölgesindeki beton bileşke kuvvetini,  $T_c$  çekme bölgesindeki beton bileşke kuvvetini,  $T_s$  donatıdaki bileşke çekme kuvvetini göstermektedir.

UYPLB sınıfının Tip3 olması durumunda, geleneksel betonarmeden çok farklı olarak, çekme bölgesindeki donatı yerine en alt çekme lifindeki beton birim uzaması kesit taşıma kapasitesinde belirleyici olmaktadır. Betonun çekme şekildeğiştirme kapasiteleri donatınınkinden çok düşük olduğundan öncelikle beton sınıra ulaşmakta ve Tip3 betonunda pekleşme ile sağlanan büyük kapasite artışı donatı sınıra ulaşmadan önce kaybedilmektedir. Bu nedenle taşıma gücü limit durumu olarak, basınç bölgesindeki betonun sınır birim kısalmasına ulaşması ( $\epsilon_c = \epsilon_{cud}$ ) ve çekme bölgesindeki betonun sınır birim uzamasına ulaşması ( $\epsilon_{ct} = \epsilon_{ct,lim}$ ) durumlarından önce gerçekleşen durum esas alınmaktadır (Şekil 3.31).



Şekil 3.31: Tip3 betonlu elemanlarda taşıma gücü limit durumları.

Taşıma gücü limit durumlarından herhangi biri için 3.32 denklemi ile ifade edilen yatay denge denkleminde tarafsız eksen ve bilinmeyen birim uzama değerleri elde edilir.

$$C_c = T_c + T_s \quad (3.32)$$

Kabul edilen birim uzama durumu sağlanıyorsa bileşke kuvvetlerin momentleri hesaplanarak kesit eğilme taşıma kapasitesi belirlenir. Eğer birim uzama durumu sağlanmıyorsa diğer limit durumun gerçekleştiği kabul edilerek, bileşke kuvvetler ve taşıma kapasitesi hesaplanır.

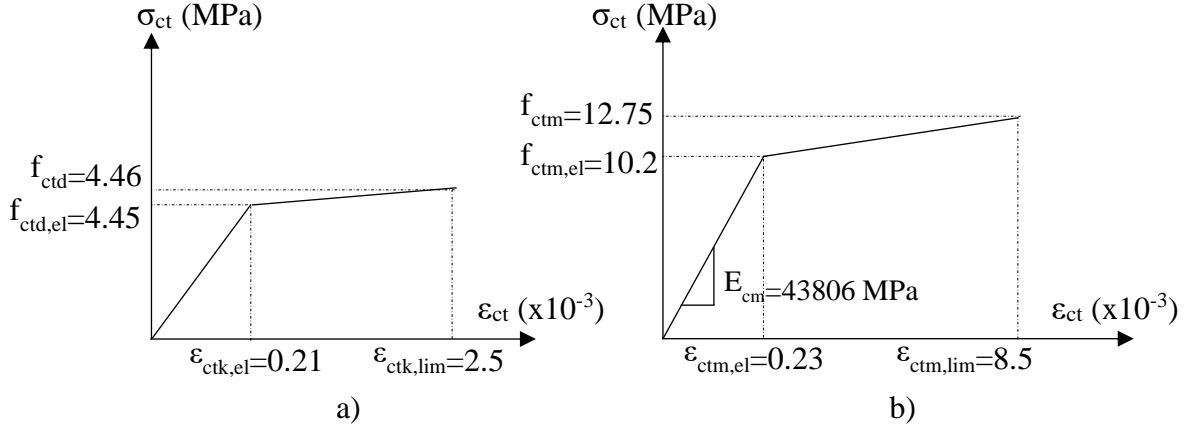
**Açıklamalı Örnek:** UYPLB içeren betonarme kirişte eğilme kapasitesinin hesabı nümerik bir örnek üzerinde detaylı olarak açıklanmıştır. Örnek olarak deneysel çalışma bölümünde eğilme davranışı incelenen B10-2.0 kodlu kiriş seçilmiştir. Kirişe ait özellikler ve elde edilen deneysel sonuçlar Tablo 3.9’da özetlenmiştir.

Tablo 3.9: Eğilme kapasitesi belirlenen B10-2.0 kirişine ait özellikler.

Kesit Özellikleri	Malzeme Özellikleri	Deneysel $M-\phi$ İlişkisi
<p><b>B10-2.0</b></p>	$f_{cm} = 167.7 \text{ MPa}$ $\gamma_c = 1.5$ $\alpha_{cu} = 1.3$ $ss^* = 3.8$ $ak^* = 2.015$ $f_{ym} = 470.1 \text{ Mpa}$ $E_s = 200 \text{ Gpa}$ $ss^{**} = 1.13$ $ak^{**} = 1.895$	

\* : Beton basınç numunelerine ait değerler, \*\* : Donatı numunelerine ait değerler.

Kiriş kapasitesi tasarım dayanımları ve ortalama dayanımlar içi ayrı ayrı hesaplanmıştır. Kirişte kullanılan beton %2 lif oranı sahip olduğu için Bölüm 3.1.2.4’de ayrıntılı olarak açıklanan  $\sigma_{ct} - \epsilon_{ct}$  ilişkileri kullanılmıştır (Şekil 3.32).



**Şekil 3.32:** %2 lif oranına sahip UYPLB için çekme hesap modelleri a) Tasarım dayanımı için, b) Ortalama dayanım için.

Betona ait basınç modellerine ait parametreler Bölüm 3.1.2.1’de verilen denklemler kullanılarak aşağıda gösterildiği gibi hesaplanmış ve Şekil 3.33a’daki gibi elde edilmiştir. Deneysel sonuçları karşılaştırmada kullanmak üzere hazırlanan basınç modeli çekme modelinde olduğu gibi gerilme ve birim şekildeğiştirmelerin ortalama değerleri kullanılarak elde edilmiştir (Şekil 3.33b). Ancak, maksimum beton birim kısılma değerinin ( $\epsilon_{cum}$ ) maksimum gerilmeyle uyumlu olması için bu değer tasarıma ait maksimum birim kısılma değerine ( $\epsilon_{cud}$ ) eşit alınmıştır.

$$f_{ck} = f_{cm} - ak.ss = 167.7 - 1.796 \times 3.8 = 160.9 \text{ MPa}$$

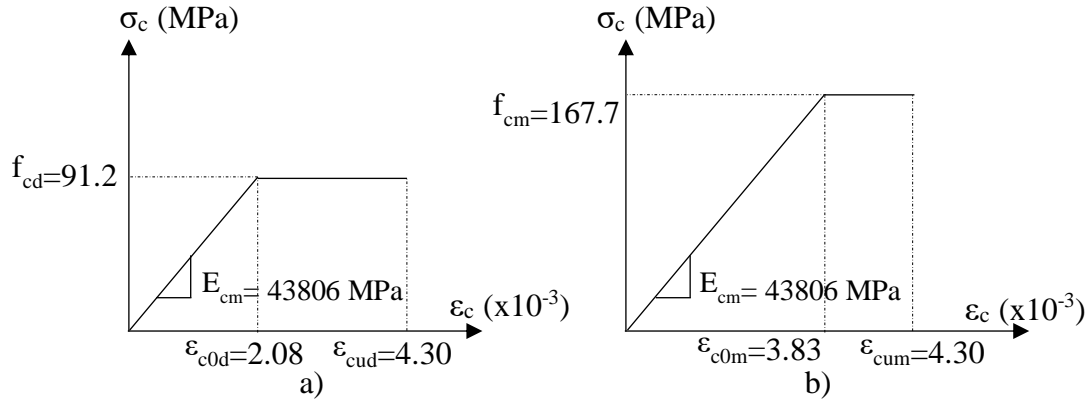
$$f_{cd} = \frac{\alpha_{cc} f_{ck}}{\gamma_c} = \frac{0.85 \times 160.9}{1.5} = 91.2 \text{ MPa}$$

$$\epsilon_{c0d} = \frac{f_{cd}}{E_{cm}} = \frac{91.2}{43806} = 0.002081$$

$$\epsilon_{cud} = \left[ 1 + 14 \left( \frac{f_{ctm}}{f_{cm}} \right) \right] \epsilon_{c0d} = \left[ 1 + 14 \left( \frac{12.75}{167.7} \right) \right] 0.002081 = 0.004296$$

$$\epsilon_{c0m} = \frac{f_{cm}}{E_{cm}} = \frac{167.7}{43806} = 0.003829$$

$$\epsilon_{cum} = \epsilon_{cud} = 0.004296$$



**Şekil 3.33:** %2 lif oranı sahip UYPLB için basınç hesap modelleri a) Tasarım dayanımı için, b) Ortalama dayanım için.

Donatı çeliği içinde betona benzer şekilde her bir kiriş donatısı için elde edilen karakteristik ve ortalama sonuçlar kullanılarak tasarım ve ortalama dayanım için hesap modelleri belirlenmiştir. Donatı maksimum birim uzama değeri AFGC'ye göre 0.01 alınmıştır (Şekil 3.34).

$$f_{yk} = f_{ym} - ak.ss = 470.1 - 1.895 \times 1.13 = 468 \text{ MPa}$$

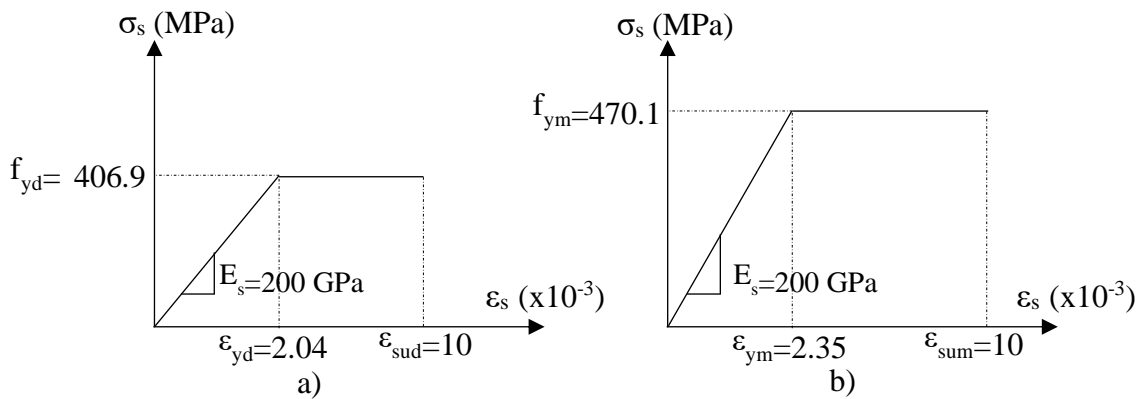
$$f_{yd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_s} = \frac{468}{1.15} = 406.9 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon_{yd} = \frac{f_{yd}}{E_s} = \frac{406.9}{200000} = 0.002035$$

$$\varepsilon_{sud} = 0.01$$

$$\varepsilon_{ym} = \frac{f_{ym}}{E_s} = \frac{470.1}{200000} = 0.002351$$

$$\varepsilon_{sum} = 0.01$$



**Şekil 3.34:** B10-2.0 kirişinin donatısına ait çekme hesap modelleri a) Tasarım dayanımı için, b) Ortalama dayanım için.



Bölüm 3.1.3’de belirtildiği gibi taşıma gücü limit durumları tahmin edilerek denge denklemleri ile ilgili birim şekildeğiştirmeler, gerilmeler ve eğilme kapasiteleri tasarım ve ortalama dayanımlar için hesaplanmıştır (Tablo 3.10 ve 3.11).

**Tablo 3.10:** B10-2.0 kirişinde AFGC’ye göre taşıma gücü limit durumu özellikleri (Tasarım dayanımı için).

Malzeme Özellikleri	Gerilme ve şekildeğiştirme dağılımları	Parametreler
$f_{cd} = 91.2 \text{ MPa}$ $f_{ctd} = 4.49 \text{ MPa}$ $f_{yd} = 406.9 \text{ MPa}$		$C_c = 126 \text{ kN}$ $T_c = 64 \text{ kN}$ $T_s = 64 \text{ kN}$ $c_n = 55 \text{ mm}$ $M = 23.6 \text{ kNm}$

**Tablo 3.11:** B10-2.0 kirişinde AFGC’ye göre taşıma gücü limit durumu özellikleri (Ortalama dayanımı için).

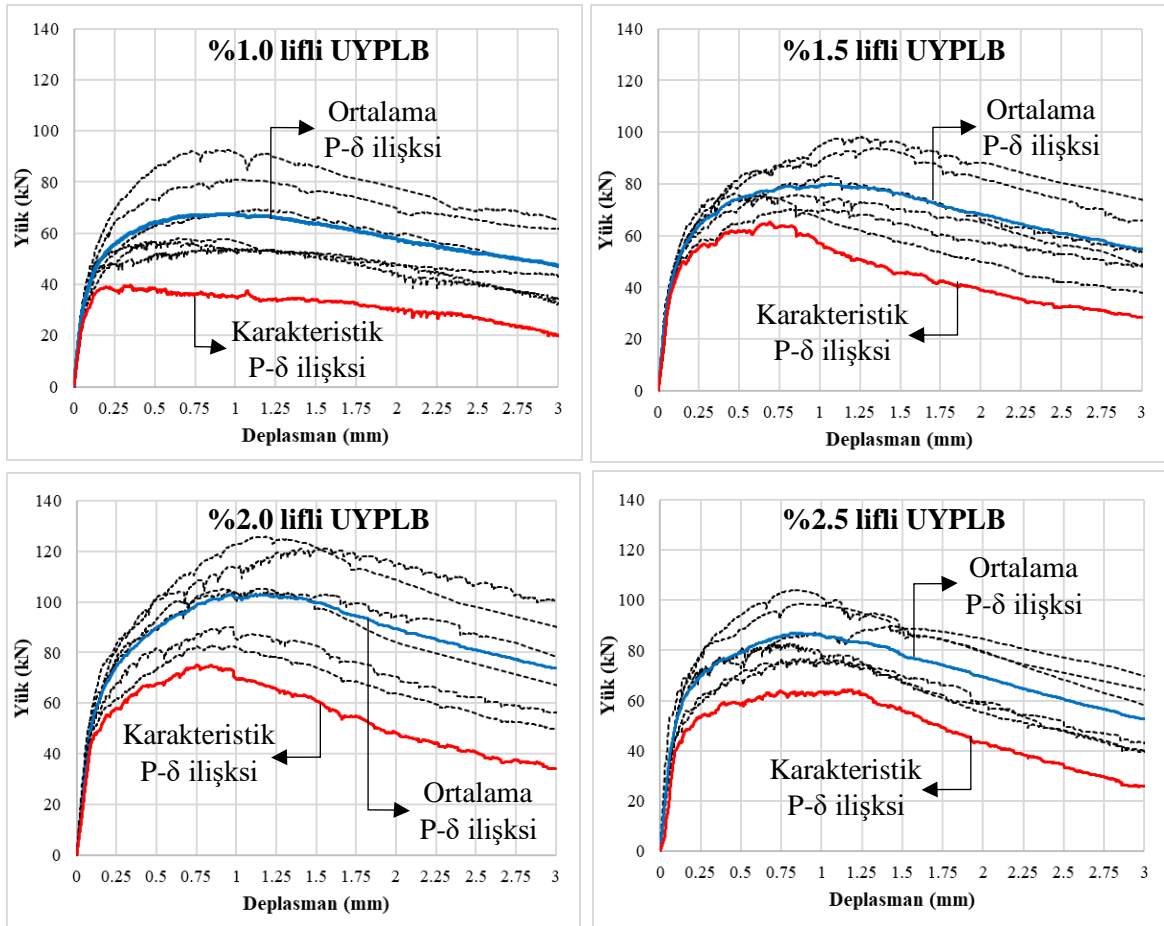
Malzeme Özellikleri	Gerilme ve şekildeğiştirme dağılımları	Parametreler
$f_{cm} = 167.7 \text{ MPa}$ $f_{ctm} = 12.75 \text{ MPa}$ $f_{ym} = 470.1 \text{ MPa}$		$C_c = 256 \text{ kN}$ $T_c = 184 \text{ kN}$ $T_s = 74 \text{ kN}$ $c_n = 43.8 \text{ mm}$ $M = 44.9 \text{ kNm}$

AFGC’ye göre taşıma gücü limit durumunda beklendiği gibi beton birim uzaması etkili olmaktadır. Beton birim kısalması sınırın çok altında kalırken, donatı akma uzamasını aşmıştır.

### 3.2 Test Kirişlerinin AFGC'ye Göre Eğilme Kapasitelerinin Belirlenmesi

Bölüm 2'de deneysel olarak incelenen tüm test kirişlerinde AFGC prosedürü uygulanarak eğilme kapasiteleri belirlenmiştir. AFGC prosedürü, açıklamalı nümerik örnekte olduğu gibi betonun tasarım ve ortalama dayanımları için ayrı ayrı uygulanmıştır. Böylece farklı donatı oranları içeren UYPLB kirişlerde tasarım sonuçlarından AFGC'de öngörülen güvenlik düzeyi ortaya konmuş ve ortalama dayanım sonuçlarından ise AFGC tasarım esaslarının doğrulaması yapılmıştır.

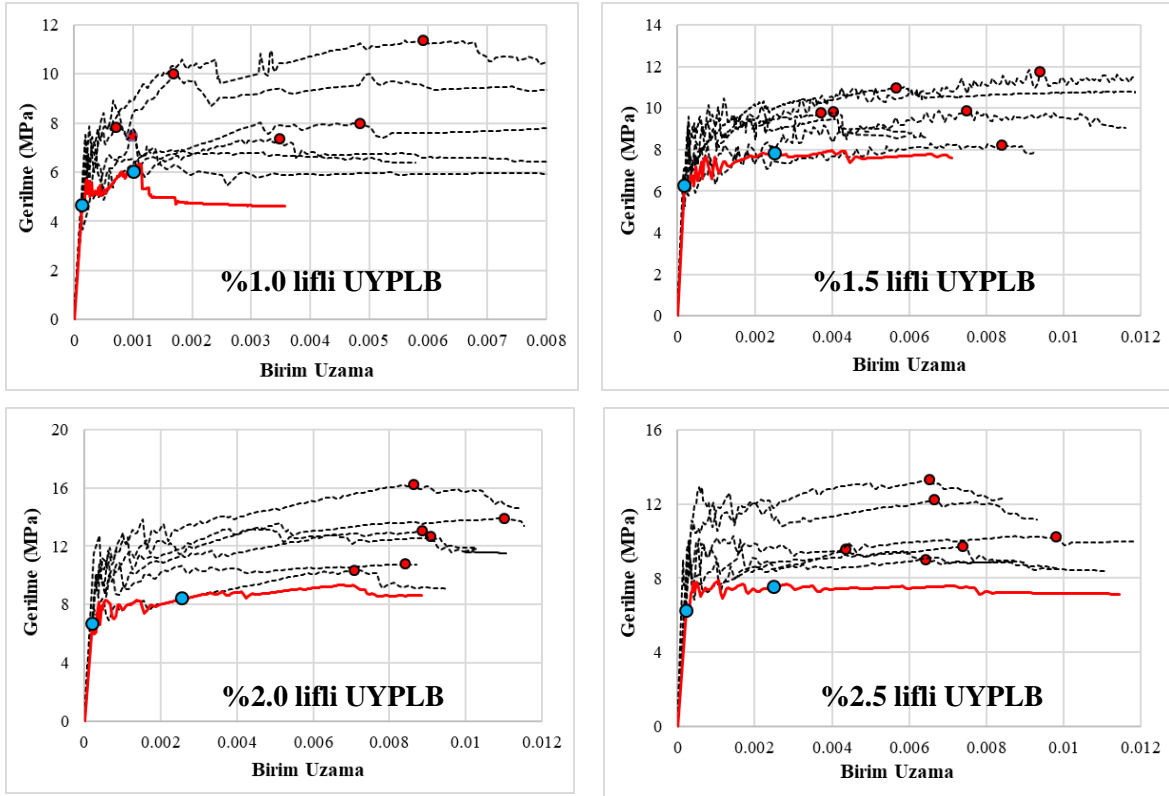
Bölüm 3.1.2'de açıklandığı gibi her bir lif oranı için eğilme testlerinden elde edilen  $P-\delta$  ilişkileri kullanılarak ortalama ve karakteristik  $P-\delta$  ilişkisi belirlenmiştir (Şekil 3.35).



Şekil 3.35: Dört farklı lif oranı için ortalama ve karakteristik  $P-\delta$  ilişkileri.

Tüm  $P-\delta$  ilişkilerine Bölüm 3.1.2.2 ve 3.1.2.3'de açıklanan geri analiz yöntemleri (GAY1 ve GAY2) uygulanarak  $\sigma_{ct} - \varepsilon_{ct}$  ilişkileri elde edilmiştir (Şekil 3.36). Grafiklerin üzerinde elastik sınırlar ve maksimum sınırlar işaretlenerek gösterilmiştir. Karakteristik  $P-\delta$  ilişkisinin belirlenmesinde, %1.0 lifli UYPLB için maksimum uzama limiti %1.0'in altına

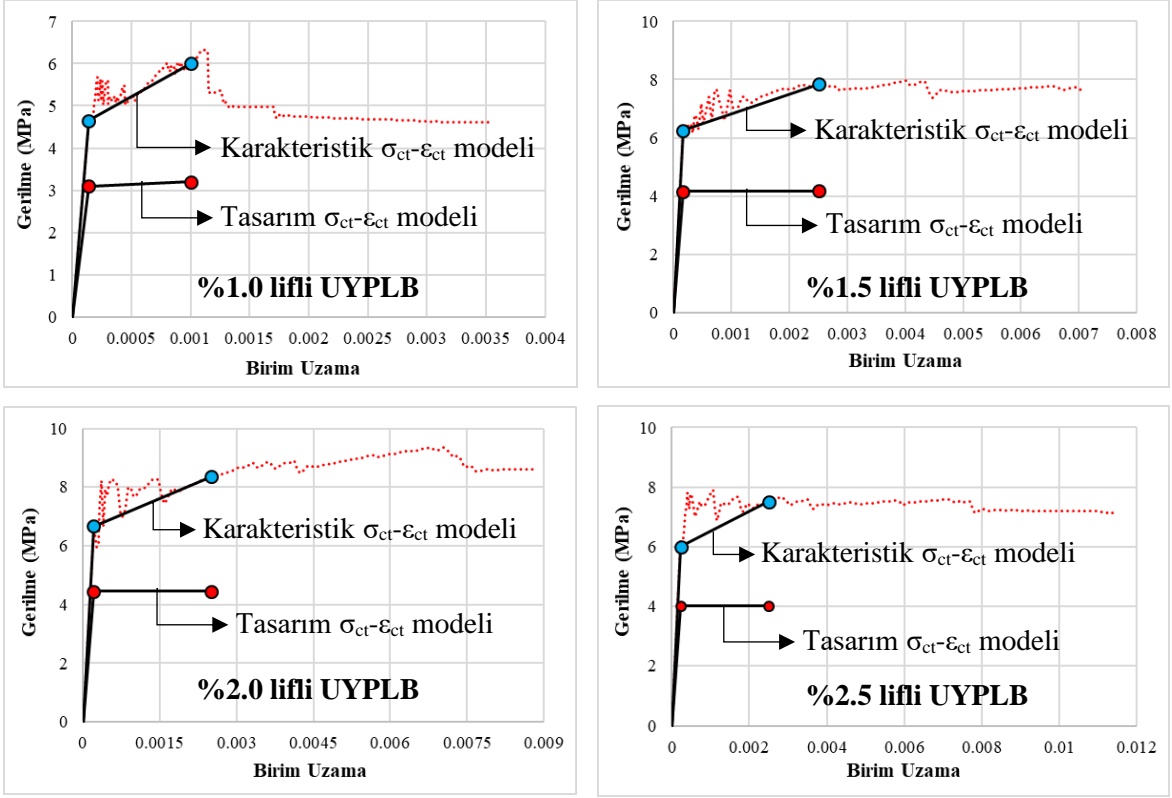
düşerken, diğer tüm lif oranlarında 0.0025 değeri aşılmış ve AFGC'ye göre sınırlama yapılmıştır.



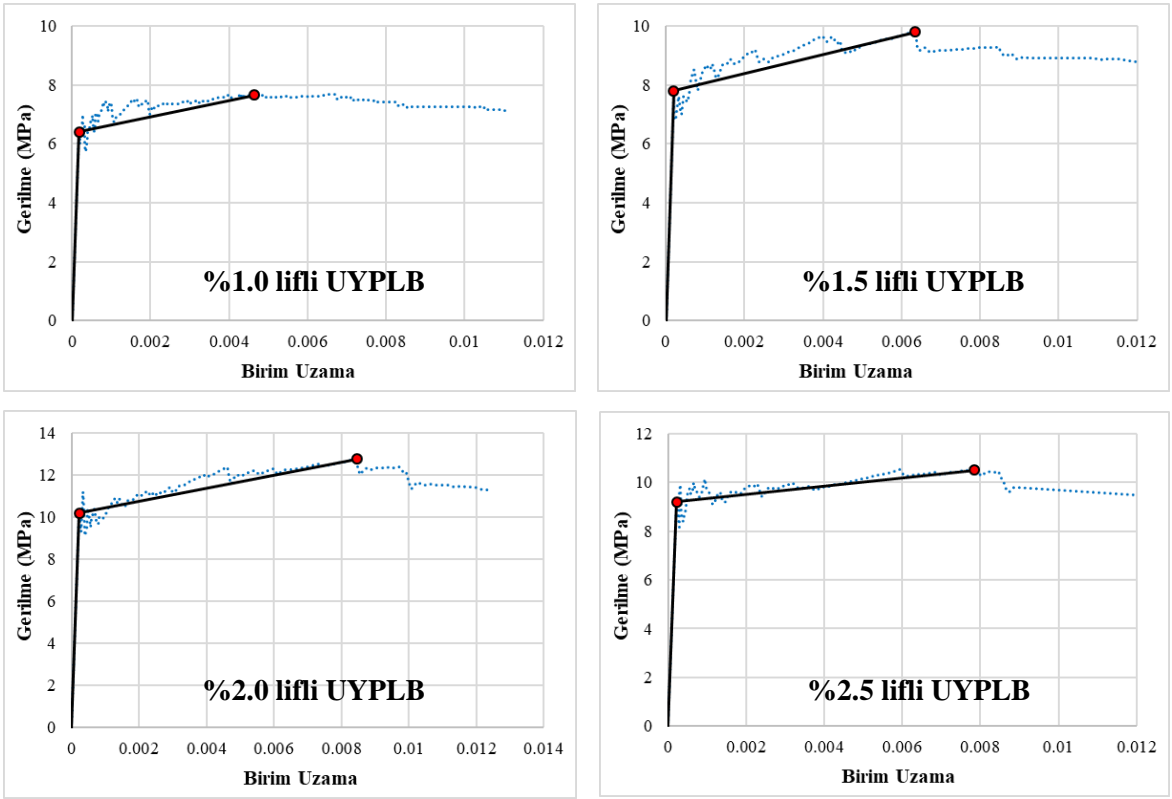
Şekil 3.36: Dört farklı lif oranı için UYPLB  $\sigma_{ct} - \varepsilon_{ct}$  ilişkileri.

Karakteristik  $\sigma_{ct} - \varepsilon_{ct}$  ilişkileri ilk çatlama gerilmesi ve maksimum gerilme değeri kullanılarak iki doğru parçası ile idealleştirilmiş ve bunlara ilgili güvenlik katsayıları ( $\gamma_{cf}$ ,  $K$ ) uygulanarak tasarım çekme modelleri elde edilmiştir (Şekil 3.37). Ayrıca ortalama dayanıma ait  $\sigma_{ct} - \varepsilon_{ct}$  ilişkileri de idealleştirilerek her bir lif oranı için çekme hesap modelleri elde edilmiştir (Şekil 3.38).

Prizma testlerinden elde edilen  $P - \delta$  ilişkilerinde ortalamaya göre büyük sapmalar meydana geldiği için AFGC'ye göre belirlenen karakteristik  $P - \delta$  ilişkisinin, en düşük kapasiteli numunenin dahi altında kaldığı görülmektedir (Şekil 3.37). Buna bağlı olarak en düşük kapasiteli elemandan daha kötü bir durum gözönüne alınarak tasarım yapıldığı söylenebilmektedir.



Şekil 3.37: Dört farklı lif oranı için UYPLB çekme modeli (Tasarım dayanımı için).



Şekil 3.38: Dört farklı lif oranı için UYPLB çekme modeli (Ortalama dayanımı için).

Sonuç olarak her bir lif oranı için çekme modelini tanımlayan parametreler Tablo 3.12’de verilmiştir. Tüm lif oranlarında çekme altında çatlama sonrası önemli pekleşme davranışı elde edilmiştir. Buna göre çalışmada kullanılan betonların AFGC’de tanımlanan Tip3 sınıfına girdiği söylenebilmektedir. %1.0 lif oranına sahip betonda karakteristik birim uzama limiti ( $\epsilon_{ctk,lim}$ ) 0.001 olarak elde edilirken diğer lif oranlarında 0.0025 değerini aşmıştır. Ancak AFGC’ye göre tasarım modelinde  $\epsilon_{ctk,lim}=0.0025$  ile sınırlandırılmıştır.

**Tablo 3.12:** Lif oranına göre UYPLB çekme modeli parametreleri.

UYPLB Lif Oranı %	Tasarım Dayanımı İçin				Ortalama Dayanım İçin				
	$\epsilon_{k,el}$ (mm/mm)	$f_{cd,el}$ (MPa)	$\epsilon_{k,lim}$ (mm/mm)	$f_{cd}$ (MPa)	$\epsilon_{m,el}$ (mm/mm)	$f_{cm,el}$ (MPa)	$\epsilon_{m,lim}$ (mm/mm)	$f_{cm}$ (MPa)	$E_{cm}$ (MPa)
1.0	0.00014	3.10	0.001	3.21	0.00019	6.4	0.0047	7.65	34614
1.5	0.00016	4.17	0.0025	4.18	0.00019	7.8	0.0064	9.80	40466
2.0	0.00021	4.45	0.0025	4.46	0.00023	10.2	0.0085	12.75	43806
2.5	0.00023	4.00	0.0025	4.01	0.00023	9.2	0.0079	10.50	40750

Deneysel çalışmada elde edilen beton basınç dayanımları için de ortalama ve karakteristik dayanımları ve Bölüm 3.1.1’deki parametrelere bağlı olarak basınç modelleri belirlenmiştir (Tablo 3.13 ve 3.14). Basınç modelleri için gerekli olan elastisite modülü  $E_{cm}$  çekme modelindeki elastik davranış bölümünden elde edilmiştir. Prizma testlerinden elde edilen sonuçlarda büyük sapmalar olduğu için karakteristik ve ortalama dayanımlar arasında büyük farklar oluşurken, basınç dayanımlarında sapmalar düşük düzeyde olduğundan ortalama ve karakteristik dayanımlar oldukça yakın elde edilmiştir.

**Tablo 3.13:** Lif oranına göre UYPLB’nin ortalama ve karakteristik basınç dayanımları.

	Lif Oranı (%)			
	1.0	1.5	2.0	2.5
$f_{cm}$ (MPa)	163.1	164.1	167.7	172.8
Standart Sapma	10.99	12.14	3.8	8.23
$f_{ck}$ (MPa)	143.3	142.2	160.9	158

**Tablo 3.14:** Lif oranlarına göre UYPLB basınç modeli parametreleri.

Lif Oranı (%)	Beton Tasarım Basınç Modeli			Beton Ortalama Basınç Modeli			$E_{cm}$ (Mpa)
	$\epsilon_{c0d}$	$\epsilon_{cud}$	$f_{cd}$	$\epsilon_{c0m}$	$\epsilon_{cum}$	$f_{cm}$	
	(mm/mm)	(mm/mm)	(Mpa)	(mm/mm)	(mm/mm)	(Mpa)	
1.0	0.00235	0.00389	81.2	0.00471	0.00389	163.1	34614
1.5	0.00199	0.00366	80.6	0.00405	0.00366	164.1	40466
2.0	0.00208	0.00430	91.2	0.00383	0.00430	167.7	43806
2.5	0.00220	0.00407	89.5	0.00424	0.00407	172.8	40750

Kirişlerde kullanılan donatılar için de ortalama ve karakteristik dayanımlar benzer şekilde elde edilmiş ve ilgili tasarım parametreleri Tablo 3.15 ve 3.16’da verilmiştir.

**Tablo 3.15:** Kirişlerdeki donatılar için ortalama ve karakteristik akma dayanımları.

	Donatı Çapı (mm)			
	10	12	14	16
$f_{ym}$ (MPa)	470.1	470.1	469.9	469.5
Standart Sapma	1.13	1.64	1.46	2.51
$f_{yk}$ (MPa)	468.0	467.0	467.1	464.7

**Tablo 3.16:** Kirişlerdeki donatılar için çekme modeli parametreleri.

Donatı Çapı (mm)	Tasarım Dayanımı İçin			Ortalama Dayanım İçin			$E_s$ (Mpa)
	$\epsilon_{yd}$	$\epsilon_{sud}$	$f_{yd}$	$\epsilon_{ym}$	$\epsilon_{sum}$	$f_{ym}$	
	(mm/mm)	(mm/mm)	(Mpa)	(mm/mm)	(mm/mm)	(Mpa)	
10	0.00204	0.01	406.9	0.00235	0.01	470.1	200
12	0.00203	0.01	406.1	0.00235	0.01	470.1	200
14	0.00203	0.01	406.2	0.00235	0.01	469.9	200
16	0.00202	0.01	404.1	0.00235	0.01	469.5	200

Belirlenen hesap modelleri test kirişlerinde kullanılarak kirişlerin eğilme kapasiteleri belirlenmiştir. Kiriş kesitlerinin taşıma gücü limit durumuna ait birim şekildeğiştirmeler ( $\epsilon_c$ ,  $\epsilon_s$ ,  $\epsilon_t$ ) ve bileşke kuvvetler ( $C_c$ ,  $T_c$ ,  $T_s$ ) Tablo 3.17 ve 3.18’de verilmiştir. Ayrıca, lifin moment kapasitesine olan katkısını belirlemek amacıyla lifli beton tarafından aktarılan moment ( $M_{Tc}$ ) Tablo 3.17 ve 3.18’de verilmiştir.

**Tablo 3.17:** Test kirişlerinin AFGC'ye göre nümerik hesap sonuçları (Tasarım dayanımı için).

Kiriş Kodu	$c_n$ (mm)	$\epsilon_c$	$\epsilon_s$	$\epsilon_t$	$C_c$ (kN)	$T_c$ (kN)	$T_s$ (kN)	$M_{maks}^{AFGC,t}$ (kNm)	$M_{Tc}$ (kNm)
B10-1.0	72.5	0.0004	0.0009	0.0010	71.6	42.2	27.6	12.76	4.94
B10-1.5	57.5	0.0007	0.0022	0.0025	127.8	59.9	64.2	23.08	7.372
B10-2.0	55	0.0007	0.0022	0.0025	125.5	64.3	64.2	23.61	8.059
B10-2.5	55.25	0.0007	0.0022	0.0025	118.0	57.6	64.2	22.50	7.228
B12-1.0	77.5	0.0004	0.0009	0.0010	82.5	41.5	39.7	15.08	4.721
B12-1.5	62.5	0.0008	0.0022	0.0025	152.8	59.1	93.3	28.76	7.098
B12-2.0	60	0.0008	0.0022	0.0025	151.5	63.2	93.3	29.28	7.732
B12-2.5	60.75	0.0008	0.0022	0.0025	144.8	56.5	93.3	28.06	6.906
B14-1.0	82.5	0.0005	0.0009	0.0010	94.3	40.7	53.5	17.67	4.506
B14-1.5	67.5	0.0009	0.0022	0.0025	179.9	58.0	125.9	34.98	6.799
B14-2.0	65.5	0.0009	0.0022	0.0025	182.7	61.8	125.9	35.62	7.348
B14-2.5	67.5	0.0009	0.0022	0.0025	181.2	55.2	125.9	34.76	6.518
B16-1.0	90	0.0006	0.0008	0.0010	113.9	39.6	69.4	20.94	4.191
B16-1.5	75	0.0011	0.0021	0.0025	224.9	56.4	164.4	42.80	6.334
B16-2.0	72.5	0.001	0.0021	0.0025	226.5	60.5	164.4	43.44	6.938
B16-2.5	73	0.001	0.0021	0.0025	213.8	54.1	164.4	42.08	6.209

**Tablo 3.18:** Test kirişlerinin AFGC'ye göre nümerik hesap sonuçları (Ortalama dayanım için).

Kiriş Kodu	$c_n$ (mm)	$\epsilon_c$	$\epsilon_s$	$\epsilon_t$	$C_c$ (kN)	$T_c$ (kN)	$T_s$ (kN)	$M_{maks}^{AFGC,ort}$ (kNm)	$M_{Tc}$ (kNm)
B10-1.0	53.75	0.0013	0.0041	0.0047	175.5	105.6	73.8	32.38	13.43
B10-1.5	47.5	0.0015	0.0056	0.0064	213.5	137.8	73.8	37.77	17.93
B10-2.0	43.75	0.0018	0.0074	0.0085	256.4	184.3	73.8	44.89	24.07
B10-2.5	44.25	0.0017	0.0069	0.0079	227.2	156.1	73.8	40.14	20.12
B12-1.0	58	0.0014	0.0040	0.0047	207.1	103.9	106.7	38.88	12.97
B12-1.5	50	0.0016	0.0056	0.0064	239.1	136.0	107.2	44.29	17.57
B12-2.0	46	0.0019	0.0074	0.0085	286.5	181.6	107.2	51.58	23.63
B12-2.5	46.75	0.0018	0.0069	0.0079	256.6	153.6	106.3	46.64	19.72
B14-1.0	62.5	0.0016	0.0040	0.0047	243.1	102.3	144.6	46.33	12.49
B14-1.5	53.25	0.0017	0.0055	0.0064	274.5	133.9	144.6	51.73	17.11
B14-2.0	48.5	0.002	0.0074	0.0085	322.1	178.9	144.6	59.09	23.16
B14-2.5	50	0.002	0.0069	0.0079	297.7	150.7	144.6	54.44	19.21
B16-1.0	67.5	0.0017	0.0040	0.0047	286.2	100.6	188.9	55.01	11.96
B16-1.5	57.5	0.0019	0.0055	0.0064	324.5	131.6	188.9	60.73	16.52
B16-2.0	51.25	0.0022	0.0074	0.0085	363.7	176.3	188.9	67.91	22.65
B16-2.5	52.75	0.0021	0.0069	0.0079	334.8	148.6	188.9	63.13	18.78

Tüm kirişlerde taşıma gücü limit durumu için beton çekme şekildeğiştirme kapasitesi belirleyici olmuş, beton basınç şekildeğiştirme değerleri sınır değerinin çok altında kalmıştır. Lifli betonun taşıma gücüne katkısı, düşük donatı oranlarındaki donatının katkısını aşmış, donatı oranı arttıkça bu katkı donatıya göre azalmıştır. Özellikle %2.0 ve %2.5 lif oranları için hemen her durumda lifli beton çekme dayanımının kapasiteye katkısı donatıdan fazla olmuştur (Tablo 3.17 ve 3.18). Limit durumda tüm donatı oranlarında donatı akmış ancak pekleşme bölgesine geçmemiştir. UYPLB'nin çekme dayanımının kesit kapasitesine mutlak katkısı tüm donatı oranları için yaklaşık aynı mertebede olmuştur. Ortalama dayanıma göre belirlenen kapasiteler, karakteristik dayanımlı kapasitelerden 1.42-2.63 kat yüksek elde edilmiştir.

### **3.3 Basitleştirilmiş Metodlarla Eğilme Kapasitelerinin Belirlenmesi ve Değerlendirilmesi**

Bölüm 3.1'de verilen detaylı AFGC yaklaşımına alternatif olarak, daha basit amprik bağıntıları esas alan yaklaşımlar da geliştirilmiştir. Bu yaklaşımlarda genel olarak UYPLB için basınç ve çekmede basitleştirilmiş eşdeğer gerilme dağılımları kullanılmaktadır. Bununla birlikte şekildeğiştirme durumları için de belirli kabuller yapılarak geleneksel betonarmedeki gibi enkesit üzerine yazılan denge denklemleri ile eğilme kapasitesi hesaplanmaktadır. Bu konuda standartlaşmış bir prosedür bulunmamakta, ancak literatürde çeşitli yaklaşımlar önerilmektedir. Öne çıkan 5 farklı yaklaşım aşağıda açıklanmış ve bunlar test kirişlerine uygulanarak değerlendirilmiştir.

#### **3.3.1 Khalil ve Tayfur (2013) Yaklaşımı (KT)**

Bu yaklaşımda ACI544 (2009)'da geleneksel lifli betonarme kirişlerin eğilme kapasitesinin belirlenmesi için önerilen hesap modeli UYPLB'li kirişler için geliştirilmiştir. Önerilen modelde kesitin taşıma gücü için beton basınç şekildeğiştirmesi  $\epsilon_{cu}=0.0035$  kabul edilmiş, çekme bölgesindeki betonu temsilen Denklem 3.33 ile belirlenen üniform gerilme dağılımı ( $f_{ct}$ ) esas alınmıştır. Çekmeyi temsil eden gerilme dağılımı liflerin özelliklerini, miktarını, yönelmesini ve aderansını temsil eden parametrelere bağlı olarak belirlenmektedir. Beton basınç bölgesindeki gerilme dağılımı eşdeğer dikdörtgen gerilme bloğu olarak idealleştirilmiştir (Şekil 3.39). Basınç bloğunun derinliğini belirleyen  $\beta_1$  katsayısı, 0.65 değerinden küçük olmamak koşulu ile 30 MPa üzerindeki her 7 MPa'lık basınç dayanımı için 0.05 oranında azaltılarak belirlenmektedir.

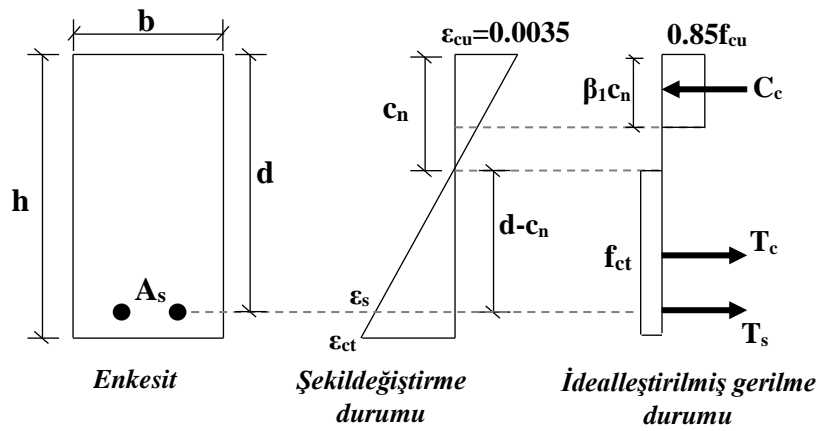


$$f_{ct} = 2\eta_o\eta_b\eta_l\tau_f \left( \frac{l_f}{d_f} \right) \rho_f \quad (3.33)$$

Burada;  $\eta_o, \eta_b, \eta_l$  sırasıyla çelik liflerin yönelme, aderans ve uzunluğu ile ilgili etkinlik çarpanını göstermekte ve sırasıyla 0.86, 0.41 ve 1 olarak önerilmekte,  $l_f, d_f, \rho_f$  sırasıyla lif boyu, lif çapı ve hacimsel lif oranını,  $\tau_f$  çelik lif ile beton arasındaki aderans dayanımını göstermektedir.  $\tau_f$  değeri Denklem 3.34 ile belirlenmektedir.

$$\tau_f = 0.66\sqrt{f_{cu}} \quad (3.34)$$

Burada;  $f_{cu}$  maksimum beton basınç dayanımını belirtmektedir.



**Şekil 3.39:** KT'de esas alınan nümerik model karakteristikleri.

Şekil 3.39'da;  $\epsilon_{cu}$  maksimum beton basınç birim şekildeğiştirmesini,  $f_{ct}$  maksimum beton çekme dayanımını,  $\epsilon_s$  donatı birim şekildeğiştirmesini,  $\epsilon_{ct}$  çekme bölgesinin en alt lifindeki beton birim şekildeğiştirmesini,  $b, h, d, c_n$  kesitin sırasıyla, genişliği, yüksekliği, faydalı yüksekliği ve tarafsız eksenini,  $A_s$  kesitin çekme donatısı alanını,  $C_c, T_c$  ve  $T_s$  sırasıyla taşıma gücüne ulaşmış kesitteki bileşke beton basınç kuvvetini, bileşke beton çekme kuvvetini ve donatıdaki çekme kuvvetini göstermektedir.

Bu yaklaşımın %2.0 lif içeren B10-2.0 test kirişi için uygulaması örnek olarak gösterilmiş ve benzer şekilde tüm test kirişlerine uygulanmıştır. Betona ait maksimum çekme dayanımı Tablo 3.19'da verilen malzeme özellikleri kullanılarak Denklem 3.33 ve 3.34 ile hesaplanmıştır.

$$\tau_f = 0.66\sqrt{f_{cu}} = 0.66\sqrt{168} = 8.55 \text{ MPa}$$

$$f_{ct} = 2\eta_o\eta_b\eta_l\tau_f \left( \frac{l_f}{d_f} \right) \rho_f = 2 \times 0.86 \times 0.41 \times 1 \times 8.55 \left( \frac{13}{0.16} \right) \times 0.02 = 9.8 \text{ MPa}$$

Beton ve çeliğe ait malzeme özellikleri ve kesit özelliklerinden yararlanılarak kesit denge durumu hesaplanmış ve kesitin eğilme kapasitesi belirlenmiştir. Kesite ait gerilme ve şekil değiştirme durumu ve ilgili parametreler Tablo 3.19’da sunulmuştur. Diğer test kirişlerine ait sonuçlar Tablo 3.20’de verilmiştir.

**Tablo 3.19:** B10-2.0 kirişinde KT yaklaşımı için taşıma gücü limit durumu özellikleri.

Malzeme Özellikleri	Gerilme ve şekil değiştirme dağılımları	Parametreler
$f_{cm}=167.7 \text{ MPa}$		$C_c=262 \text{ kN}$
$f_{ym}=470.1 \text{ MPa}$		$T_c=192 \text{ kN}$
$l_f=13 \text{ mm}$		$T_s=74 \text{ kN}$
$d_f=0.16 \text{ mm}$		$c_n=18.5 \text{ mm}$
$\rho_f=0.02$		$M=42.3 \text{ kNm}$

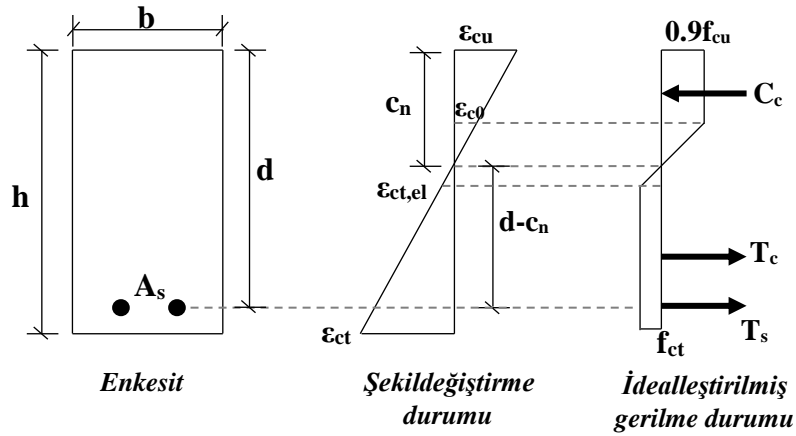
**Tablo 3.20:** Test kirişlerinin KT yaklaşımına göre nümerik hesap sonuçları.

Kiriş Kodu	$c_n$ (mm)	$\epsilon_c$	$\epsilon_s$	$\epsilon_{ct}$	$C_c$ (kN)	$T_c$ (kN)	$T_s$ (kN)	$M_{maks}^t$ (kNm)	$M_{Tc}$ (kNm)
B10-1.0	12.5	0.0035	0.060	0.067	171.6	99.5	73.8	29.46	12.36
B10-1.5	15.75	0.0035	0.047	0.052	219.7	146.0	73.8	35.83	18.11
B10-2.0	18.5	0.0035	0.039	0.044	261.9	192.3	73.8	42.32	23.87
B10-2.5	21	0.0035	0.034	0.038	308.4	239.4	73.8	49.01	29.67
B12-1.0	15	0.0035	0.049	0.055	208.0	97.6	107.2	36.57	12.11
B12-1.5	17.75	0.0035	0.041	0.046	245.8	143.5	107.2	42.92	17.82
B12-2.0	20.75	0.0035	0.034	0.039	294.0	189.0	107.2	49.37	23.43
B12-2.5	23.25	0.0035	0.030	0.034	341.5	234.7	107.2	55.82	29.13
B14-1.0	17.5	0.0035	0.042	0.047	239.1	95.7	144.6	44.65	11.86
B14-1.5	20.25	0.0035	0.035	0.040	282.5	140.8	144.6	50.84	17.46
B14-2.0	23	0.0035	0.031	0.035	326.1	185.4	144.6	57.19	23.01
B14-2.5	25.5	0.0035	0.027	0.031	374.5	230.1	144.6	63.77	28.60
B16-1.0	20.25	0.0035	0.035	0.040	280.7	93.6	188.7	53.99	11.60
B16-1.5	23.25	0.0035	0.030	0.034	324.3	137.2	188.7	60.09	17.03
B16-2.0	25.75	0.0035	0.027	0.030	368.8	181.0	188.7	66.36	22.49
B16-2.5	28	0.0035	0.025	0.028	413.1	225.4	188.7	72.84	28.02

Bu yaklaşıma göre test kirişlerinde taşıma gücü limit durumunda beton sınır kısalmaya ulaşırken, donatı pekleşme bölgesine geçmiş ve en alt beton lifindeki uzamalar ( $\epsilon_{ct}$ ) 0.025-0.067 arasında elde edilmiştir. UYPLB’de prizma için numunelerden elde edilen beton birim uzama değerlerinin yaklaşık  $\epsilon_{ct} = 0.01$  sonrasında dayanım azalması gösterdiği (yumuşama) gözönünde bulundurulduğunda KT yaklaşımındaki değerlerin çok yüksek olduğu görülmektedir.

### 3.3.2 Al-Hassani ve diğ. (2015) Yaklaşımı (AH)

Bu yaklaşımda UYPLB’li kirişlerin eğilme kapasitelerinin hesabı için belirli sayıda deneysel çalışma sonuçlarına dayanan bir hesap modeli önerilmiştir. Beton gerilmesi için eşdeğer dikdörtgen ve üçgen dağılım esas alınmakta (Şekil 3.40) ve taşıma gücü donatıdaki pekleşme ihmal edilerek beton maksimum şekildeğiştirme değerine göre belirlenmektedir. Beton maksimum şekildeğiştirme değeri ve beton çekme gerilmesi değeri, beton basınç dayanımına ve lif hacmine bağlı olarak deneysel çalışmalardan elde edilen (3.37) ve (3.35) bağıntıları ile belirlenmektedir.



Şekil 3.40: AH’de önerilen nümerik model karakteristikleri.

$$f_{ct} = 0.0243f_{cu} + 1.848\rho_f \quad (3.35)$$

$$\epsilon_{c0} = 0.9f_{cu} / E_c \quad (3.36)$$

$$\epsilon_{cu} = (1.17 \times 10^{-5} f_{cu} + 4.50 \times 10^{-4} \rho_f + 1.92 \times 10^{-3}) \times 1.5 \quad (3.37)$$

$$\epsilon_{ct,el} = 2.17 \times 10^{-5} f_{ct} + 1.75 \times 10^{-5} \quad (3.38)$$

$$E_c = 113.43f_{cu} + 31126.74 \quad (3.39)$$

Burada;  $\varepsilon_{c0}$  beton birim kısalması elastik sınır değerine karşılık gelmektedir.

Bu yaklaşımın %2.0 lif içeren B10-2.0 test kirişi için uygulaması örnek olarak gösterilmiş ve benzer şekilde tüm test kirişlerine uygulanmıştır. Kesit hesabında kullanılacak olan şekildeğiştirme ve gerilme değerleri Tablo 3.21’de sunulan malzeme özellikleri kullanılarak Denklem 3.35-3.39 ile hesaplanmıştır.

$$f_{ct} = 0.0243f_{cu} + 184.8\rho_f = 0.0243 \times 168 + 184.8 \times 0.02 = 7.8 \text{ MPa}$$

$$E_c = 113.43f_{cu} + 31126.74 = 113.43 \times 168 + 31126.74 = 50183 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon_{cu} = (1.17 \times 10^{-5} f_{cu} + 4.50 \times 10^{-4} \rho_f + 1.92 \times 10^{-3}) \times 1.5 = 0.00583$$

$$\varepsilon_{ct,el} = 2.17 \times 10^{-5} f_{ct} + 1.75 \times 10^{-5} = 2.17 \times 10^{-5} \times 7.8 + 1.75 \times 10^{-5} = 0.000186$$

$$\varepsilon_{c0} = 0.9f_{cu} / E_c = 0.9 \times 168 / 50183 = 0.00301$$

Beton ve çeliğe ait malzeme özellikleri ve kesit özelliklerinden yararlanılarak kesit denge durumu hesaplanmış ve kesitin eğilme kapasitesi belirlenmiştir. Kesite ait gerilme ve şekildeğiştirme durumu ve ilgili parametreler Tablo 3.21’de sunulmuştur. Diğer test kirişlerine ait sonuçlar Tablo 3.22’de verilmiştir.

**Tablo 3.21:** B10-2.0 kirişinde AH yaklaşımı için taşıma gücü limit durumu özellikleri.

Malzeme Özellikleri	Gerilme ve şekildeğiştirme dağılımları	Parametreler
$f_{cm} = 167.7 \text{ MPa}$ $f_{ym} = 470.1 \text{ MPa}$ $l_f = 13 \text{ mm}$ $d_f = 0.16 \text{ mm}$ $\rho_f = 0.02$		$C_c = 232 \text{ kN}$ $T_c = 159 \text{ kN}$ $T_s = 74 \text{ kN}$ $c_n = 14 \text{ mm}$ $M = 37.2 \text{ kNm}$

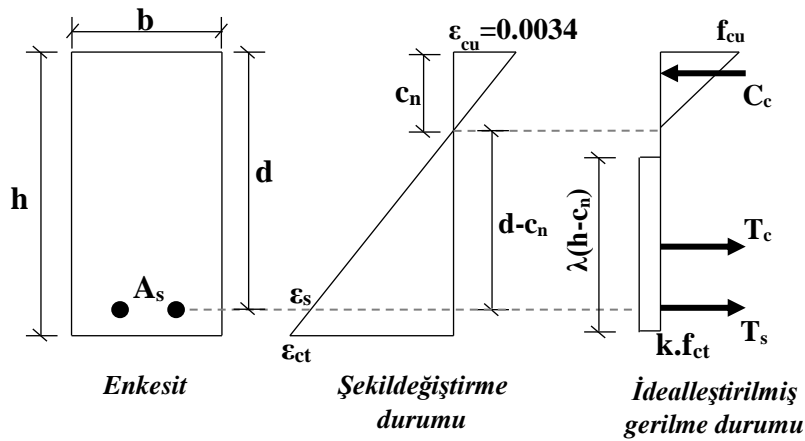
**Tablo 3.22:** Test kirişlerinin AH yaklaşımına göre nümerik hesap sonuçları.

Kiriş Kodu	$c_n$ (mm)	$\epsilon_c$	$\epsilon_s$	$\epsilon_{ct}$	$C_c$ (kN)	$T_c$ (kN)	$T_s$ (kN)	$M_{maks}^t$ (kNm)	$M_{Tc}$ (kNm)
B10-1.0	12	0.0057	0.102	0.114	193.5	120.8	73.8	32.06	14.93
B10-1.5	13	0.0058	0.094	0.105	211.1	139.5	73.8	34.54	17.23
B10-2.0	14	0.0058	0.088	0.098	232.4	159.2	73.8	37.20	19.64
B10-2.5	15	0.0059	0.083	0.093	256.5	179.3	73.8	39.96	22.11
B12-1.0	13.75	0.0057	0.088	0.099	222.1	119.3	107.2	39.12	14.72
B12-1.5	15	0.0058	0.081	0.090	244.0	137.5	107.2	41.69	16.95
B12-2.0	15.75	0.0058	0.078	0.087	261.8	157.1	107.2	44.31	19.37
B12-2.5	16.5	0.0059	0.075	0.084	282.5	177.2	107.2	46.85	21.84
B14-1.0	16	0.0057	0.075	0.084	258.9	117.3	144.6	47.20	14.45
B14-1.5	17	0.0058	0.071	0.079	276.9	135.4	144.6	49.62	16.67
B14-2.0	17.75	0.0058	0.068	0.076	295.4	154.7	144.6	52.22	19.05
B14-2.5	18.5	0.0059	0.066	0.074	317.1	174.6	144.6	54.93	21.49
B16-1.0	18.5	0.0057	0.064	0.072	299.8	115.1	188.7	56.51	14.16
B16-1.5	19.5	0.0058	0.061	0.068	318.1	132.8	188.7	58.90	16.34
B16-2.0	20.25	0.0058	0.059	0.066	337.4	151.8	188.7	61.48	18.67
B16-2.5	20.75	0.0059	0.058	0.066	356.0	171.5	188.7	64.16	21.1

Bu yaklaşıma göre test kirişlerinde taşıma gücü limit durumunda beton sınır kısılmaya ulaşırken, donatı pekleşme bölgesine geçmiş ve en alt beton lifindeki uzamalar ( $\epsilon_{ct}$ ) 0.066-0.114 arasında elde edilmiştir. Limit durumunda, yaklaşımda yapılan donatı pekleşmesinin ihmal edilmesi kabulünün sağlanmadığı ve UYPLB'nin uzama kapasitesinin çok fazla aşıldığı görülmektedir.

### 3.3.3 Chen ve diğ. (2018) Yaklaşımı (CD)

Bu yaklaşımda, UYPLB kirişlerin eğilme kapasitesini belirlemek için basınç bölgesinde üçgen, çekme bölgesinde dikdörtgen gerilme dağılımının esas alındığı bir model önerilmiştir (Şekil 3.42). Modelde taşıma gücü olarak  $\varepsilon_{cu}=0.0034$ 'lük beton basınç şekil değiştirmesi esas alınmakta, donatıdaki pekleşme ise ihmal edilmektedir. Çekme bölgesinde liflerin etkisini dikkate almak için eşdeğer dikdörtgen bloktaki gerilme değeri  $f_{ct}$  için eksenel çekme testi sonuçları kullanılmaktadır. Çekme bloğunu belirleyen katsayılar  $l_f=13\text{mm}$ ,  $d_f=0.20\text{mm}$  ve  $\rho_f =\%2.0$  lif özelliklerine sahip kirişlerde sırasıyla 0.47 ve 0.90 olarak önerilmiştir.



Şekil 3.41: CD'de esas alınan nümerik model karakteristikleri.

Bu yaklaşımın %2.0 lif içeren B10-2.0 test kirişi için uygulaması örnek olarak gösterilmiş ve benzer şekilde tüm test kirişlerine uygulanmıştır. %2.0 lif içeren B10-2.0 kirişine ait elde edilen gerilme, şekildeğiştirme durumları Tablo 3.25'de, tüm kirişlerin taşıma gücü limit durumuna ait elde edilen parametreler Tablo 3.26'da sunulmuştur. Bu yaklaşımın uygulanmasında beton çekme dayanımı ( $f_{ct}$ ) için prizma testlerinden elde edilen ortalama çekme dayanımları kullanılmıştır.

**Tablo 3.23:** B10-2.0 kirişinde CD yaklaşımı için taşıma gücü limit durumu özellikleri.

Malzeme Özellikleri	Gerilme ve şekildeğiştirme dağılımları	Parametreler
$f_{cm} = 167.7 \text{ MPa}$ $f_{ctm} = 12.8 \text{ MPa}$ $f_{ym} = 470.1 \text{ MPa}$		$C_c = 192 \text{ kN}$ $T_c = 121 \text{ kN}$ $T_s = 74 \text{ kN}$ $c_n = 15.5 \text{ mm}$ $M = 32.4 \text{ kNm}$

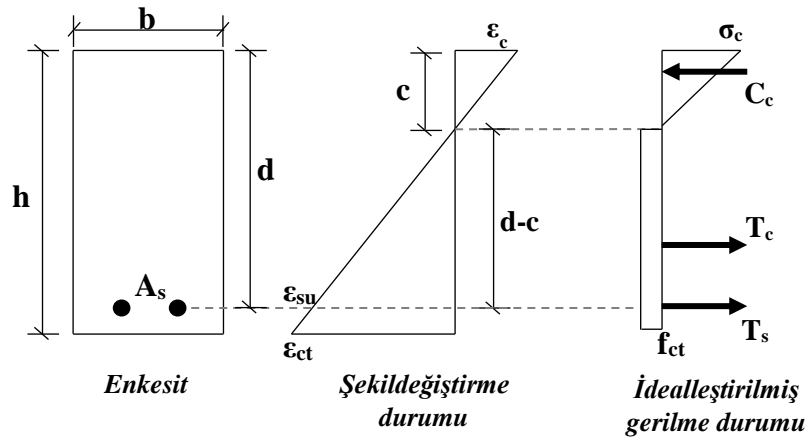
**Tablo 3.24:** Test kirişlerinin CD yaklaşımına göre nümerik hesap sonuçları.

Kiriş Kodu	$c_n$ (mm)	$\epsilon_c$	$\epsilon_s$	$\epsilon_{ct}$	$C_c$ (kN)	$T_c$ (kN)	$T_s$ (kN)	$M_{maks}^t$ (kNm)	$M_{Tc}$ (kNm)
B10-1.0	12.5	0.0035	0.060	0.067	149.8	74.2	73.8	26.12	9.2
B10-1.5	13.75	0.0035	0.054	0.060	166.2	94.3	73.8	28.77	11.67
B10-2.0	15.5	0.0035	0.047	0.053	191.8	121.0	73.8	32.39	14.96
B10-2.5	13.5	0.0035	0.055	0.061	171.7	101.2	73.8	29.67	12.52
B12-1.0	15	0.0035	0.049	0.055	180.4	72.9	107.2	33.21	9.015
B12-1.5	16.25	0.0035	0.045	0.050	196.9	92.5	107.2	35.93	11.43
B12-2.0	18	0.0035	0.040	0.045	223.3	118.6	107.2	39.52	14.66
B12-2.5	15.75	0.0035	0.047	0.052	200.9	99.5	107.2	36.63	12.3
B14-1.0	17.75	0.0035	0.041	0.046	214.1	71.3	144.6	41.30	8.815
B14-1.5	19	0.0035	0.038	0.043	230.8	90.5	144.6	43.87	11.18
B14-2.0	20.75	0.0035	0.034	0.039	257.8	116.1	144.6	47.42	14.34
B14-2.5	18.75	0.0035	0.039	0.043	239.8	97.1	144.6	44.80	12
B16-1.0	21	0.0035	0.034	0.038	253.8	69.5	188.7	50.61	8.585
B16-1.5	22.5	0.0035	0.032	0.035	273.8	88.0	188.7	53.16	10.86
B16-2.0	24	0.0035	0.029	0.033	298.7	113.0	188.7	56.65	13.96
B16-2.5	21.75	0.0035	0.033	0.037	278.6	94.9	188.7	54.08	11.71

Bu yaklaşıma göre test kirişlerinde taşıma gücü limit durumunda beton sınır kısalmaya ulaşırken, donatı pekleşme bölgesine geçmiş ve en alt beton lifindeki uzamalar ( $\epsilon_{ct}$ ) 0.033-0.067 arasında elde edilmiştir. Limit durumda, yaklaşımda yapılan donatı pekleşmesi ihmal kabulünün sağlanmadığı ve UYPLB uzama limitlerinin çok aşıldığı görülmektedir. Düşük donatı oranlarında daha büyük beton uzama değerleri oluşmasına rağmen UYPB tarafından taşınan çekme kuvvetlerinin yüksek donatı oranlarına göre daha fazla olduğu görülmektedir.

### 3.3.4 Liu ve diğ. (2018) Yaklaşımı (LD)

Bu yaklaşımda, UYPLB kirişlerin eğilme kapasitesi için, CD yaklaşımındakine benzer gerilme dağılımlarını içeren bir model önerilmiştir. Şekildeğiştirme ve gerilme durumu Şekil 3.43’de gösterilen modelde CD yaklaşımından farklı olarak taşıma gücü limit durumu için donatı çekme birim uzamasının sınır değere ulaşması kabul edilmekte ve bu değer 0.003 alınmaktadır. Donatıdaki pekleşme ise ihmal edilmektedir. Üst life ait basınç gerilmesi ( $f_c$ ) UYPLB’e ait elastisite modülü ile hesaplanmakta, çekme gerilmelerini temsil eden dikdörtgen gerilme bloğuna herhangi bir katsayı uygulanmaktadır.



Şekil 3.42: LD’de esas alınan nümerik model karakteristikleri.

Bu yaklaşımın %2.0 lif içeren B10-2.0 test kirişi için uygulaması örnek olarak gösterilmiş ve benzer şekilde tüm test kirişlerine uygulanmıştır. %2.0 lif içeren B10-2.0 kirişine ait elde edilen gerilme, şekildeğiştirme durumları Tablo 3.27’de, tüm kirişlerin taşıma gücü limit durumuna ait elde edilen parametreler Tablo 3.28’de sunulmuştur. Bu yaklaşımın uygulanmasında beton çekme dayanımı ( $f_{ct}$ ) için prizma testlerinden elde edilen ortalama çekme dayanımları kullanılmıştır.



**Tablo 3.25:** B10-2.0 kirişinde LD yaklaşımı için taşıma gücü limit durumu özellikleri.

Malzeme Özellikleri	Gerilme ve şekildeğiştirme dağılımları	Parametreler
$f_{cm} = 167.7 \text{ MPa}$		$C_c = 252 \text{ kN}$
$f_{ctm} = 12.8 \text{ MPa}$		$T_c = 182 \text{ kN}$
$f_{ym} = 470.1 \text{ MPa}$		$T_s = 74 \text{ kN}$
		$c_n = 65.3 \text{ mm}$
		$M = 44.2 \text{ kNm}$

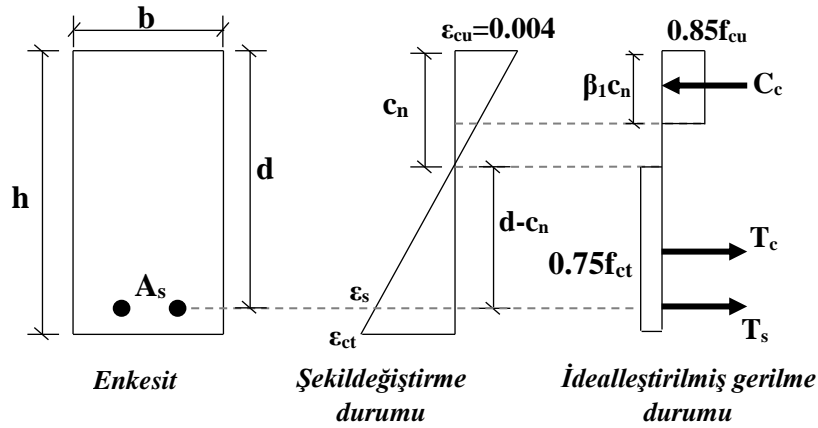
**Tablo 3.26:** Test kirişlerinin LD yaklaşımına göre nümerik hesap sonuçları.

Kiriş Kodu	$c_n$ (mm)	$\epsilon_c$	$\epsilon_s$	$\epsilon_{ct}$	$C_c$ (kN)	$T_c$ (kN)	$T_s$ (kN)	$M_{maks}^t$ (kNm)	$M_{Tc}$ (kNm)
B10-1.0	62.5	0.0012	0.003	0.00346	181.0	110.4	73.8	32.70	13.01
B10-1.5	62.5	0.0012	0.003	0.00346	211.6	141.5	73.8	37.66	16.66
B10-2.0	65.25	0.0012	0.003	0.00347	251.6	182.3	73.8	44.21	21.18
B10-2.5	63.5	0.0012	0.003	0.00346	220.6	151.1	73.8	39.18	17.7
B12-1.0	67.5	0.0013	0.003	0.00348	214.0	108.5	107.2	39.21	12.46
B12-1.5	67.5	0.0013	0.003	0.00348	250.2	139.0	107.2	44.47	15.96
B12-2.0	69	0.0013	0.003	0.00348	284.1	179.9	107.2	50.76	20.5
B12-2.5	67.5	0.0013	0.003	0.00348	252.0	149.0	107.2	45.55	17.1
B14-1.0	72.5	0.0014	0.003	0.00349	250.1	106.6	144.6	46.60	11.92
B14-1.5	70.75	0.0014	0.003	0.00349	277.2	137.4	144.6	51.42	15.51
B14-2.0	72.75	0.0014	0.003	0.00349	318.9	177.5	144.6	58.00	19.83
B14-2.5	72.5	0.0014	0.003	0.00349	294.4	146.3	144.6	53.28	16.36
B16-1.0	77.5	0.0016	0.003	0.00351	289.5	104.7	188.7	55.02	11.39
B16-1.5	75.5	0.0015	0.003	0.00350	319.5	135.1	188.7	59.99	14.87
B16-2.0	77.5	0.0016	0.003	0.00351	366.3	174.5	188.7	66.81	18.99
B16-2.5	76.25	0.0015	0.003	0.00350	328.8	144.4	188.7	61.49	15.82

Bu yaklaşıma göre taşıma gücü limit durumunda donatı 0.003'lük sınır uzamaya ulaşırken, en üst beton lifindeki beton birim kısalması ( $\epsilon_c$ ) 0.0012-0.016 arasında elde edilmiştir. Çekme bölgesindeki beton birim uzamaları ise tüm kirişlerde yaklaşık 0.0035 elde edilmiştir. Donatı pekleşme bölgesine geçmemiş ve beton birim uzama sınırları UYPLB testlerinden elde edilen değerleri aşmamıştır.

### 3.3.5 Turker ve diğ. (2019b) Yaklaşımı (TD)

Çalışmada, aynı yazarların daha önce Hasgul ve diğ. (2018)'de önerdiği nümerik yaklaşıma alternatif olarak, beton çekme testlerinin kullanıldığı yeni bir basitleştirilmiş yaklaşım önerilmiştir. Hibrit lifli UYPLB kirişler üzerinde, bu ve daha önceki yaklaşım uygulanarak benzer sonuçlar elde edilmiştir. Burada, beton çekme gerilmesi hesabı dışında aynı esaslara dayanan iki yaklaşımdan birisi açıklanmış ve test kirişlerine uygulanmıştır. Önerilen yaklaşımda, şekildeğiştirme dağılımları için Bölüm 3.3.1'de açıklanan KT yaklaşımı kullanılmış, beton basınç şekildeğiştirme sınırı farklı olarak  $\epsilon_{cu}=0.004$  kabul edilmiştir. Gerilme dağılımlarında Bölüm 3.3.1'de açıklanan amprik ifade yerine beton çekme testlerinden elde edilen çekme dayanımı esas alınmakta ve bu değerın 0.75 katı kullanılmaktadır (Şekil 3.44).



Şekil 3.43: TD'de esas alınan nümerik model karakteristikleri.

Bu yaklaşımın %2.0 lif içeren B10-2.0 test kirişi için uygulaması örnek olarak gösterilmiş ve benzer şekilde tüm test kirişlerine uygulanmıştır. %2.0 lif içeren B10-2.0 kirişine ait elde edilen gerilme, şekildeğiştirme durumları Tablo 3.29'da, tüm kirişlerin taşıma gücü limit durumuna ait elde edilen parametreler Tablo 3.30'da sunulmuştur. Bu yaklaşımın uygulanmasında beton çekme dayanımı ( $f_{ct}$ ) için prizma testlerinden elde edilen ortalama çekme dayanımları kullanılmıştır.

**Tablo 3.27:** B10-2.0 kirişinde TD yaklaşımı için taşıma gücü limit durumu özellikleri.

Malzeme Özellikleri	Gerilme ve şekildeğiştirme dağılımları	Parametreler
$f_{cm} = 167.7 \text{ MPa}$		$C_c = 273 \text{ kN}$
$f_{ctm} = 12.8 \text{ MPa}$		$T_c = 187 \text{ kN}$
$f_{ym} = 470.1 \text{ MPa}$		$T_s = 85 \text{ kN}$
$f_{yum} = 590.5 \text{ MPa}$		$c_n = 19.8 \text{ mm}$
	$f_{ct} = 9.6 \text{ MPa}$	$M = 44.2 \text{ kNm}$

$f_{yum}$  : Ortalama donatı kopma dayanımı.

**Tablo 3.28:** Test kirişlerinin TD yaklaşımına göre nümerik hesap sonuçları.

Kiriş Kodu	$c_n$ (mm)	$\epsilon_c$	$\epsilon_s$	$\epsilon_{ct}$	$C_c$ (kN)	$T_c$ (kN)	$T_s$ (kN)	$M_{maks}^t$ (kNm)	$M_{Tc}$ (kNm)
B10-1.0	15	0.004	0.056	0.063	202.8	116.3	88.1	34.91	14.39
B10-1.5	17.5	0.004	0.047	0.053	235.4	146.3	86.4	38.75	18.06
B10-2.0	19.75	0.004	0.042	0.047	272.6	187.1	85.2	44.17	23.07
B10-2.5	17.5	0.004	0.047	0.053	247.9	156.7	86.4	40.19	19.35
B12-1.0	17.75	0.004	0.047	0.052	239.1	114.0	124.7	42.75	14.07
B12-1.5	20	0.004	0.041	0.046	272.0	143.5	123.7	46.68	17.69
B12-2.0	22	0.004	0.037	0.041	304.7	183.5	122.5	52.00	22.65
B12-2.5	19.25	0.004	0.043	0.048	275.4	154.6	123.1	47.94	19.07
B14-1.0	20.5	0.004	0.040	0.045	275.5	111.4	166.3	51.56	13.76
B14-1.5	22.5	0.004	0.036	0.040	303.4	140.5	164.8	55.30	17.34
B14-2.0	25	0.004	0.032	0.036	347.5	179.2	163.3	60.58	22.1
B14-2.5	22.5	0.004	0.036	0.040	319.5	150.5	164.8	56.79	18.57
B16-1.0	24	0.004	0.034	0.038	322.3	108.4	213.9	61.55	13.37
B16-1.5	25.5	0.004	0.031	0.035	345.2	137.2	212.7	65.27	16.92
B16-2.0	27.75	0.004	0.028	0.032	384.9	174.9	211.3	70.45	21.61
B16-2.5	25	0.004	0.032	0.036	358.0	147.6	213.1	66.82	18.2

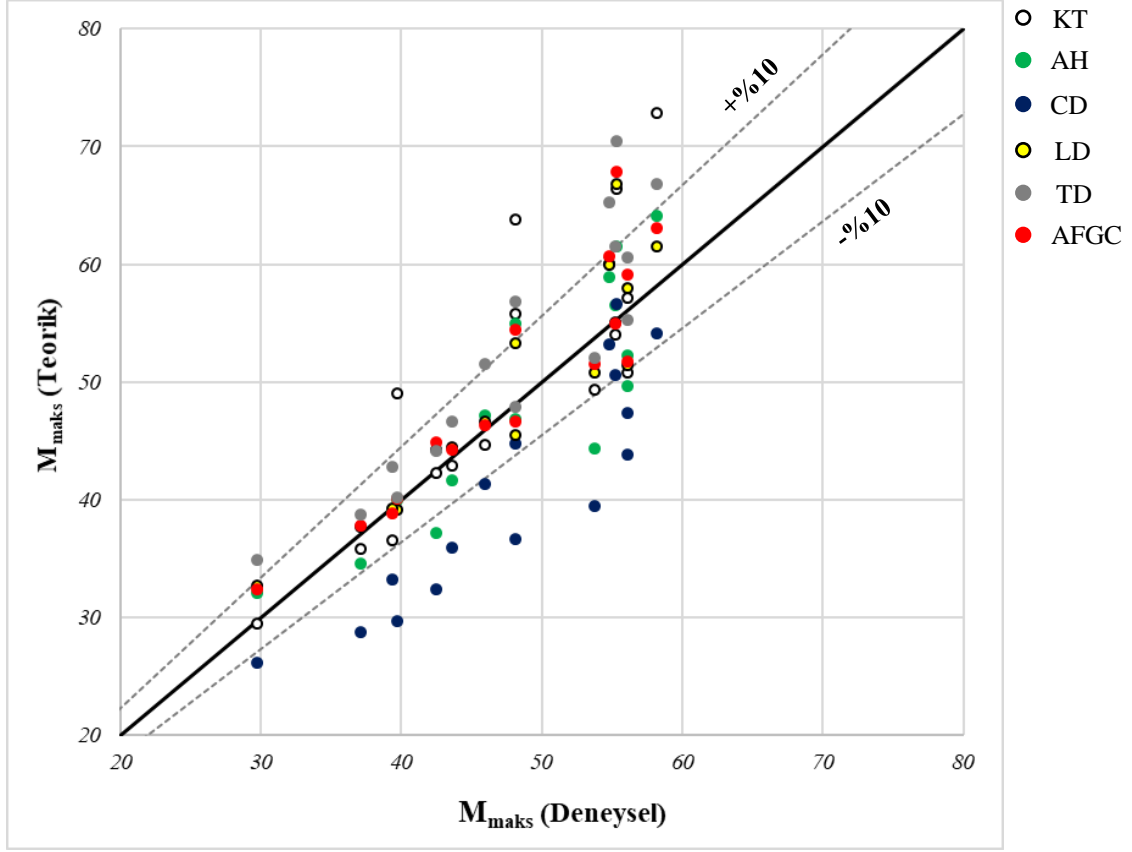
Bu yaklaşıma göre test kirişlerinde taşıma gücü limit durumunda beton sınır kısılmaya ulaşırken, donatı pekleşme bölgesine geçmiş ve en alt beton lifindeki uzamalar ( $\epsilon_{ct}$ ) 0.023-0.067 arasında elde edilmiştir. Beton birim uzama değerleri UYPLB testlerinden elde edilen sınırları çok aşmıştır.

#### 4. DENEYSEL VE NÜMERİK SONUÇLARIN KARŞILAŞTIRILMASI

Test kirişlerinden elde edilen deneysel eğilme kapasiteleri (dayanımları) ve ilgili şekildeğiştirme durumları Bölüm 3'deki nümerik yaklaşımlarla karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Eğilme kapasitelerinin karşılaştırılması Şekil 4.1'de, bu kapasite momentlerine karşılık gelen karakteristik birim şekildeğiştirmelerinin ( $\varepsilon_c$ ,  $\varepsilon_s$ ,  $\varepsilon_{ct}$ ) karşılaştırılması Şekil 4.2, 4.3 ve 4.4'de, her bir yaklaşımda deney sonuçlarına göre oluşan bağıl hataların karşılaştırılması Tablo 4.1, 4.2, 4.3 ve 4.4'de verilmiştir. Şekil 4.1-4.4 ve Tablo 4.1-4.4'deki karşılaştırmalarda AFGC yaklaşımı için UYPLB'nin ortalama dayanımlarının esas alındığı eğilme kapasiteleri kullanılmıştır. Güvenlik katsayılarını ve istatistik değerlerdirmeleri içeren tasarım dayanımlarına ait karşılaştırmaya ayrıca yer verilmiştir.

Deneysel sonuçlar referans alınarak eğilme kapasiteleri değerlendirildiğinde; CD yaklaşımı hariç tüm yaklaşımlar %10 bağıl hata oranının altında kalırken, AFGC, LD ve AH yaklaşımları %6 ve %7'lik ortalama bağıl hata ile en iyi sonuçları vermiştir.

KT yaklaşımında en büyük bağıl hatalar genellikle %2.5 lif oranına sahip kirişlerde oluşmuştur. %2.5 lif oranı içeren kirişlerde matrisin etkinliğinin azalması ile oluşan dayanım kayıpları, lif artışını lineer olarak çekme dayanımına yansıtan KT ve AH yaklaşımlarında bağıl hataların artmasına sebep olmuştur. AH yaklaşımında en fazla %18'lik bağıl hata oluşmuştur. CD yaklaşımında düşük donatı oranlarında %10-25 aralığında oluşan bağıl hatalar, en yüksek donatı oranında ( $p=0.022$ ) %2-8 düzeyine inmiştir. LD yaklaşımında sadece B16-2.0 kirişinde %21'lik bağıl hata oluşmuş, diğer tüm kirişlerde %10'un altında kalmıştır. TD yaklaşımında en büyük hata oranları (%11-%27) G4 grubu (B16) kirişlerinde elde edilmiş, diğer gruplarda genel olarak daha düşük hata oranları gerçekleşmiştir. AFGC yaklaşımında, sadece B16-2.0 kirişinde %23 bağıl hata gerçekleşmiş, diğer tüm kirişlerde hatalar %11'in altında kalmıştır. Bu bağlamda AFGC ile LD yaklaşımlarında benzer hata oranları elde edilmiştir.



Şekil 4.1: Test kirişlerine ait deneysel ve nümerik eğilme kapasitelerinin karşılaştırılması.

Tablo 4.1: Moment kapasiteleri için nümerik ve deneysel sonuçlara ait bağıl hatalar.

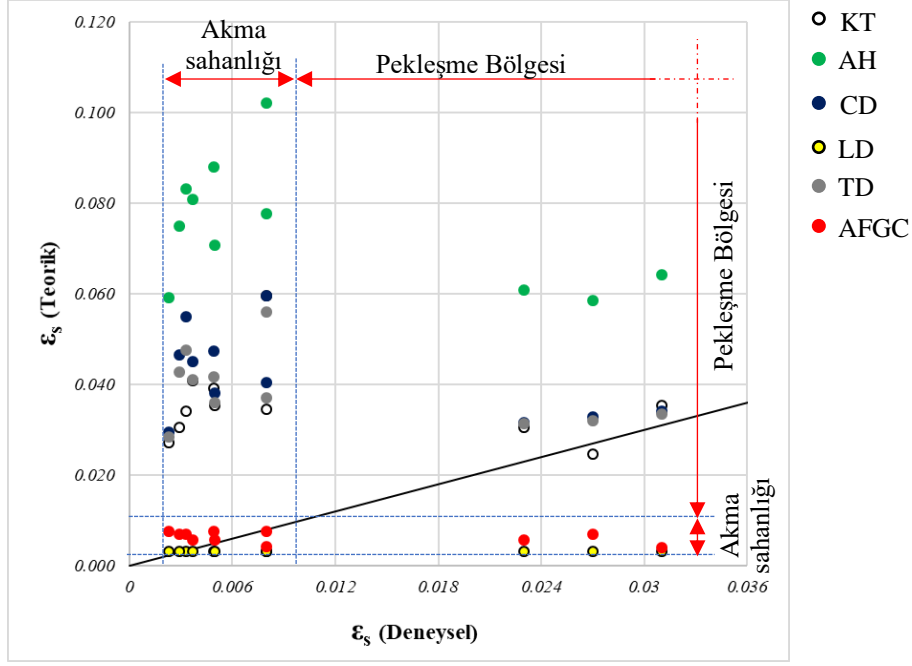
Numune	Deney	Bağıl Hata					
		KT	AH	CD	LD	TD	AFGC
B10-1.0	29.69	0.01	0.08	0.12	0.10	0.18	0.09
B10-1.5	37.09	0.03	0.07	0.22	0.02	0.04	0.02
B10-2.0	42.49	0.00	0.12	0.24	0.04	0.04	0.06
B10-2.5	39.72	0.23	0.01	0.25	0.01	0.01	0.01
B12-1.0	39.4	0.07	0.01	0.16	0.00	0.09	0.01
B12-1.5	43.63	0.02	0.04	0.18	0.02	0.07	0.02
B12-2.0	53.8	0.08	0.18	0.27	0.06	0.03	0.04
B12-2.5	48.12	0.16	0.03	0.24	0.05	0.00	0.03
B14-1.0	45.98	0.03	0.03	0.10	0.01	0.12	0.01
B14-1.5	56.13	0.09	0.12	0.22	0.08	0.01	0.08
B14-2.0	56.12	0.02	0.07	0.16	0.03	0.08	0.05
B14-2.5	58.91	0.08	0.07	0.24	0.10	0.19	0.11
B16-1.0	55.26	0.02	0.02	0.08	0.00	0.11	0.00
B16-1.5	54.77	0.10	0.08	0.03	0.10	0.19	0.11
B16-2.0	55.35	0.20	0.11	0.02	0.21	0.27	0.23
B16-2.5	58.2	0.25	0.10	0.07	0.06	0.15	0.08
<b>Ortalama</b>		0.09	0.07	0.16	0.06	0.09	0.06
<b>S.Sapma</b>		0.08	0.05	0.08	0.05	0.08	0.06



**Tablo 4.2:** Kesit üst lifindeki beton kısılması ( $\epsilon_c$ ) için nümerik ve deneysel sonuçlara ait bağıl hatalar.

Numune	Deney	Bağıl Hata					
		KT	AH	CD	LD	TD	AFGC
<b>B10-1.0</b>	0.002	0.75	1.87	0.75	0.42	1.00	0.36
<b>B10-2.0</b>	0.0014	1.50	3.17	1.50	0.12	1.86	0.28
<b>B10-2.5</b>	0.0012	1.92	3.94	1.92	0.02	2.33	0.41
<b>B12-1.5</b>	0.0014	1.50	3.12	1.50	0.08	1.86	0.13
<b>B12-2.0</b>	0.0015	1.33	2.89	1.33	0.12	1.67	0.27
<b>B12-2.5</b>	0.001	2.50	4.93	2.50	0.29	3.00	0.81
<b>B14-1.5</b>	0.0017	1.06	2.39	1.06	0.19	1.35	0.01
<b>B16-1.0</b>	0.0023	0.52	1.50	0.52	0.31	0.74	0.25
<b>B16-1.5</b>	0.0056	0.38	0.03	0.38	0.73	0.29	0.66
<b>B16-2.0</b>	0.0008	3.38	6.30	3.38	0.97	4.00	1.72
<b>B16-2.5</b>	0.0063	0.44	0.06	0.44	0.76	0.37	0.67
<b>Ortalama</b>		1.39	2.75	1.39	0.36	1.68	0.51
<b>S.Sapma</b>		0.93	1.90	0.93	0.32	1.13	0.47

Taşıma gücü limit durumuna karşılık gelen donatı birim uzaması değerleri karşılaştırıldığında (Şekil 4.3, Tablo 4.3), deneysel değerlere en yakın sonuçlar AFGC ve LD yaklaşımlarında elde edilmiştir. Diğer nümerik yaklaşımlarda 5-13.5 kat arasında değişen ortalama bağıl hatalar oluşmuştur. En iyi sonuçlar, %48'lik hata ve 0.32 standart sapma ile LD yaklaşımında elde edilmiştir. Deney sonuçları incelendiğinde, sadece en yüksek donatı oranına sahip G4 grubu kirişlerinde donatı birim uzaması pekleşme bölgesine geçerken, diğer kirişler akma sahanlığında kalmıştır. Donatıları akma sahanlığında kalan kirişlerde taşıma gücü sınır durumu olarak donatı uzamasını sınırlandıran LD yaklaşımı ile kesit alt lifindeki beton uzamasını sınırlandıran AFGC yaklaşımı iyi sonuç verirken, donatıları pekleşme bölgesine geçen kirişlerde kesit üst lifindeki beton kısılmasını sınır durumu olarak kabul eden KT, CD ve TD yaklaşımları daha uyumlu sonuç vermiştir.



Şekil 4.3: Çekme donatısı uzaması ( $\epsilon_s$ ) için nümerik ve deneysel sonuçların karşılaştırılması.

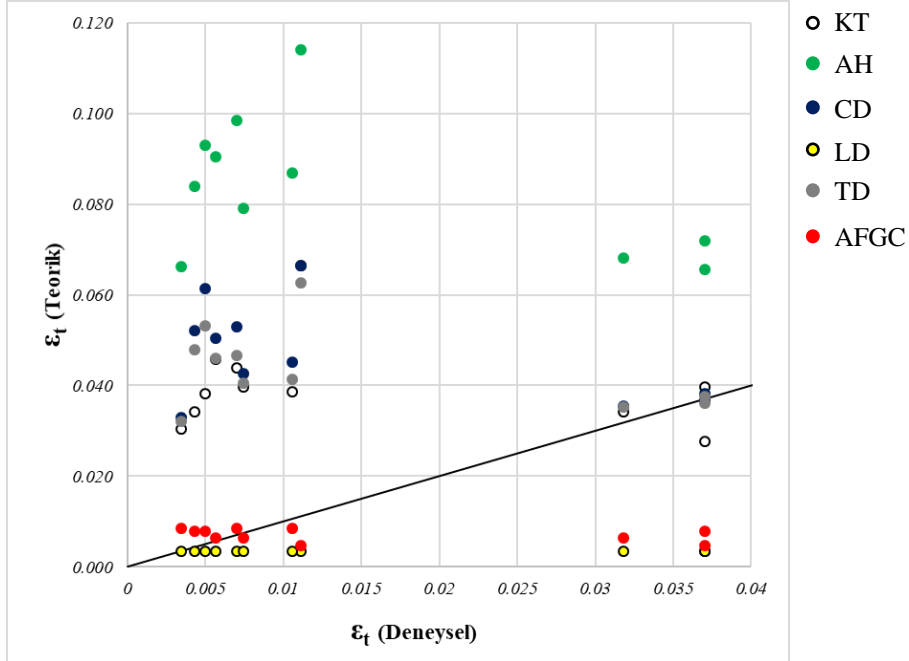
Tablo 4.3: Çekme donatısı uzaması ( $\epsilon_s$ ) için nümerik ve deneysel sonuçlara ait bağıl hatalar.

Numune	Deney	Bağıl Hata					
		KT	AH	CD	LD	TD	AFGC
B10-1.0	0.008	6.44	11.76	6.44	0.63	6.00	0.49
B10-2.0	0.0049	6.97	16.95	8.65	0.39	7.48	0.51
B10-2.5	0.0033	9.30	24.16	15.62	0.09	13.37	1.09
B12-1.5	0.0037	10.04	20.83	11.15	0.19	10.08	0.51
B12-2.0	0.008	3.31	8.69	4.03	0.63	3.61	0.08
B12-2.5	0.0029	9.47	24.84	15.03	0.03	13.74	1.38
B14-1.5	0.005	6.08	13.12	6.59	0.40	6.20	0.10
B16-1.0	0.031	0.14	1.07	0.10	0.90	0.08	0.87
B16-1.5	0.023	0.32	1.64	0.37	0.87	0.36	0.76
B16-2.0	0.0023	10.78	24.66	11.74	0.30	11.36	2.22
B16-2.5	0.027	0.09	1.16	0.21	0.89	0.19	0.74
<b>Ortalama</b>		5.72	13.54	7.27	0.48	6.59	0.80
<b>S.Sapma</b>		4.14	9.52	5.72	0.32	5.14	0.61

Taşıma gücü limit durumuna karşılık gelen maksimum beton birim uzaması değerleri karşılaştırıldığında (Şekil 4.4, Tablo 4.4), donatı birim uzamalarındaki sonuçlara benzer sonuçlar elde edilmiştir. Deneysel değerlere en yakın sonuçlar AFGC ve LD yaklaşımlarında elde edilmiştir. Diğer nümerik yaklaşımlarda 4-10 kat arasında değişen hatalar gerçekleşmiştir. En iyi sonuçlar, %55'lik hata ve 0.30 standart sapma ile LD yaklaşımında



elde edilmiştir. Bu yaklaşımda ve AFGC yaklaşımında en büyük hatalar en yüksek donatı oranına sahip kirişler (G4 Grubu) için elde edilirken, bu kirişlerde KT, CD, TD yaklaşımlarındaki hata oranı azalmıştır.



Şekil 4.4: Kesit alt lifindeki beton kısalması ( $\epsilon_t$ ) için nümerik ve deneysel sonuçların karşılaştırılması.

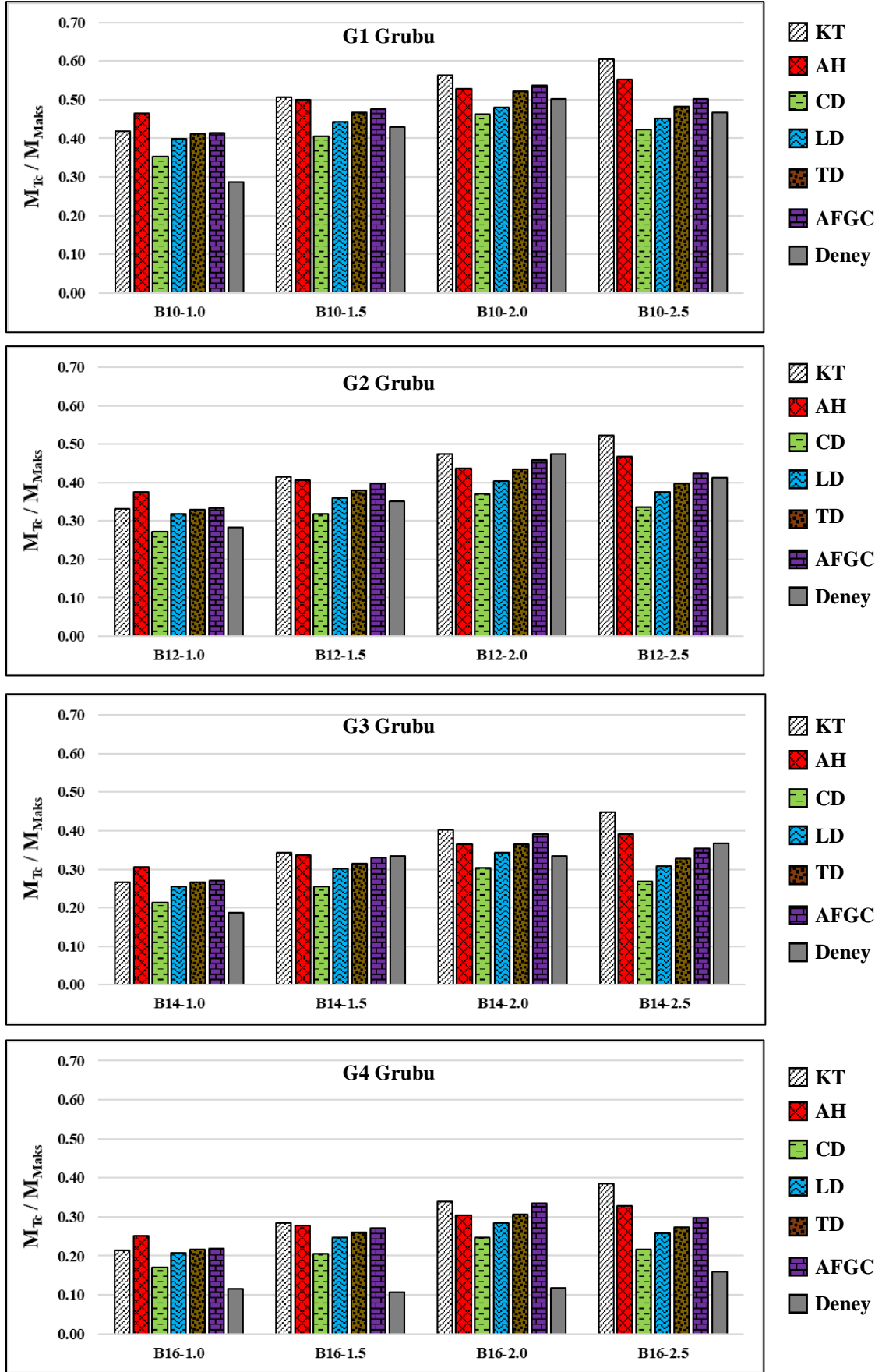
Tablo 4.4: Kesit alt lifindeki beton uzaması ( $\epsilon_t$ ) için nümerik ve deneysel sonuçlara ait bağıl hatalar.

Numune	Deney	Bağıl Hata					
		KT	AH	CD	LD	TD	AFGC
B10-1.0	0.011	4.99	9.26	4.99	0.69	4.64	0.58
B10-2.0	0.007	5.26	13.06	6.56	0.50	5.66	0.21
B10-2.5	0.005	6.63	17.58	11.26	0.31	9.63	0.57
B12-1.5	0.006	7.08	14.95	7.88	0.39	7.12	0.12
B12-2.0	0.011	2.66	7.22	3.27	0.67	2.93	0.20
B12-2.5	0.004	6.88	18.37	11.01	0.20	10.06	0.81
B14-1.5	0.007	4.33	9.62	4.72	0.53	4.43	0.15
B16-1.0	0.037	0.07	0.94	0.03	0.91	0.02	0.87
B16-1.5	0.032	0.07	1.15	0.11	0.89	0.11	0.80
B16-2.0	0.003	7.85	18.23	8.57	0.02	8.30	1.45
B16-2.5	0.037	0.25	0.77	0.01	0.91	0.03	0.79
<b>Ortalama</b>		4.19	10.10	5.31	0.55	4.81	0.60
<b>S.Sapma</b>		2.97	6.95	4.18	0.30	3.75	0.41

Beton çekme dayanımının eğilme kapasitesine katkısı tüm yaklaşımlar ve deneysel sonuçlar için Şekil 4.5’de karşılaştırılmıştır. Bunun için nümerik yaklaşımlarda kesitte sadece lifli betonun çekme dayanımı ile karşılanan moment  $M_{Tc}$ , kesit moment kapasitesine oranlanmıştır. Deneysel olarak beton çekme dayanımının eğilme kapasitesine katkısını belirlemek için ise lifsiz referans kirişleri (R2) ile UYPLB kirişlerin kapasite farkları UYPLB kiriş kapasitelerine oranlanmıştır.

AFGC, LD ve TD yaklaşımları en yüksek donatı oranına sahip G4 grubu kirişleri hariç deneysel sonuçlarla uyumlu sonuç verirken, KT ve AH yaklaşımları genel olarak deneysel sonuçların üzerinde lif kapasite katkısı dikkate almıştır.

Tüm nümerik yaklaşımlar, en yüksek donatı oranındaki kirişlerde lifli betonun kapasiteye katkısını deneysel sonuçlara göre çok yüksek vermiştir.

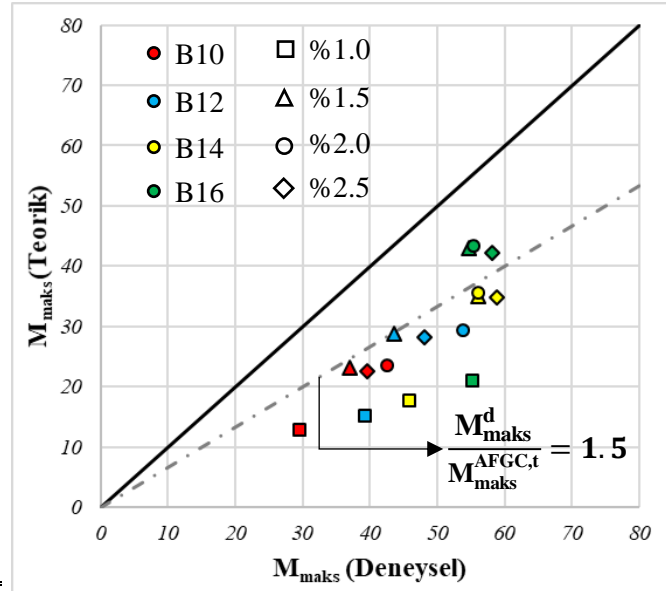


Şekil 4.5: Beton çekme dayanımının eğilme kapasitesine katkısının karşılaştırılması.

Güvenlik katsayıları ile azaltılmış dayanımların kullanıldığı AFGC tasarım prosedürüne ait kapasiteler Tablo 4.5’de deneysel test sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Çalışma kapsamında incelenen kirişlerde AFGC’nin eğilme kapasitelerinde ortalama 1.83 kat güvenlik sağladığı belirlenmiştir. En yüksek donatı oranına sahip G4 grubu kirişlerinde güvenliğin 1.27’ye kadar düşebildiği, diğer tüm kirişlerde 1.5 katın üzerinde güvenlik sağladığı görülmüştür. En yüksek güvenlik oranı (2.33-2.64 kat arası) %1.0 lif oranına sahip kirişlerde elde edilmiştir.

**Tablo 4.5:** Deneysel moment kapasitelerinin AFGC tasarım sonuçlarıyla karşılaştırılması.

Kiriş Kodu	$M_{maks}^d$ (kNm)	$M_{maks}^{AFGC,t}$ (kNm)	$\frac{M_{maks}^d}{M_{maks}^{AFGC,t}}$		Grafiksel karşılaştırma	
B10-1.0	29.7	12.8	2.33			
B10-1.5	37.1	23.1	1.61			
B10-2.0	42.5	23.6	1.80			
B10-2.5	39.7	22.5	1.77			
B12-1.0	39.4	15.1	2.61			
B12-1.5	43.6	28.8	1.52			
B12-2.0	53.8	29.3	1.84			
B12-2.5	48.1	28.1	1.71			
B14-1.0	46.0	17.7	2.60			
B14-1.5	56.1	35.0	1.60			
B14-2.0	56.1	35.6	1.58			
B14-2.5	58.9	34.8	1.69			
B16-1.0	55.3	20.9	2.64			
B16-1.5	54.8	42.8	1.28			
B16-2.0	55.4	43.4	1.27			
B16-2.5	58.2	42.1	1.38			
<b>Ortalama</b>			1.83			
<b>S.Sapma</b>			0.46			



## 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Çalışmada I enkesitli betonarme kirişlerde Ultra Yüksek Performanslı Lifli Beton (UYPLB) kullanımının eğilme davranışı üzerindeki etkileri deneysel olarak incelenmiş ve avantaj ve dezavantajları değerlendirilmiştir. Bununla birlikte, UYPLB kirişlerin eğilme kapasitelerinin belirlenmesine yönelik nümerik yaklaşımlar deneysel sonuçlar referans alınarak karşılaştırılmış ve geçerlilikleri değerlendirilmiştir.

Çalışmanın deneysel bölümünde, UYPLB, Ultra Yüksek Dayanımlı Beton (UYDB) ve Geleneksel Beton (GB) içeren toplam 32 adet “I” enkesitli betonarme kiriş numunesi üretilmiştir. Kirişlerde dört farklı donatı oranı (0.008, 0.012, 0.017 ve 0.022) ve dört farklı lif oranı (%1.0, %1.5, %2.0 ve %2.5) kullanılmıştır. Ayrıca, UYPLB'nin mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla malzeme ölçeğinde basınç ve eğilme testleri yapılmıştır. Kirişlerin eğilme davranışları için dört noktalı eğilme testleri gerçekleştirilmiş ve yük-deplasman davranışları, kırılma şekilleri, eğilme kapasiteleri, deplasman / eğrilik süneklilikleri, çatlak dağılımları/genişlikleri, eğilme rijitlikleri ve beton/donatı şekildeğiştirme davranışları incelenmiştir. Deneysel çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar aşağıda sunulmuştur.

- Betonarme kirişlerde UYPLB kullanımı eğilme davranışını geleneksel betonarmeye göre önemli ölçüde değiştirmektedir. Geleneksel betonarmede kirişler için öngörülen donatı oranlarında ( $\leq 0.02$ ) kapasiteye ulaşıldığında basınç bölgesinde beton ezilmesi oluşurken, UYPLB içeren kirişlerde çekme bölgesinde lif sıyrılmaları ile dayanım azalmaları başlamaktadır. Lif sıyrılmalarıyla başlayan büyük çatlak oluşumu erken donatı kopmasına yol açmaktadır. Bu davranış, kirişteki donatı oranı %2'ye ulaştığında değişmeye başlamakta ve geleneksel betonarmeye benzemektedir.
- Kirişlerde UYPLB kullanımı yük taşıma kapasitelerinde GB'li kirişlere göre %17-%226 arasında, UYDB'li kirişlere göre %21-%81 arasında artış sağlamıştır. Düşük donatı oranlarında UYPLB'nin katkısı daha fazla olmakta, donatı oranı arttıkça kapasiteye katkı azalmaktadır.
- UYPLB'de lif oranı artışının yük taşıma kapasitesine etkisi donatı oranına bağlı olarak değişim göstermiştir.  $\rho=0.008-0.017$  oranları için kapasitede önemli artışlar elde edilirken,  $\rho=0.022$  oranında kapasite değişimi olmamıştır.
- $\rho=0.008-0.017$ 'lik donatı oranlarında UYPLB kullanımı genel olarak sünekliliklerde azalmaya sebep olmuştur. Ancak 0.02'lik donatı oranına ulaşıldığında sünekliliklerde

GB'ye göre 2.20-2.82 kat artış sağlanmıştır. UYPLB'deki lif oranı artışı düşük donatı oranlarında sünekliği azaltırken, en yüksek donatı oranında artışa sebep olmuştur. UYPLB için incelenen lif oranları içinde süneklik bakımından en etkin oranın ise %1.0 olduğu söylenebilmektedir. Bu lif oranında tüm donatı oranlarında en iyi süneklik değerleri elde edilmiştir.

- Kirişlerde UYPLB kullanımının eğilme rijitlikleri üzerindeki etkisi donatı oranına bağlı olarak değişim göstermiştir. Genel olarak donatı oranı arttıkça lif kullanımının rijitliğe olan etkisi azalmıştır. En düşük donatı oranında lif kullanımı 2 katın üzerinde rijitlik artışı sağlarken, en yüksek donatı oranında bu artış 1.3 kata gerilemiştir. Kullanılan lifin miktarı ise eğilme rijitliklerinde önemli bir etki yapmamıştır.
- Çalışmada incelenen UYDB'li etriyesiz referans kirişlerinde kesme kırılması gerçekleşirken, UYPLB içeren kirişlerde kesme kırılması önlenmiş ve kesme çatlakları sınırlandırılabilmiştir. En yüksek kapasiteli kirişlerde dahi %1 lif kullanımı kesme kırılmasını önleyip, kirişin eğilme kapasitesine ulaşması için yeterli olmuştur. İncelenen kirişlerde UYPLB kullanımı kesme kapasitesini 3 kattan fazla arttırmıştır.
- Kirişlerde liffsiz UYDB kullanımı GB kullanımına göre yük taşıma kapasitesi ve sünekliklerde bir miktar artış sağlarken, çatlak davranışları ve eğilme rijitlikleri bakımından etkili olmamıştır. UYPLB kullanımı ise UYDB'ye göre özellikle yüksek donatı oranında süneklik bakımından avantajlar sağlamıştır. Bu nedenle yüksek donatı oranlarında UYDB'nin lifle birlikte kullanıldığında daha etkin olduğu söylenebilmektedir.
- Kirişlerde UYPLB kullanımı çatlak davranışlarında önemli değişikliklere neden olmuştur. Elastik davranış bölgesindeki deplasmanlarda lif kullanımı oluşan çatlak sayıları ve genişliklerinde önemli azalmalar sağlamıştır. Bununla birlikte, plastik davranış bölgesinde liflerin sıyrılmaya başlamasından sonra bir noktada lokalleşen büyük bir çatlak oluşmuş ve kirişteki plastikleşme tek bir çatlak üzerinde toplanmıştır. Bu durum geleneksel betonarmeye göre çatlak sayılarında önemli bir azalmaya sebep olmuş, ancak çatlak genişliklerini önemli ölçüde arttırmıştır.
- Çalışmada incelenen UYPLB'li kirişlerde çatlak lokalleşmesi nedeniyle elemanların taşıma kapasitesine erken ulaşması, taşıma gücüne ait şekildeğiştirme değerlerinde geleneksel betonarmeye göre önemli değişikliklere sebep olmuştur. Özellikle  $\rho=0.008-0.017$ 'lik oranlarda maksimum yük anında donatıdaki şekildeğiştirmeler akma sahanlığında kalırken, basınç bölgesindeki beton elastik bölgede kalmıştır.  $\rho=0.022$  donatı oranında ise liflerin etkinliğinin azalmasıyla bu durum değişmiş, maksimum

yükte donatı pekleşme bölgesine geçerken beton basınç bölgesinde plastik şekildeğişirmeler oluşmuştur.

- Çalışmada üretilen UYPLB’de lif oranı artışı %1.0’den %2.0’ye kadar hem prizma numunesi testlerinde hem de kiriş eğilme testlerinde dayanım artışı sağlamış, ancak %2.5 oranına çıktığında dayanım azalması oluşmuştur. Bu durum %2.0’nin üzerindeki lif oranında beton matrisinin çekme dayanımı bakımından etkinliğini yitirmeye başladığını göstermektedir. Bu nedenle çalışmada kullanılan UYPLB matrisi için maksimum lif oranının %2.0 olduğu söylenebilmektedir.
- UYPLB’nin mekanik özellikleri kullanılan bileşenlerin (çimento, silis dumanı, akışkanlaştırıcı) iç yapılarındaki değişikliklerden ve üretim esnasındaki hava koşullarından önemli ölçüde etkilenebilmektedir. Çalışmada, sabit malzeme içeriklerine sahip UYPLB matrisinden alınan çok sayıdaki prizma numunelerinden elde edilen çekme dayanımları arasında büyük sapmalar elde edilmiştir. Bu nedenle tasarımda kullanılacak malzeme modelleri için AFGC prosedüründe olduğu gibi sapmaların gözönüne alındığı bir istatistik değerlendirme yapılmasının zorunlu olduğu düşünölmektedir.

Çalışmanın nümerik bölümünde, UYPLB kirişlerin eğilme kapasitelerinin belirlenmesine yönelik basitleştirilmiş nümerik yaklaşımlar (Khalil vd., Al-Hassani vd., Chen vd., Liu vd., Turker vd.) ve AFGC (2013)’de önerilen detaylı tasarım prosedürü deneysel sonuçlar referans alınarak irdelenmiş ve geçerlilikleri değerlendirilmiştir. Ayrıca AFGC’de önerilen yaklaşım da malzeme güvenlik katsayıları elimine edilerek diğer yaklaşımlarla karşılaştırılmıştır.

- $\rho=0.008-0.017$ ’lik donatı oranlarında (G1, G2 ve G3 grubu kirişlerde), taşıma gücüne ait limit durumda betonun çekmedeki uzama kapasitesi belirleyici olmuştur. Bu donatı oranları için hem eğilme hem de buna karşılık gelen şekildeğişirme durumları bakımından en iyi sonuçlar Liu vd. (LD) yaklaşımında elde edilmiştir. Bu yaklaşım eğilme kapasitelerini %6’lık ortalama bağıl hata ile belirlemiş, şekildeğişirme değerleri de deneysel sonuçlarla diğer yaklaşımlara göre çok daha tutarlı olmuştur. Liu vd. (LD), dışındaki tüm yaklaşımlarda  $\rho=0.008-0.017$ ’lik donatı oranlarında, eğilme kapasiteleri %10’luk bağıl hatalar ile belirlenebilmiş olmasına rağmen, şekildeğişirme değerlerinde deneysel sonuçlarla büyük tutarsızlıklar oluşmuştur.
- $\rho=0.0022$ ’lik donatı oranlarında (G4 grubu kirişlerde), liflerin etkinliği azalmaya başlamış ve eğilme kapasitesine ait limit durumu beton ezilmesi ve donatı uzaması

belirlemeye başlamıştır. Bu nedenle G4 grubu kirişlerinde beton birim uzamasını sınırlandıran AFGC prosedüründe ve donatı birim uzamasını sınırlandıran Liu vd. (LD) yaklaşımında, hata oranları artmış, diğer yaklaşımlardaki hata oranları azalmıştır.

- AFGC’de önerilen detaylı tasarım prosedürünün incelenen test kirişleri kapsamında ortalama 1.8 kat güvenlik sağladığı belirlenmiştir. Prosedürde,  $\rho=0.008-0.017$ ’lik donatı oranlarında 1.5 katın üzerinde,  $\rho=0.022$ ’lik donatı oranında ise yaklaşık 1.3 kat güvenlik elde edilmiştir. AFGC prosedüründe güvenlik katsayıları elimine edildiğinde ise kiriş eğilme kapasitelerini %7 ortalama bağıl hata ile uyumlu bulunduğu belirlenmiştir.
- Kapasite hesaplarında çekme test sonuçlarını esas alan yaklaşımlarda (CD, LD, TD) ve AFGC prosedüründe UYPLB’nin taşıma kapasitesine katkısı, G4 grubu kirişleri dışında genel olarak birbiriyle ve test sonuçlarıyla uyumlu elde edilmiştir. Çekme dayanımını lif özelliklerine dayanan amprik ifadelerle gözönüne alan yaklaşımlarda (KT, AH) ise kapasiteye katkının deney sonuçlarıyla uzaklaştığı belirlenmiştir.
- Sonuç olarak, basitleştirilmiş yaklaşımlardan Liu vd. (LD) yaklaşımı ile AFGC prosedürünün  $\rho=0.008-0.017$ ’lik donatı oranlarındaki UYPLB kirişlerde, eğilme kapasitelerini ilgili şekildeğiştirme durumlarıyla uyumlu olarak yeterli yaklaşımla belirleyebildiği söylenebilmektedir. Bununla birlikte daha yüksek donatı oranlarında bu yaklaşımların da hata oranları artacağı için revize edilmesi gerektiği düşünülmektedir.
- Diğer basitleştirilmiş yaklaşımlarda (CD,TD), UYPLB’nin çekme dayanımı için test sonuçlarının kullanılması dahi yeterli olmamıştır. Bu yaklaşımlarda taşıma gücü limit durumu için şekildeğiştirme kabullerinin donatı oranlarına bağılı olarak revize edilmesi gerektiği düşünülmektedir. Ayrıca, UYPLB çekme dayanımının çok sayıda değişkenden etkilendiği gözönünde bulundurulduğunda, amprik ifadelerle dayanımı belirlemenin çok zor olduğu, direkt veya dolaylı çekme testlerinden elde edilen dayanımların kullanılması gerektiği düşünülmektedir.



Çalışma kapsamında yapılan incelemeler sonucunda, I enkesitli kirişlerde UYPLB kullanımına yönelik olarak yapılması gerektiği düşünülen öncelikli çalışmalar aşağıda önerilmiştir.

- UYPLB’li kirişlerde düşük donatı oranlarında liflerin yük kapasitesine katkısı oldukça yüksek olmasına rağmen, lokalleşme sonrası ani yük azalmalarından dolayı kabul edilemez süneklikler elde edilmektedir. Bu nedenle daha çok, UYPLB’nin rijitlik, çatlak sınırlama ve durabilite avantajlarından yararlanmak amacıyla, yeterli sünekliklerin sağlandığı lif ve donatı oranlarının belirlenmesine ve bununla ilgili tasarım esaslarının geliştirilmesine yönelik çalışmalar yararlı olacaktır.
- UYPLB’nin yüksek donatı oranlarında kapasiteye katkısı azalmasına rağmen süneklikleri arttırması nedeniyle, kirişlerde çok daha yüksek donatı oranlarına imkan verecek potansiyeli bulunmaktadır. Bu nedenle, geleneksel betonarmeden çok daha yüksek donatı oranları kullanılarak, yüksek eğilme kapasiteli kirişler üretilebileceği düşünülmektedir. Bunun için, donatı sınırlarının belirlenmesi ve bununla ilgili tasarım esaslarının geliştirilmesi yönünde çalışmalar yararlı olacaktır.
- Prefabrik üretim için çok uygun olan UYPLB’nin yaygın olarak kullanılan I enkesitli kirişlerin gövde bölgesinde oluşan detay problemlerini yok etmek için etriye yerine kullanılabilme potansiyeli olduğu çalışmada ortaya konmuştur. Bu bağlamda, UYPLB ile üretilen betonarme elemanların kesme davranışının kesme açıklığı/faydalı yükseklik oranı, kesit formu, donatı oranı, lif özellikleri vb. bakımından incelenmesi ve ilgili tasarım esaslarına yönelik çalışmalar yararlı olacaktır.

## 6. KAYNAKLAR

- ACI (American Concrete Institute) Committee 318. (2014). *Building code requirements for structural concrete (ACI 318-14) and Commentary (ACI 318R-14)*, Farmington Hills.
- ACI (American Concrete Institute) Committee 318. (2002). *Building code requirements for structural concrete (ACI 318-02) and commentary (ACI 318R-02)*, Farmington Hills
- ACI (American Concrete Institute) Committee 544. (2009). *Design considerations for steel fiber reinforced concrete (ACI 544.4R-88)*, Farmington Hills.
- AFGC/SETRA. (2002). *Ultra high performance fibre-reinforced concretes. Interim recommendations*, Bagnaux, France: SETRA.
- AFGC. (2013). Recommendation: Ultra high performance fibre-reinforced concretes, Fransa: Association Française de Génie.
- Al-Hasani, H. M., Khalil, W. I. and Danha, L. S. (2015). Prediction of the nominal bending moment capacity for plain and singly reinforced rectangular RPC beam sections, *Engineering and Technology Journal*, 33 (5), 1113-1130.
- ASTM C1611M-14. (2014). *Standard test method for slump flow of self-consolidating concrete*, Pensilvanya.
- Baby, F., Marchand, P. and Toutlemonde, F. (2014). Shear behavior of Ultrahigh performance fiber-reinforced concrete beams. I: Experimental investigation, *Journal of Structural Engineering*, 140 (5), 1-10.
- Baby F., Graybeal B., Marchand P. and Toutlemonde F. (2012). A proposed flexural test method and associated inverse analysis for UHPFRC, *ACI Materials Journal*, 109 (5), 545-555.
- Blaise, P. Y. and Couture, M. (1999). Precast, prestressed pedestrian bridge-world's first reactive powder concrete structure. *PCI Journal*, 44 (5), 60-71.
- Chen, S. H., Zhang, R., Jia, L. J. and Wang, J. Y. (2018). Flexural behaviour of rebar-reinforced ultra-high-performance concrete beams, *Magazine of Concrete Research*, 70 (19), 997-1015.
- Dancygier, A. N. and Savir, Z. (2006). Flexural behavior of HSFRC with low reinforcement ratios, *Engineering Structural*, 28, 1503-1512.
- Devin K. and Harris D. (2010). Application of Ultra-high performance concrete (UHPC) for sustainable building components., *Israel workshop on: Sustainable Buldins-Materials and Energy*, Israel.

- Eide, M. B., and Hisdal, J. M. (2012). *Ultra high performance fibre reinforced concrete (UHPRFC) – State of the art: FA 2 Competitive constructions: SP 2.2 Ductile high strength concrete* (Report No: 3D005950). Oslo: SINTEF Building and Infrastructure.
- EN 12390-1. (2012). *Testing hardened concrete—Part 1: Shape, dimensions and other requirements for specimens and moulds*, Brussels: Management Centre.
- EN 12390-2. (2009). *Testing Hardened Concrete—Part 2: Making and curing specimens for strength tests*, Brussels: Management Centre.
- EN 12390-3. (2009). *Testing Hardened Concrete—Part 3: Compressive Strength of Test Specimens*, Brussels: Management Centre.
- EN 1992-1-1. (2005). *Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings*, London: BSi.
- Eurocode-2. (2008). *Design of concrete structures: British standard*, London: BSi.
- Fehling, E., Schmidt, M., Walraven, J., Leutbecher, T. and Frönlich, S. (2014). *Betonkalender: Ultra-high performance concrete UHPC*. Berlin: Wilhelm Ernst & Sohn.
- Gowripalan, N. and Gilbert, I. (2000). *Design guidelines for ductal prestressed concrete beams*, VSL Australia.
- Graybeal, B. A. and Marshall, D. (2008). Cylinder or Cube: Strength testing of 80 to 200 MPa (11.6 to 29 ksi) Ultra-High-Performance Fiber-Reinforced Concrete, *ACI Materials Journal*, 105, 603-609.
- Graybeal, B. A. (2006). *Material property characterization of Ultra-high performance concrete* (Report No: FHWA-HRT-06-103). Virginia: U.S. Department of Transportation.
- Gümüş, M. and Arslan, A. (2019). Effect of fiber type and content on the flexural behavior of high strength concrete beams with low reinforcement ratios, *Structures*, 20, 1-10.
- Habel, K., Denarie, E. and Brühwiler, E. (2007). Experimental investigation of composite Ultra-High-Performance Fibre-Reinforced Concrete and conventional members, *ACI Structural Journal*, 104 (1), 93-101.
- Hasgul, U., Turker, K., Birol, T. and Yavas, A. (2018). Flexural behavior of ultra-high-performance fiber reinforced concrete beams with low and high reinforcement ratios, *Structural Concrete*, 19 (6), 1577–90.

- Imam M, Vandewalle L. and Mortelmans F. (1995). Shear-moment analysis of reinforced high strength concrete beams containing steel fibres, *Canadian Journal of Civil Engineering*, 22, 462–70.
- İlki, A., Demir, C., Bedirhanoglu, I. and Kumbasar, N. (2009). Seismic retrofit of brittle and low strength RC columns using fiber reinforced polymer and cementitious composites, *Journal of Advances in Structural Engineering*, 12 (3), 325-347.
- JSCE. (2008). *Recommendations for design and construction of high performance fiber reinforced cement composites with multiple fine cracks (HPFRCC)*, Tokyo: Japanese Society of Civil Engineers.
- Kahanji, C., Ali, F. and Nadjai, A. (2017) Structural performance of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete beams, *Structural Concrete*, 18, 249-258.
- Khalil, W. I. and Tayfur, Y. R. (2013). Flexural strength of fibrous ultra high performance reinforced concrete beams, *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*, 8 (3), 200-214.
- Kodur, V., Solhmirzaei, R., Agrawal, A., Aziz, E. M. and Soroushian, P. (2018). Analysis of flexural and shear resistance of ultra high performance fiber reinforced concrete beams without stirrups, *Engineering Structures*, 174, 873-884.
- Lim, Y. W. and Hong, S. G. (2016). Shear tests for UHPFRC beams with shear reinforcement, *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 10 (2), 177-188.
- Lim, T. Y., Paramasivam, P., and Lee, S. L. (1987). Shear and moment capacity of reinforced steel fiber concrete beams, *Magazine of Concrete Research*, 39 (140), 60–148.
- Liu, C., Zhang, Y., Yao, Y. and Huang, Y. (2018). Calculation method for flexural capacity of high strain-hardening ultra-high performance concrete T-beams, *Structural Concrete*, 20, 405– 419.
- Mészöly, T. and Randl, N. (2018). Shear behavior of fiber-reinforced ultra-high performance concrete beams, *Engineering Structures*, 168, 119-127.
- Model code. (2010). *International Federation for Structural Concrete*, France.
- Naaman, A. E. (2002, October). Toughness, ductility, surface energy and deflection-hardening FRC composites, *Proceedings of the JCI international Workshop on Ductile Fiber Reinforced Cementitious Composites - Application and Evaluation* (pp. 33-57). Takayama, Japan.
- Naaman, A. E. (2007). High performance fiber reinforced cement composites classification and applications, *CBM–CI International Workshop* (pp. 389-400). Karachi, Pakistan.

- Naaman, A. E. and K. Wille (2012, September). The Path to Ultra-high performance fiber reinforced concrete (UHP-FRC): Five decades of progress, *3rd International Symposium on UHPC and Nanotechnology for Construction Materials*. Kassel, Germany.
- NFP 18-710. (2016). *National addition to Eurocode 2-Design of concrete structures: specific rules for Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete (UHPFRC)*, Saint-Denis.
- Nseir, J., Moreillon, L. And Suter, R. (2013, October). Flexural and shear behaviour of structural elements in UHPFRC, *RILEM-fib-AFGC International Symposium on Ultra High Performance Fibre Reinforced Concrete*, Marseille, France.
- Park, R. (1988, August). State-of-the Art Report: Ductility evaluation from laboratory and analytical testing., *Proceedings of 9th World Conference on Earthquake Engineering*, Tokyo, Japan.
- Park, S. H., Kim, D. J., Ryu, G. S. and Koh, K. T. (2012). Tensile behavior of Ultra high performance hybrid fiber reinforced concrete. *Cement & Concrete Composites*, 34, 172-184.
- Rigaud, S., Chanvillard, G., and Chen, J. (2011). Characterization of bending and tensile behaviors of ultra-high performance concrete containing glass fibers, *Proceedings of High Performance Fiber Reinforced Cement Composites 6* (pp. 359-366). Ann Arbor.
- Qi, J., Wang, J. and Ma, Z. J. (2018). Flexural response of high-strength steel-ultra-highperformance fiber reinforced concrete beams based on a mesoscale constitutive model: Experiment and theory, *Structural Concrete*, 19 (3), 719–734.
- Qian, S., and Li, V. C., (2008). Simplified inverse method for determining the tensile properties of SHCCs, *Journal of Advanced Concrete Technology*, 6 (2), 353-363.
- Resplendino, J. and Petitjean, J. (2003, October). Ultra-high-performance concrete: First recommendations and examples of application, *Proceedings of the 3rd International Symposium on High Performance Concrete/PCI National Bridge Conference* (pp. 77). Orlando.
- Richard, P. and Cheyrezy, M. (1995). Composition of reactive powder concretes, *Cement and Concrete Research*, 25 (7), 1501–1511.
- Russell, H. G. and Graybeal, B. A. (2013). *Ultra-high performance concrete: A State-of-the-Art report for the bridge community* (Report No: FHWA-HRT-13-060). Virginia: U.S. Department of Transportation.

- Rossi, P., Arca, A., Parant, E. and Fakhri, P. (2005). Bending and compressive behaviors of a new cement composite, *Cement and Concrete Research*, 35 (1), 27–33.
- SFIT (Swiss Federal Institute of Technology). (2016). *Ultra-high performance fibre reinforced cement-based composites (UHPFRC): Construction material, dimensioning and application*, Switzerland.
- Singh, M., Sheikh, A., Ali, M. S., Visintin, P. and Griffith, M. (2017). Experimental and numerical study of the flexural behaviour of ultra-high performance fibre reinforced concrete beams. *Construction and Building Materials*, 138, 12-25.
- Stürwald, S. and Fehling, E. (2012, March). Design of reinforced UHPFRC in flexure, *3rd International Symposium on UHPC and Nanotechnology for High Performance Construction Materials* (403-410), Kassel, Germany.
- Tanaka, Y., Maekawa, K., Kameyama, Y., Ohtake, A., Musha, H. and Watanabe, N. (2011). The innovation and application of UHPC bridges in Japan. Toutlemonde, F. and Resplendio, J. (Ed.), *Designing and Building with UHPFRC: State of the Art Development* (pp. 149-187). London, England.
- Tanarlan, H. M. (2017a). Flexural strengthening of RC beams with prefabricated Ultra High Performance Fibre Reinforced Concrete Laminates, *Engineering Structures*, 151, 337-348.
- Tanarlan, H. M., Alver, N., Jahangiri, R., Yalçınkaya, Ç and Yazıcı, H. (2017b). Flexural strengthening of RC beams using UHPFRC laminates: Bonding techniques and rebar addition, *Construction and Building Materials*, 155, 45-55.
- Taşdemir, M. A. ve Bayramov, F. (2002). Yüksek performanslı çimento kompozitlerinin mekanik davranışı, *itüdergisi/d*, 1 (2), 125-144.
- Taşdemir, M. A., Arslan, G., Taftan, K. S. ve Haberveren, S. (2007, Aralık). Yüksek performanslı çimento esaslı kompozitlerin tasarımı, mekanik davranışı ve uygulama alanları, *7. Ulusal Beton Kongresi* (s. 199-214). İstanbul, Türkiye.
- TS 500. (2000). *Betonarme yapıların tasarım ve yapım kuralları*, Ankara.
- Türker, K., Birol, T., Yavaş, A., Hasgöl, U. ve Yazıcı, H. (2019a). Ultra yüksek performanslı lifli beton ile üretilmiş betonarme kirişlerin eğilme davranışı, *Teknik Dergi*, 8777-8801.
- Turker, K., Hasgul, U., Birol, T., Yavas, A. and Yazici, H. (2019b). Hybrid fiber use on flexural behavior of ultra high performance fiber reinforced concrete beams, *Composite Structures*, 229, 111400.

- Türker, K., Birol, T., Yavaş, A. ve Hasgül, U. (2016). Ultra yüksek performanslı lifli beton içeren kirişlerde etkin çelik lif tipi incelemesi, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 16, 776-785.
- Voo, Y. L., Poon, W. K. and Foster S. J. (2010). Shear strength of steel fiber-reinforced Ultra High Performance Concrete beams without stirrups, *Journal of Structural Engineering*, 136, 1393-1400.
- Voo, L.Y. (2006). Shear Strength of 160 Mpa steel fiber reinforced reactive powder concrete bridge girders without stirrups, *Journal of The Institution of Engineers*, 67 (2), 41-46.
- Wang, C., Yang, C., Liu, F., Wan, C. and Pu, X. (2012). Preparation of ultra-high performance concrete with common technology and materials, *Cement and Concrete Composites*, 34, 538-544.
- Wille, K. And Naaman, A. E. (2010). Fracture energy of UHPFRC under direct tensile loading. Oh, B. H., et al. (Ed.), *Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures- Recent Advances in Fracture Mechanics of Concrete*, Seoul, Korea.
- Wille, K., Naaman, A. E. and Parra-Montesinos, G. J. (2011). Ultra-high performance concrete with compressive strength exceeding 150 MPa (22 ksi): a simpler way, *ACI Materials Journal*, 108 (1), 46-54.
- Wille, K., Naaman, A. E., El-Tawil, S. and Parra-Montesinos, G. J. (2012). Ultra-high performance concrete and fiber reinforced concrete: achieving strength and ductility without heat curing, *Materials and Structures*, 45, 309-324.
- Yang, I. H., Joh, C. and Kim. B. S. (2012). Shear behaviour of ultra-high performance fibre-reinforced concrete beams without stirrups, *Magazine of Concrete Research*, 64 (11), 979-993.
- Yang, I. H., Joh, C. and Kim, B.-S. (2010). Structural behavior of Ultra High Performance Concrete beams subjected to bending, *Engineering Structures*, 32 (11), 3478-3487.
- Yavaş, A., Hasgul, U., Turker, K. And Birol, T. (2019). Effective fiber type investigation on the shear behavior of ultra high-performance fiber-reinforced concrete beams, *Advances in Structural Engineering*, 22 (7), 1591-1605.
- Yazıcı, H., Yardımcı, M. Y., Aydın, S. and Karabulut, A. S. (2009). Mechanical properties of reactive powder concrete containing mineral admixtures under different curing regimes, *Construction and Building Materials*, 23,1223-31.
- Yoo, D. Y., Banthia, N. and Yoon, Y. S. (2017). Experimental and numerical study on flexural behavior of UHPFRC beams with low reinforcement ratios, *Canadian Journal of Civil Engineering*, 44 (1), 18-28.

- Yoo, D. Y., Banthia, N. and Yoon, Y. S. (2016). Flexural behavior of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete beams reinforced with GFRP and steel rebars, *Engineering Structures*, 111, 246-262.
- Yoo, D. Y. and Yoon, Y. S. (2015). Structural performance of ultra-high-performance concrete beams with different steel fibers, *Engineering Structures*, 102, 409-423.
- Yoo, D. Y., Shin, H. O., Yang, J. M. and Yoon, Y. S. (2014). Material and bond properties of ultra high performance fiber reinforced concrete with micro steel fibers. *Composites: Part B*, 58, 122-133.
- Zagon, R., Matthys, S. and Kiss, Z. (2016). Shear behaviour of SFR-UHPC I-shaped beams, *Construction and Building Materials*, 124, 258-268.

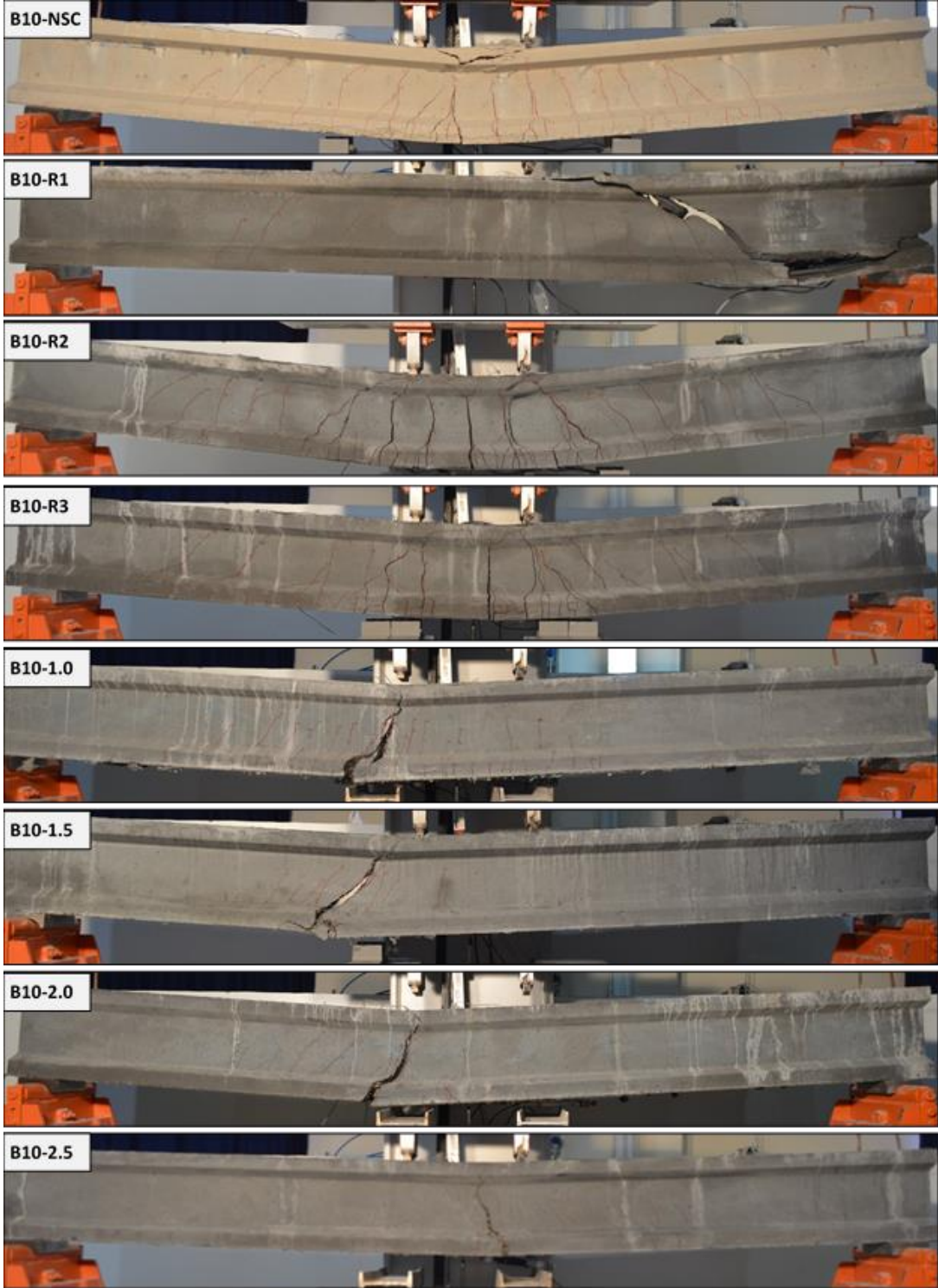


# **EKLER**

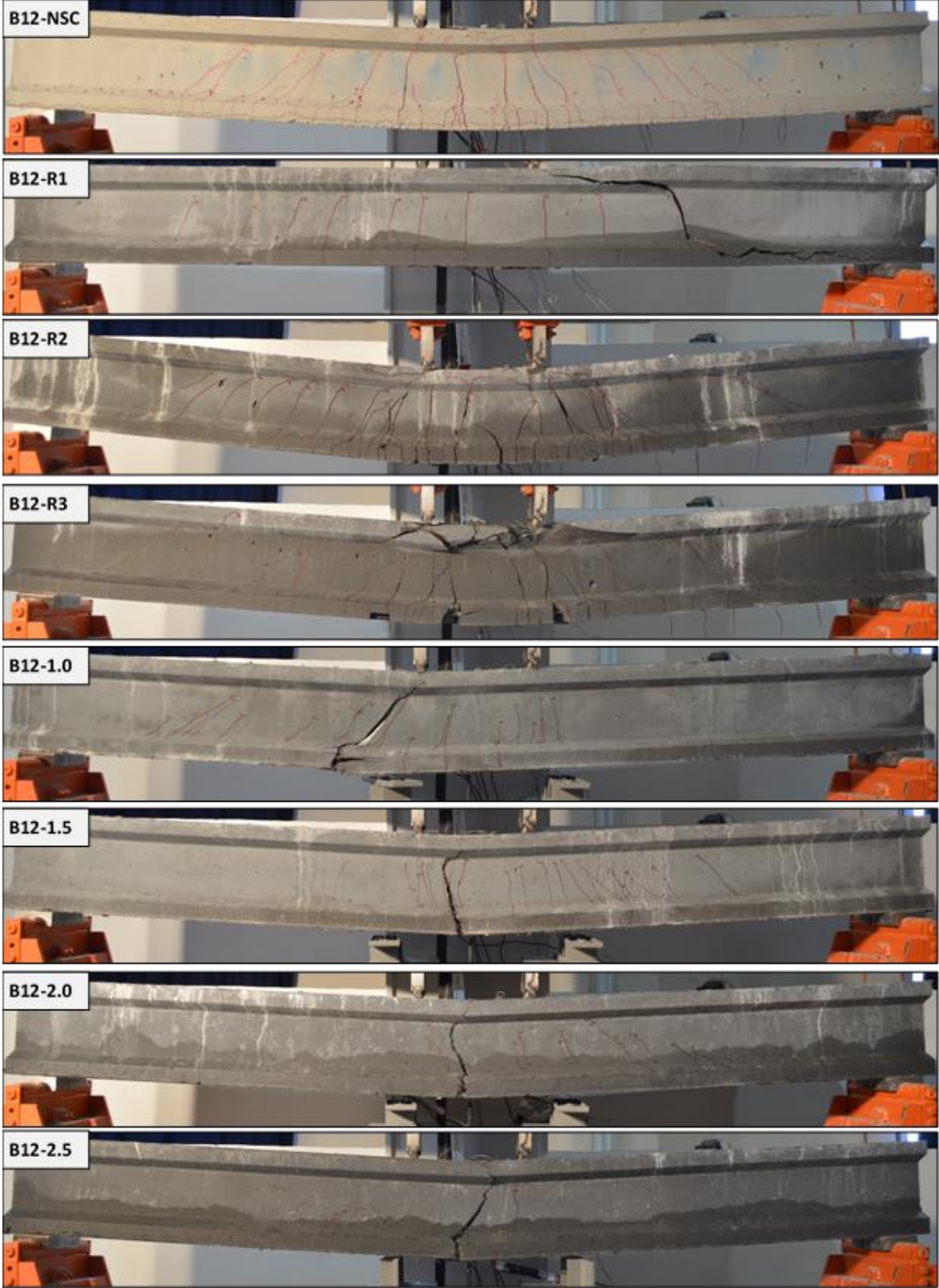
## EKLER

### EK A: Deney Sonuçları

Bu bölümde, Bölüm 2’de testleri yapılan kirişlerin  $L/500$ ,  $L/100$  deplaslanlarında ve kırılma sonrasında alınan resimler ve test boyunca donatı ve beton üzerine yerleştirilen şekildeğiştirme ölçerlerden elde edilen değerler ayrıntılı olarak sunulmuştur.

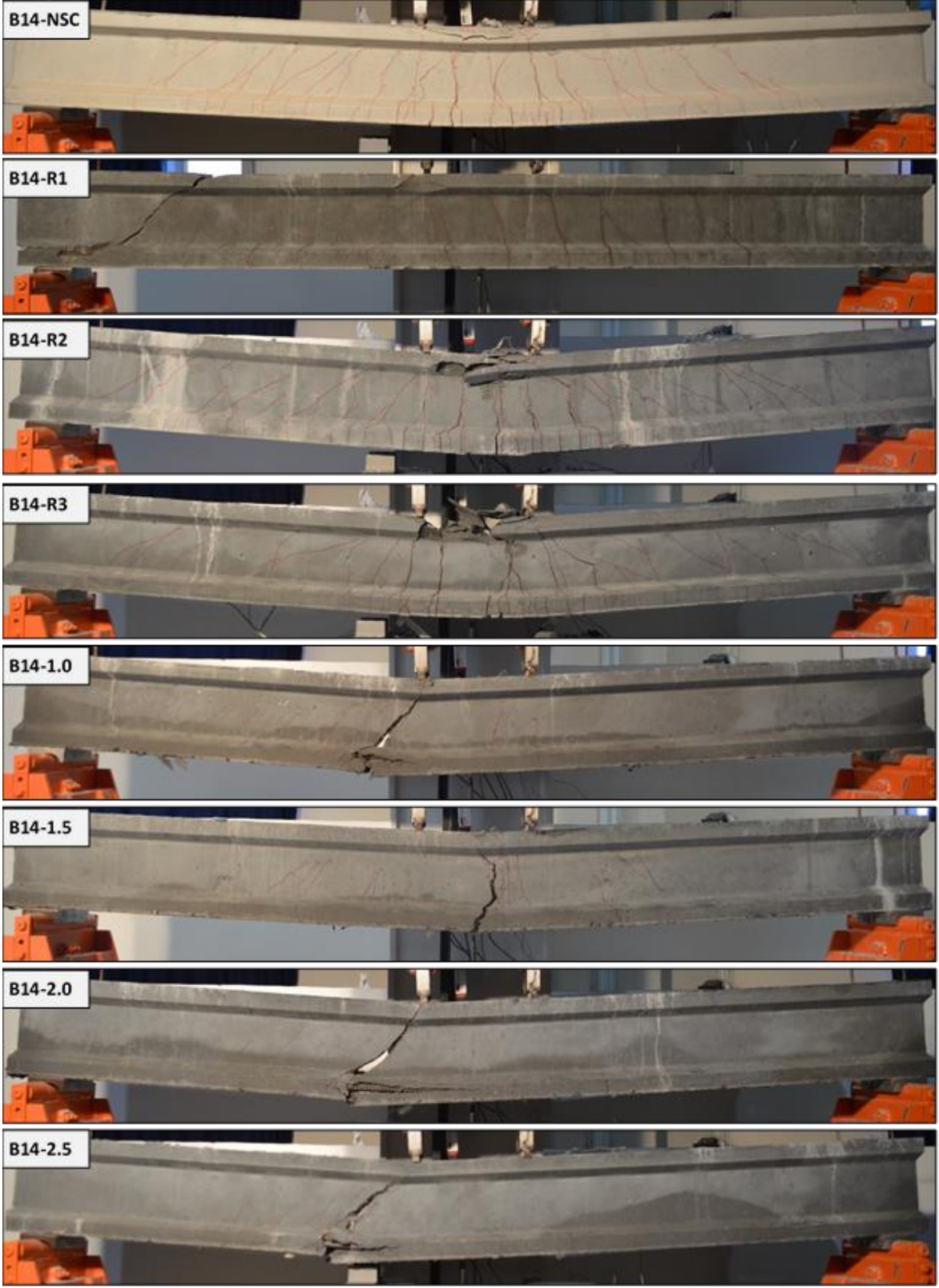


Şekil A.1: G1 Grubu kirişlerine ait kırılma şekilleri.

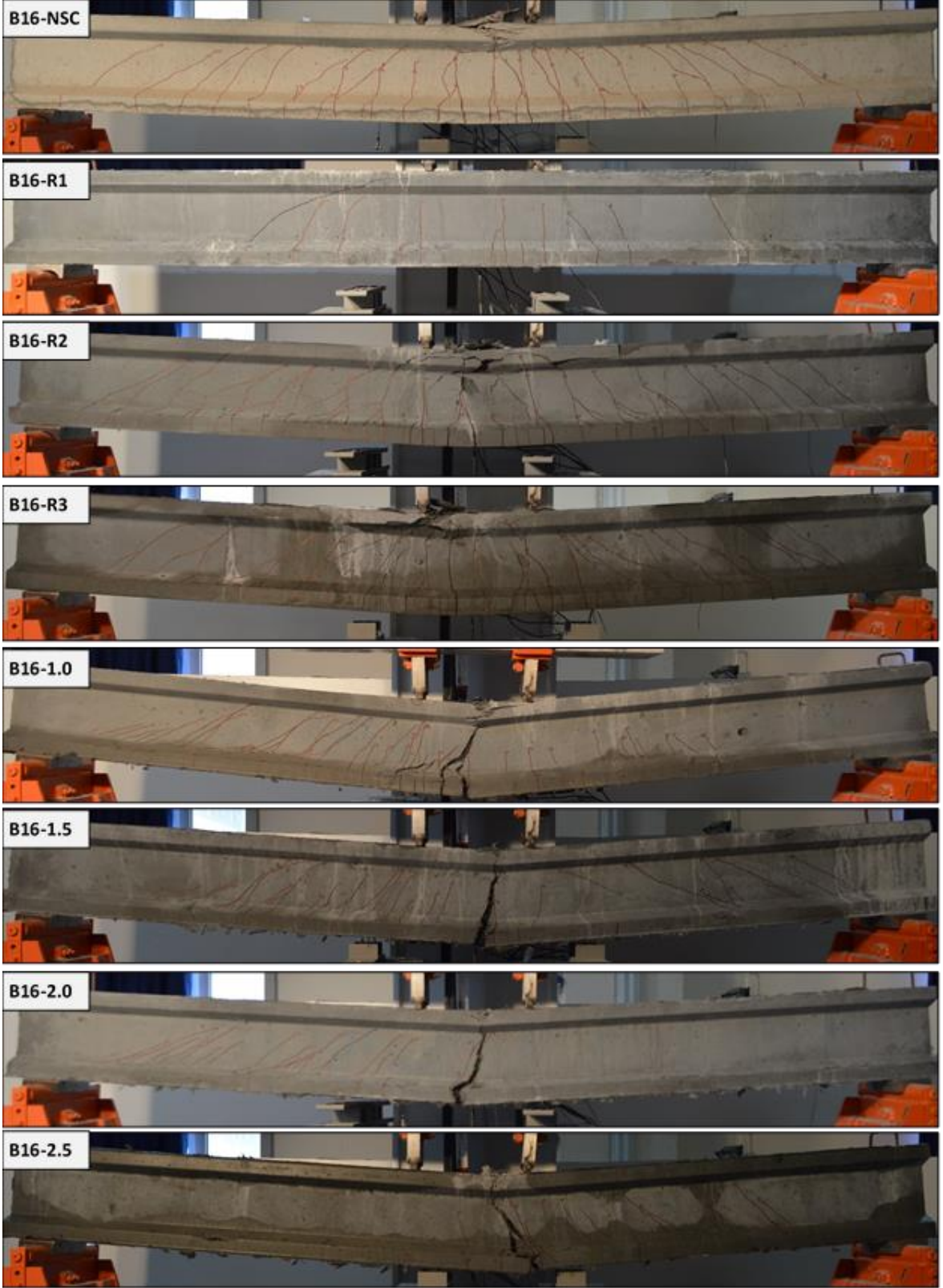


Şekil A.2: G2 Grubu kirişlerine ait kırılma şekilleri.



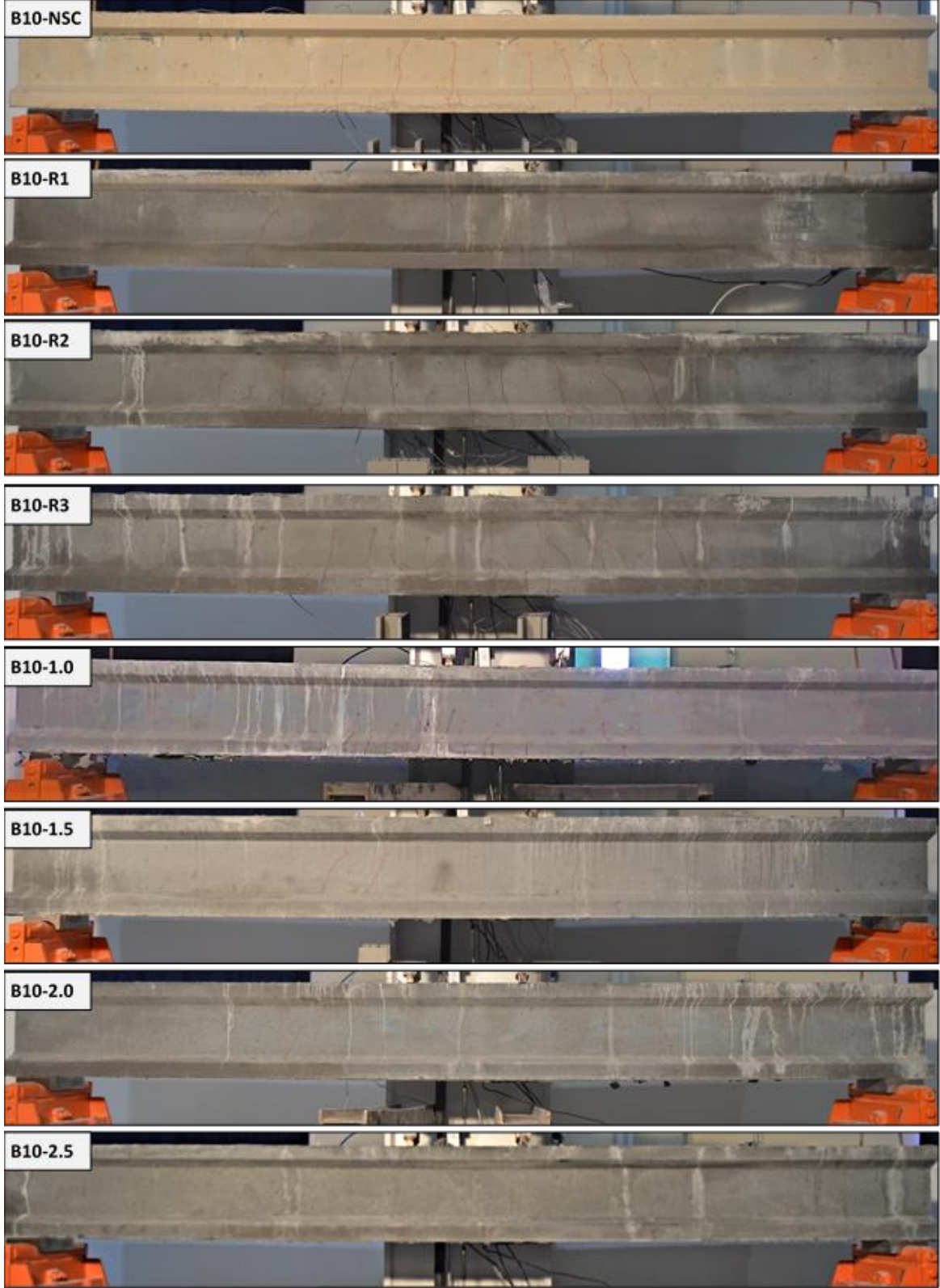


Şekil A.3: G3 Grubu kirişlerine ait kırılma şekilleri.

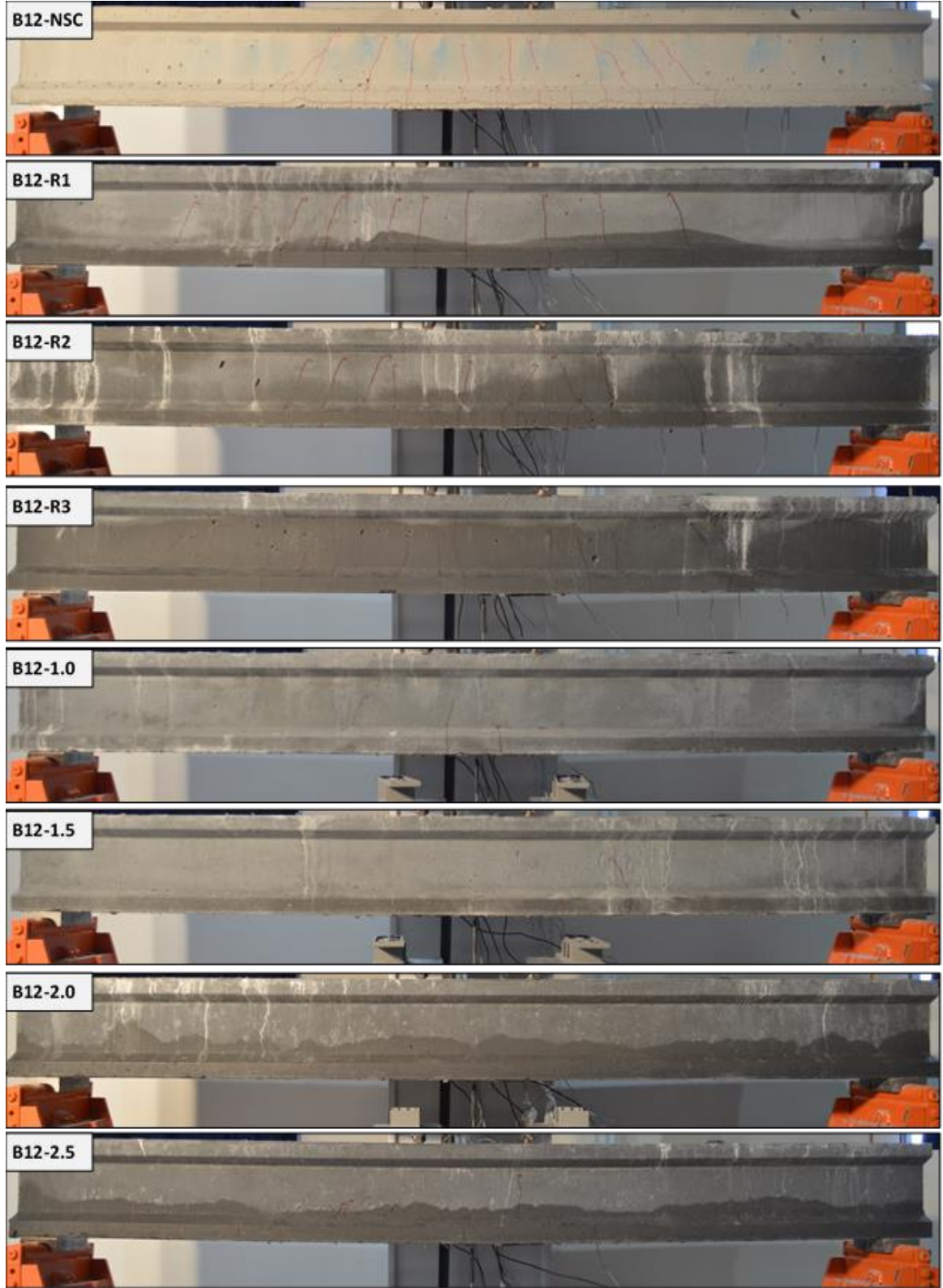


Şekil A.4: G4 Grubu kirişlerine ait kırılma şekilleri.



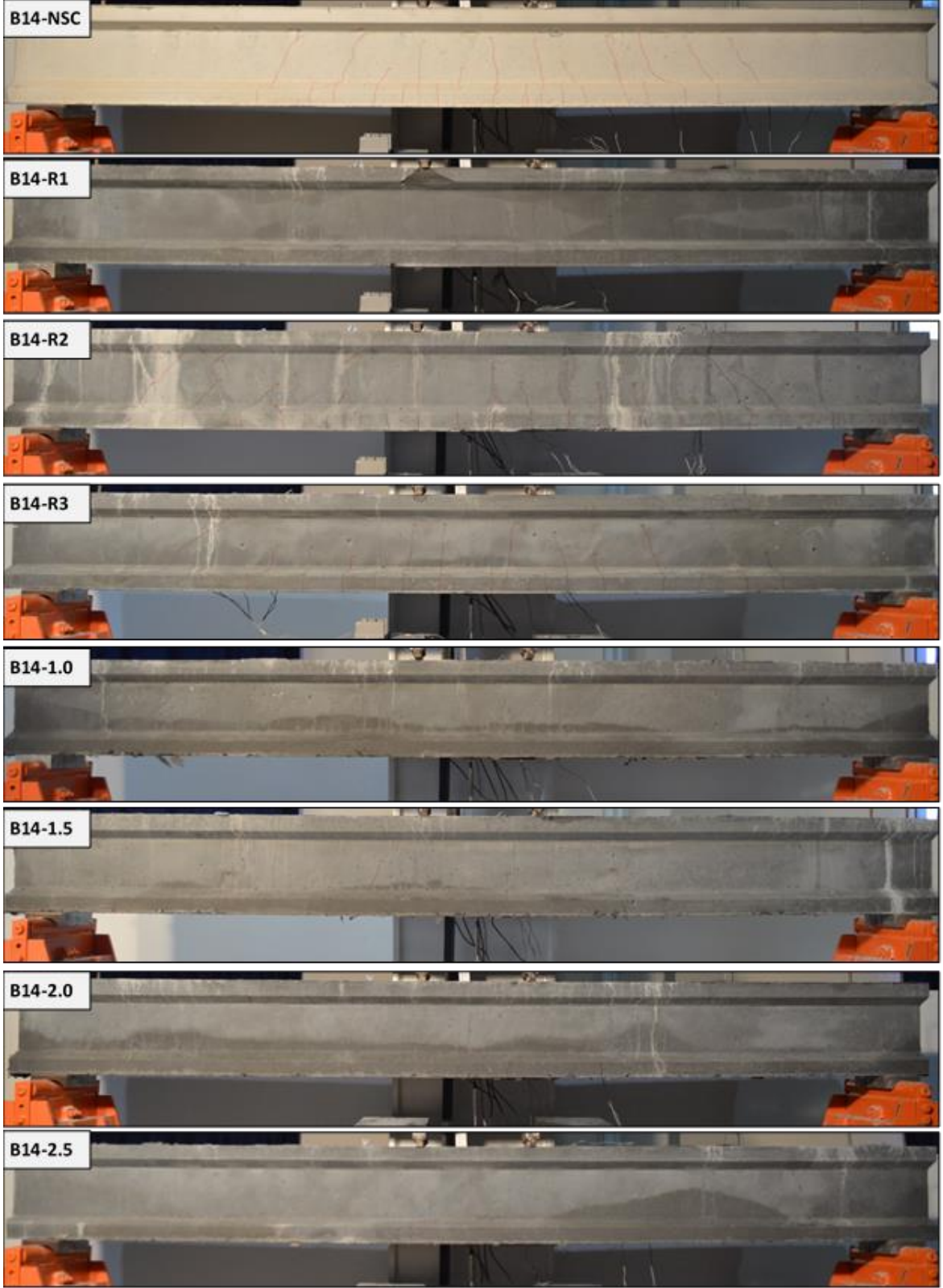


Şekil A.5: G1 Grubu kirişlerinin  $L/500$  deplasmanındaki çatlak dağılımları.



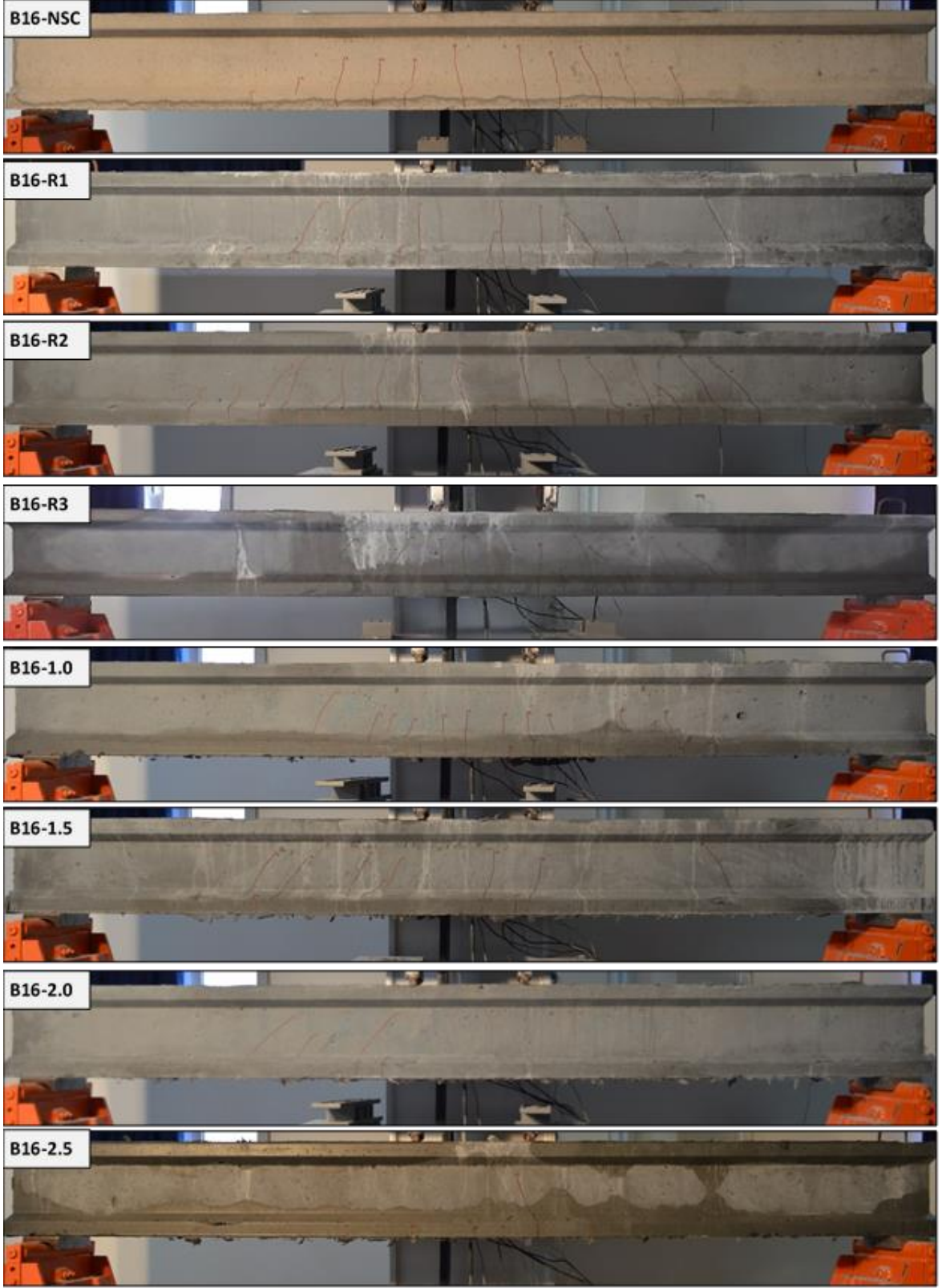
**Şekil A.6:** G2 Grubu kirişlerin  $L/500$  deplasmanındaki çatlak dağılımları.





**Şekil A.7:** G3 Grubu kirişlerin  $L/500$  deplasmanındaki çatlak dağılımları.

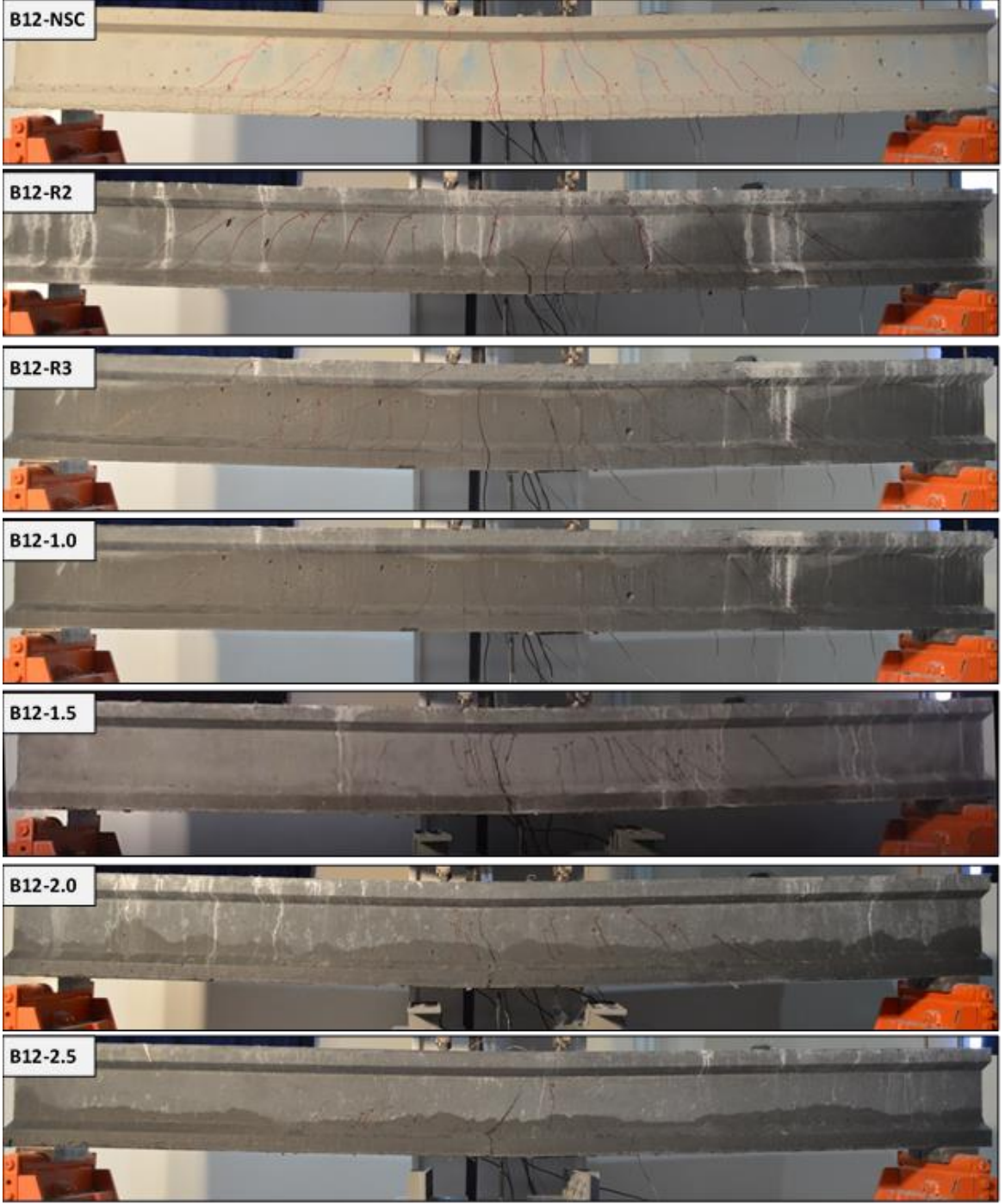




**Şekil A.8:** G4 Grubu kirişlerin L/500 deplasmanındaki çatlak dağılımları.

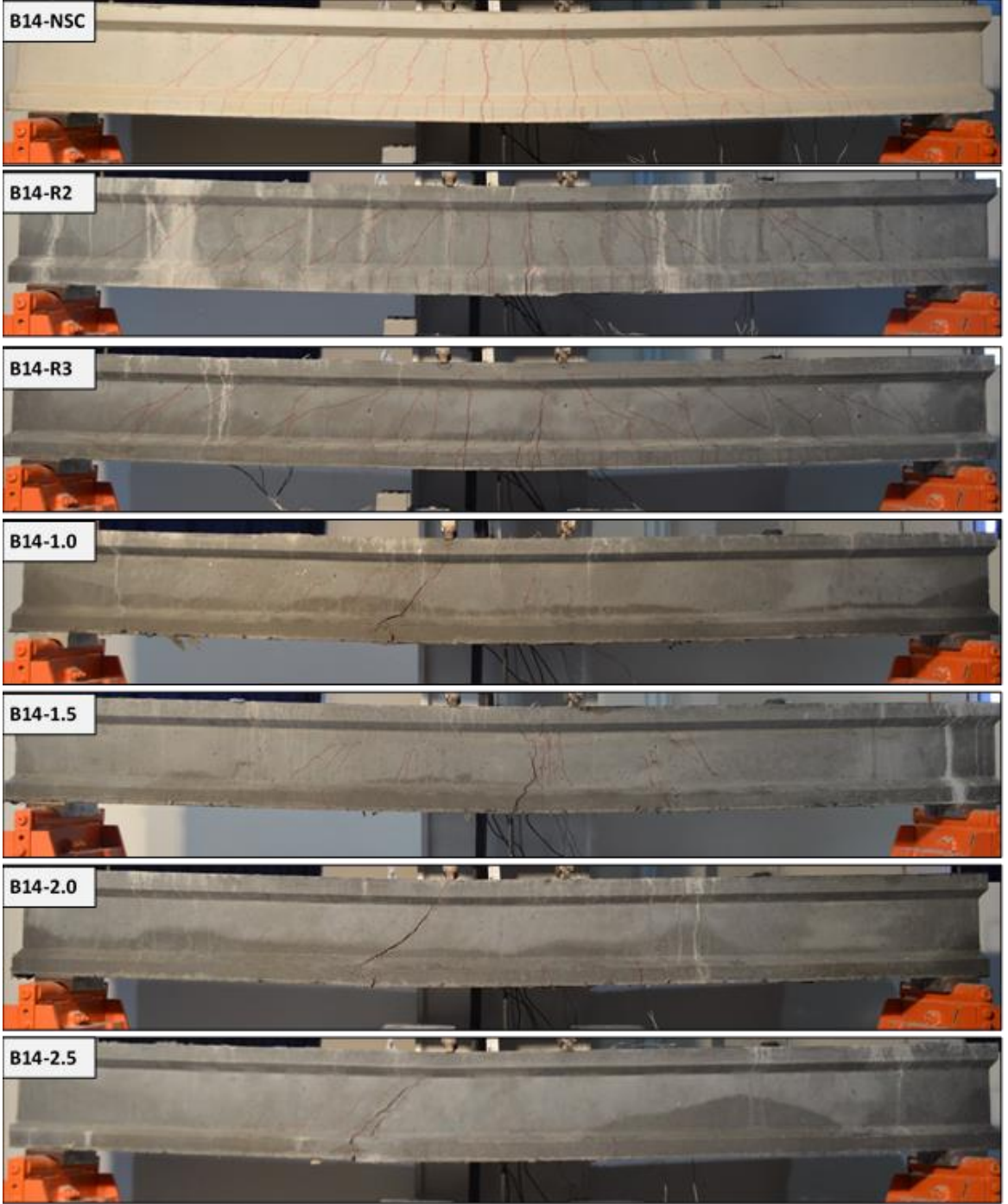


**Şekil A.9:** G1 Grubu kirişlerin  $L/100$  deplasmanındaki çatlak dağılımları.

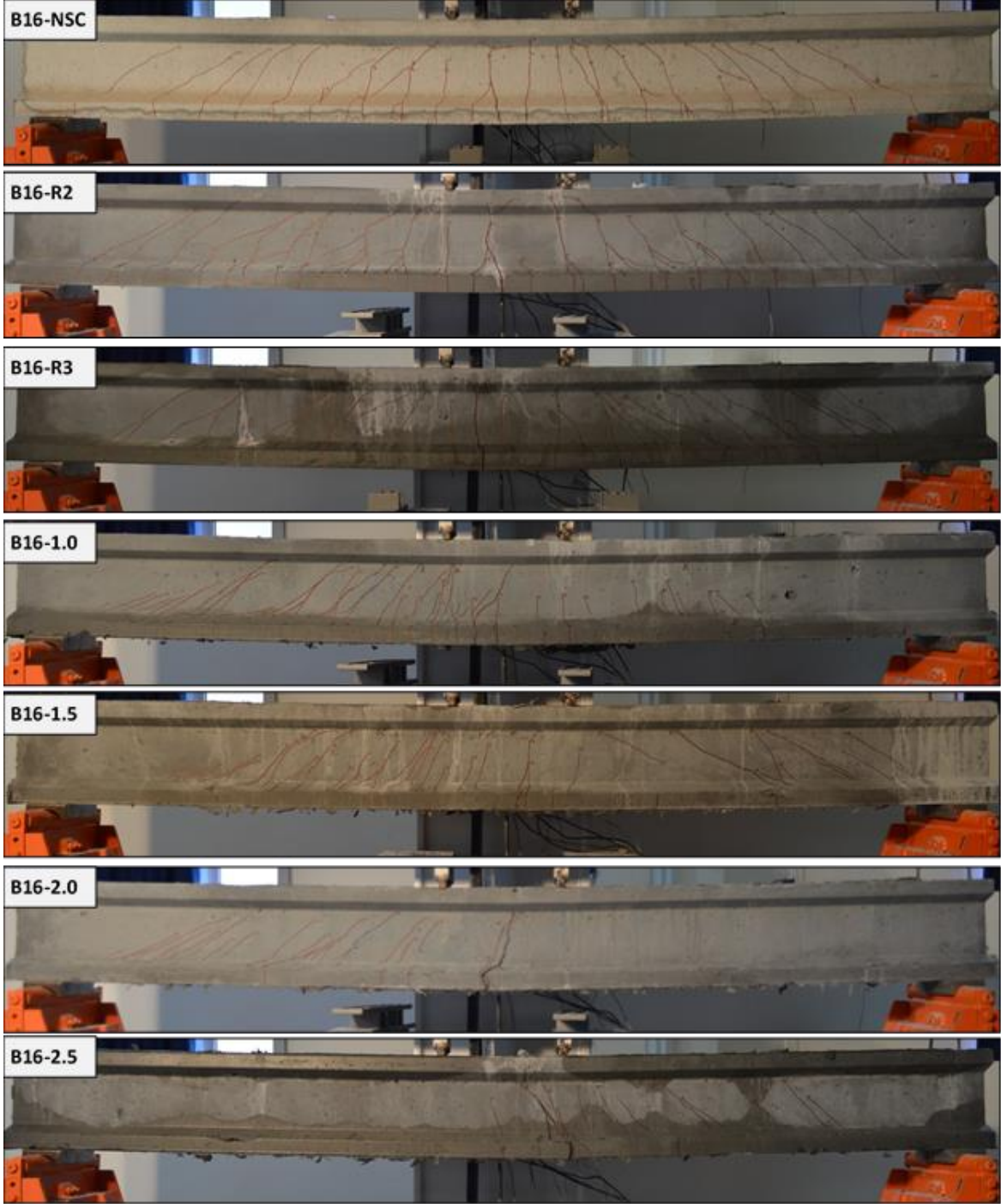


**Şekil A.10:** G2 Grubu kirişlerin L/100 deplasmanındaki çatlak dağılımları.

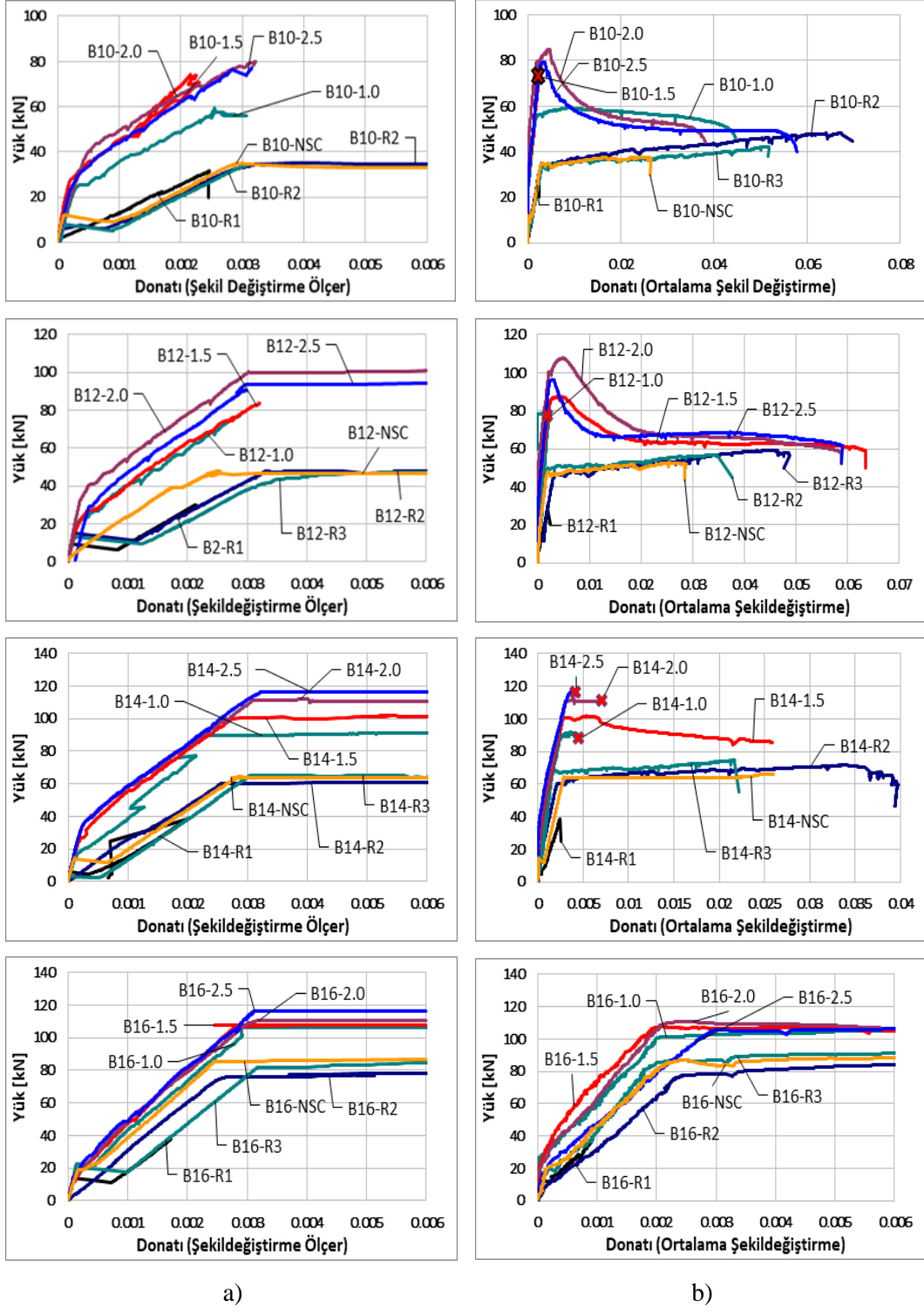




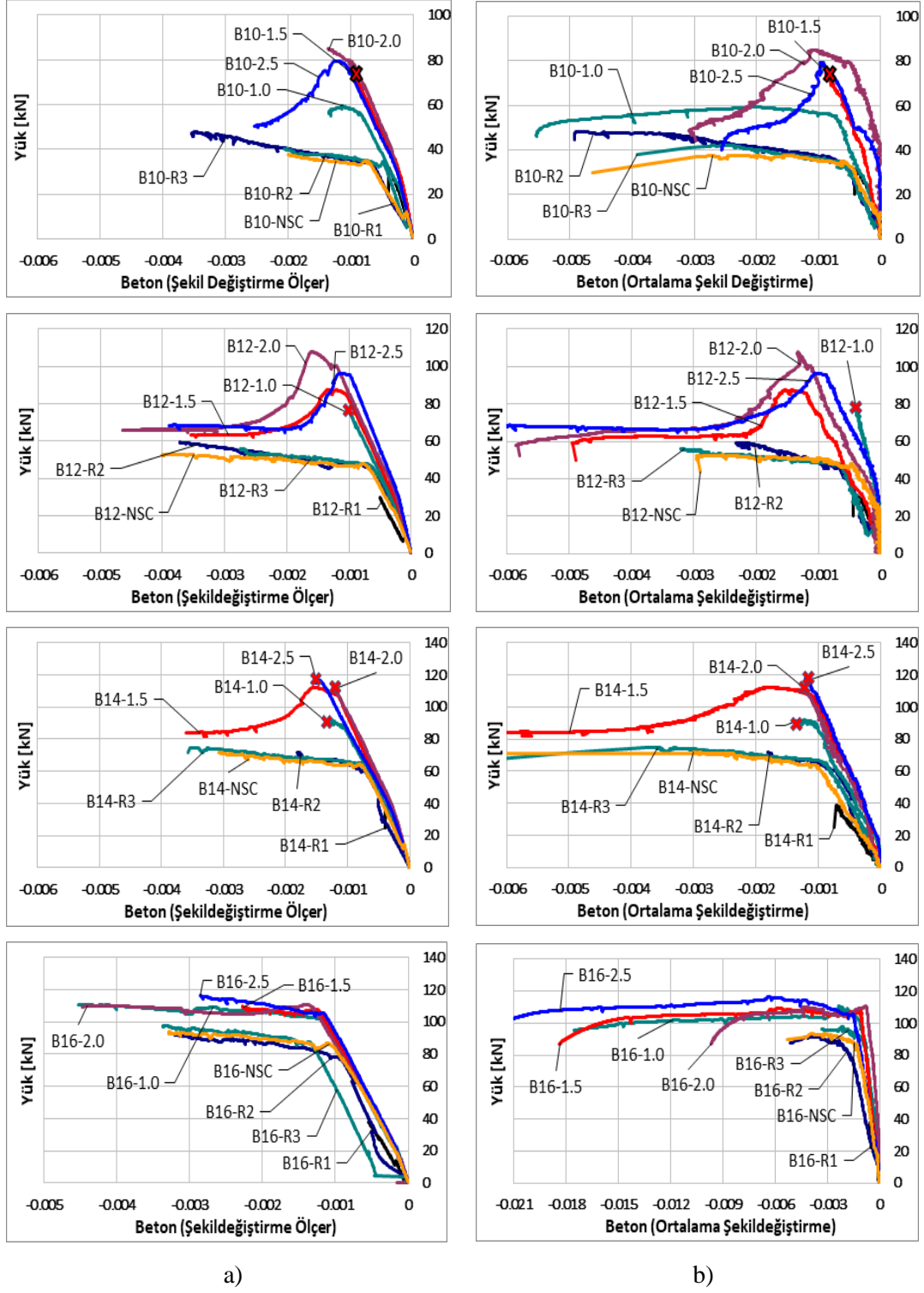
**Şekil A.11:** G3 Grubu kirişlerin L/100 deplasmanındaki çatlak dağılımları.



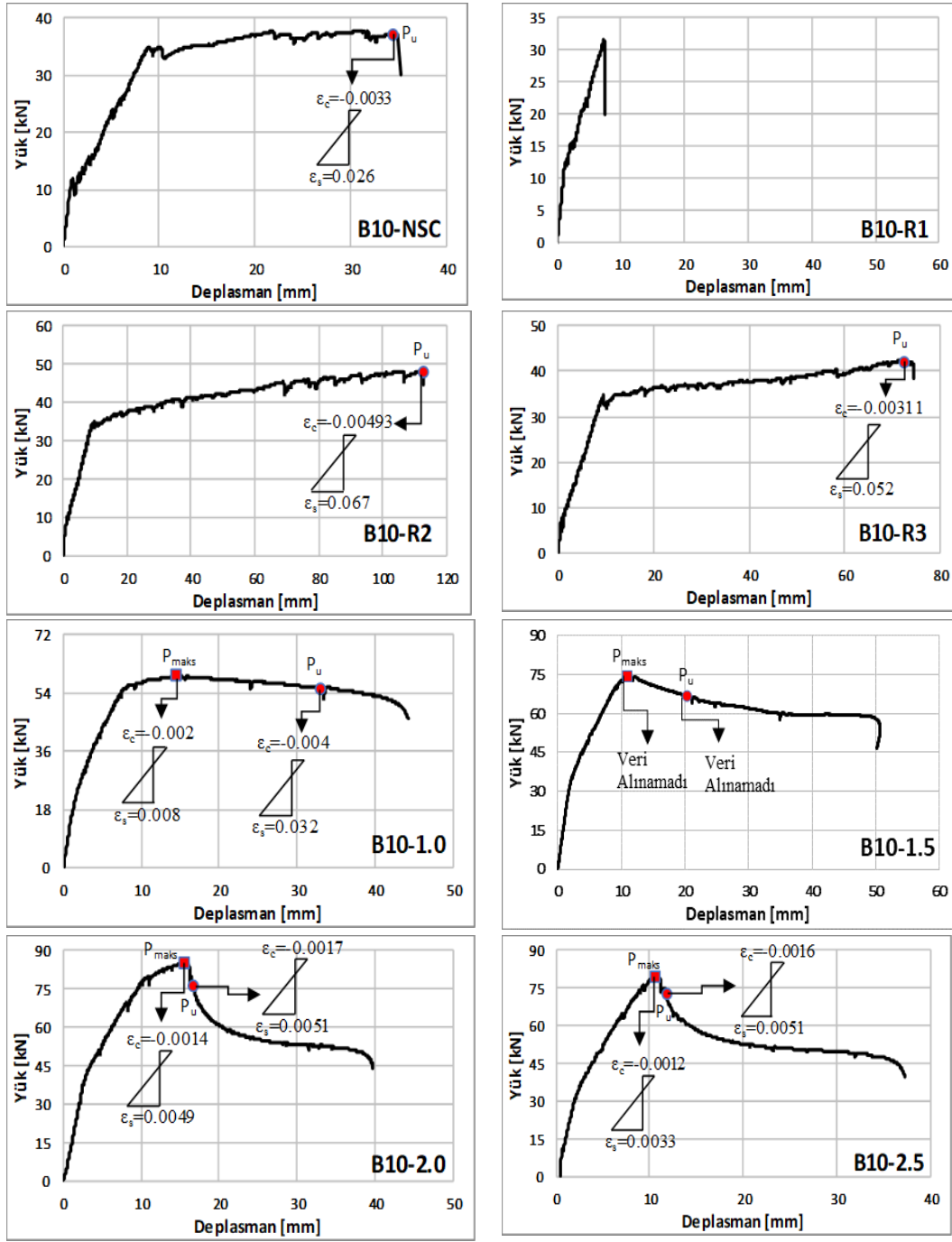
**Şekil A.12:** G4 Grubu kirişlerin  $L/100$  deplasmanındaki çatlak dağılımları.



Şekil A.13: Donatı şekildeğiştirme değerleri a) Şekildeğiştirme ölçerlerden elde edilen, b) Eğrilik ölçerlerden elde edilen.

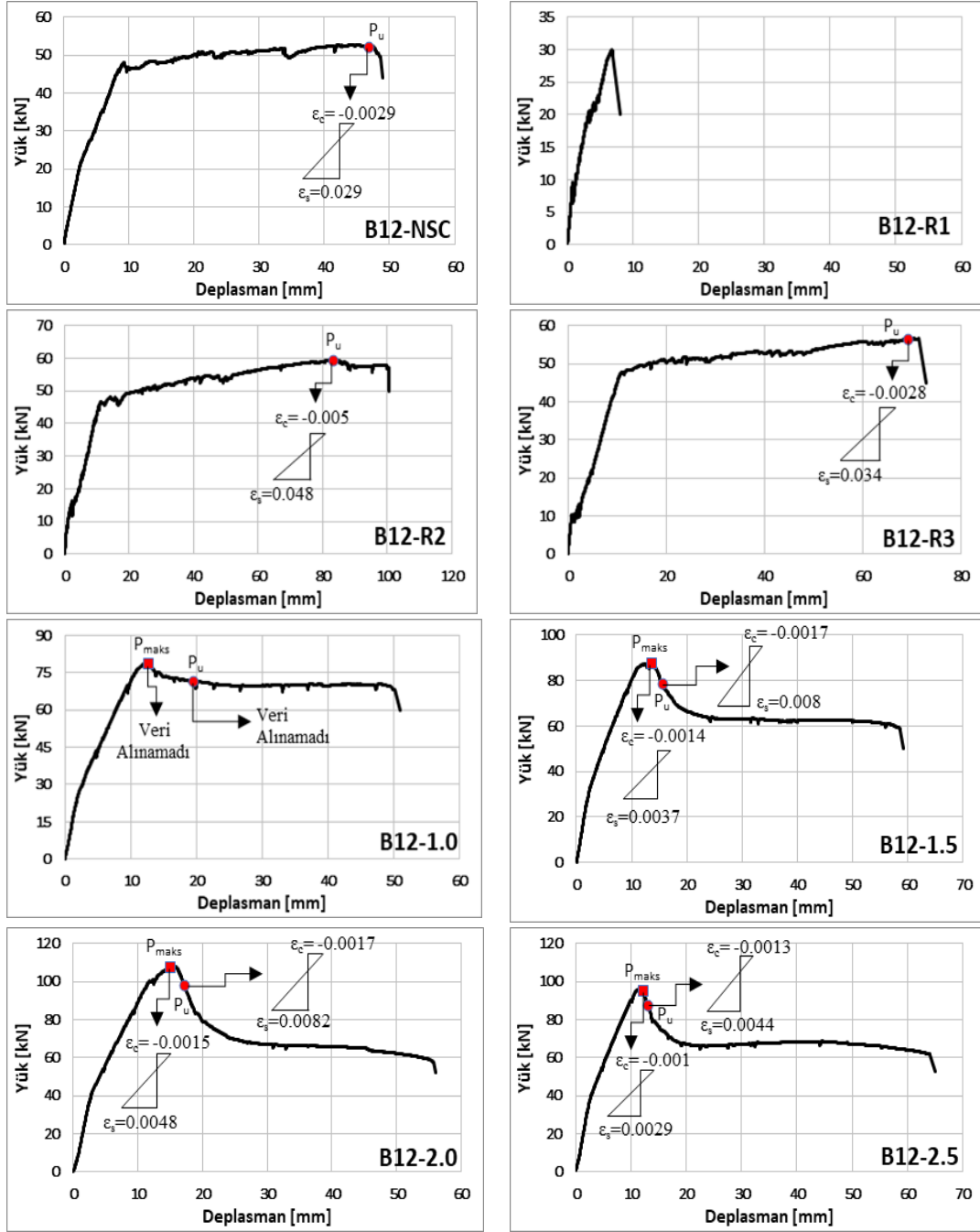


Şekil A.14: Beton şekilgeçirme değerleri a) Şekilgeçirme ölçerlerden elde edilen, b) Eğrilik ölçerlerden elde edilen.

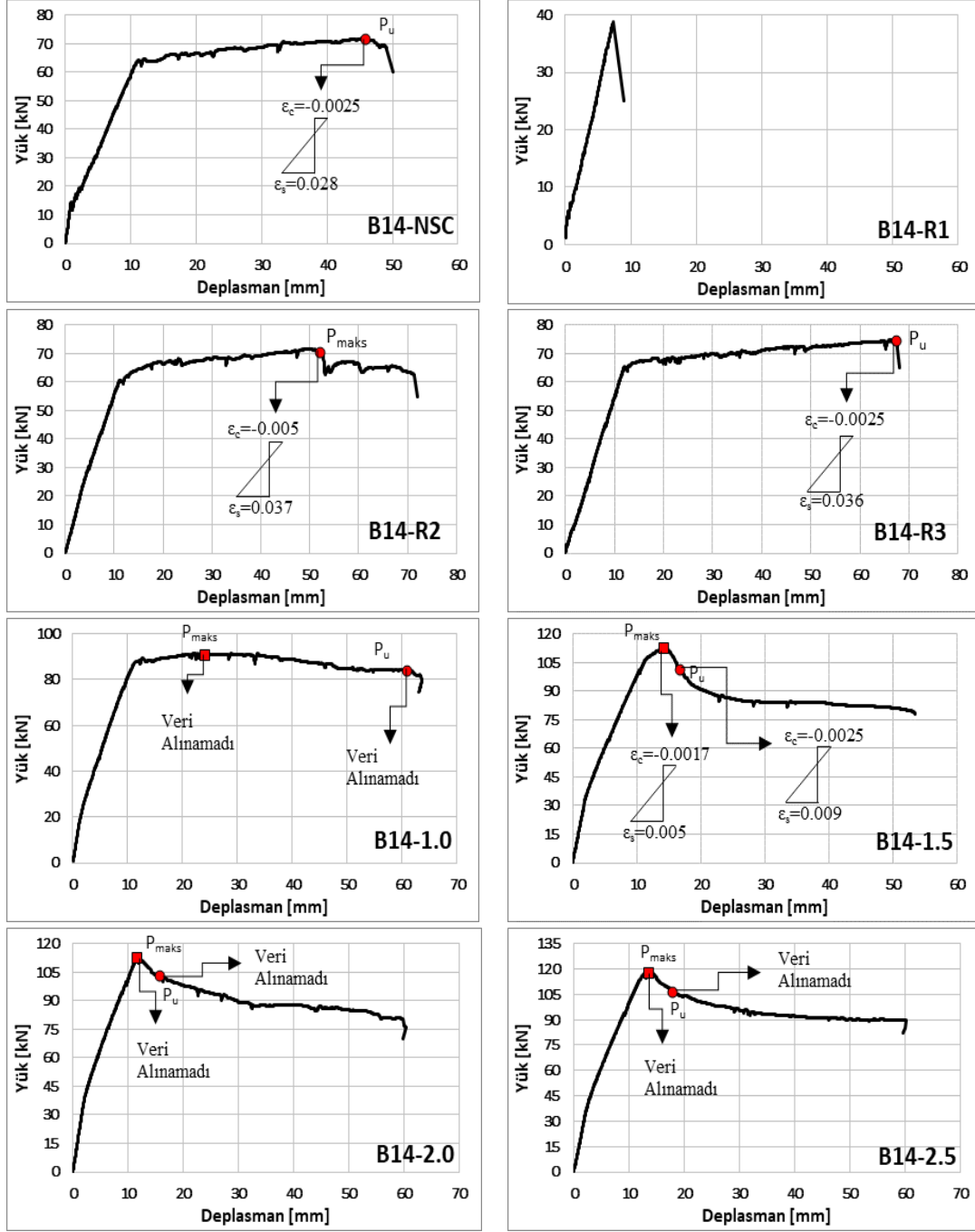


Şekil A.15: G1 Grubu kirişlerinin maksimum yüke ve maksimum deplasmana karşılık gelen kesit şekil değişimi durumları.

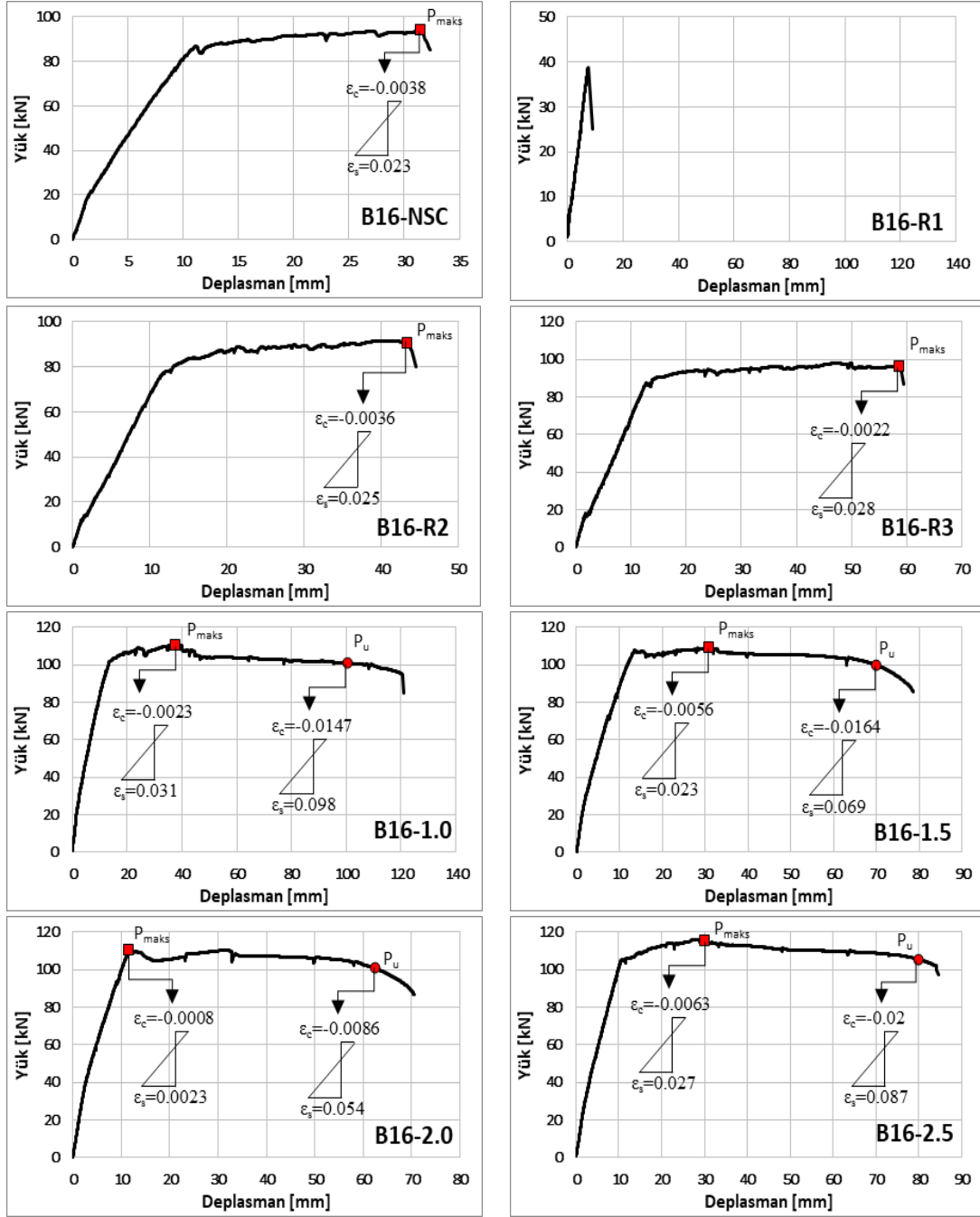




Şekil A.16: G2 Grubu kirişlerinin maksimum yüke ve maksimum deplasmana karşılık gelen kesit şekildeğiştirme durumları.



Şekil A.17: G3 Grubu kirişlerinin maksimum yüke ve maksimum deplasmana karşılık gelen kesit şekil değişimi durumları.



Şekil A.18: G4 Grubu kirişlerinin maksimum yüke ve maksimum deplasmana karşılık gelen kesit şekildeşirme durumları.



Yük-deplasman ilişkisinden, moment-eğrilik ilişkisinin belirlenmesi için kullanılan geri analiz yöntemine (GAY1) ait yazılım kodları aşağıda verilmiştir.

Sub gerianaliz1()

‘ GİRDİLER

‘ Değişkenlerin boyutlandırılması

Dim mom(), egr(), dep(), nokkor(), dondeg(), depdeg(), depdeg2() As Double

Dim b, h, a, basgir, blms, hasmik, noksay As Double

‘ Girdilerin Excel sayfasından alınması

‘ b: Kesit genişliği, h: Kesit yüksekliği, a: Yük ile mesnet arası mesafe, basgir: Eğrilik tahmininde kullanılan döngüdeki başlangıç değeri, blms: Eğrilik tahmini için iterasyon bölüm sayısı, hasmik; Kabul edilen hata miktarı.

b = Cells(3, 3)

h = Cells(4, 3)

a = Cells(5, 3)

basgir = Cells(6, 3) / (10 ^ 3)

blms = Cells(7, 3)

hasmik = Cells(8, 3)

‘ Toplam deplasman değerinin belirlenmesi

i = 2

Do

    i = i + 1

    If Cells(i, 5) = "" Then Exit Do

Loop

noksay = i - 4

‘ Nokta sayısına göre dizilerin boyutlandırılması

ReDim dep(0 To noksay)

ReDim mom(0 To noksay)

ReDim egr(0 To noksay)

ReDim nokkor(0 To noksay + 10)

ReDim dondeg(0 To noksay + 10)

ReDim depdeg(0 To noksay + 10)

ReDim depdeg2(0 To blms, 1 To 2)

‘ Moment eğrilik ilişkisinin yazdırılacağı bölgenin temizlenmesi

i = 2

Do

    i = i + 1

    If Cells(i, 10) = "" Then Exit Do

Loop

tmz = i - 1

Range(Cells(4, 10), Cells(tmz + 5, 11)).Clear

‘ **Deplasman ve moment değerlerinin dizilere aktarılması**

```
For i = 0 To noksay  
    dep(i) = Cells(i + 3, 5)  
    mom(i) = Cells(i + 3, 6) * (10 ^ 6) / 20  
Next i
```

‘ **ALGORİTMANIN BAŞLANGICI**

```
egr(0) = 0  
For n = 1 To noksay  
    cbas = 0  
    cson = basgir  
    For j = 1 To 51  
        For t = 0 To blms  
            egr(n) = (cbas + t / blms * (cson - cbas)) * -1  
  
            For g = 1 To n  
                nokkor(g) = mom(g) / mom(n) * a  
            Next g  
            k = 1  
            dondeg(1) = egr(n) * a / 2 * -1  
            depdeg(1) = dep(n) - dondeg(1) * a / 4  
            For g = n To 1 Step -1  
                k = k + 1  
                x = nokkor(g) - nokkor(g - 1)  
                n2 = egr(g - 1)  
                m = (egr(g) - egr(g - 1)) / x  
                p = dondeg(k - 1) - (m * (x ^ 2) / 2) - (n2 * x)  
                b2 = depdeg(k - 1) - (m * (x ^ 3) / 6) - (n2 * (x ^ 2) /  
_2) - (p * x)  
  
                dondeg(k) = p  
                depdeg(k) = b2  
            Next g  
            depdeg2(t, 1) = depdeg(k)  
            depdeg2(t, 2) = egr(n)  
        Next t  
  
        For t = 0 To blms  
            If Abs(depdeg2(t, 1)) <> depdeg2(t, 1) Then  
                kck = t  
                Exit For  
            End If  
        Next t  
  
        If Abs(depdeg2(kck, 1)) < hasmik Then  
            egr(n) = depdeg2(kck, 2)  
            Exit For  
        End If
```

```

If kck <> 0 Then
    If Abs(depdeg2(kck - 1, 1)) < hasmik Then
        egr(n) = depdeg2(kck - 1, 2)
        Exit For
    End If
End If

cbas = depdeg2(kck - 1, 2) * -1
cson = depdeg2(kck, 2) * -1

If j = 51 Then
    answer = MsgBox(n & ".adımda hata bulundu!,Devam
_edilsin mi?", vbYesNoCancel)
    If answer = vbYes Then
        Else
            Exit Sub
        End If
    End If
Next j
ssds = depdeg2(kck, 2)
ssds2 = depdeg2(kck - 1, 2)
‘ Elde edilen eğrilik ve moment ilişkisinin yazdırılması
Cells(n + 3, 10) = egr(n) * (10 ^ 3) * -1
Cells(n + 3, 11) = mom(n) / (10 ^ 6)
Next n

End Sub

```

Moment-eğrilik ilişkisinden, gerilme-birim uzama ilişkisinin belirlenmesi için kullanılan geri analiz yöntemine (GAY2) ait yazılım kodları aşağıda verilmiştir.

```
Sub gerianaliz2()
```

```
‘ GİRDİLER
```

```
‘ Değişkenlerin boyutlandırılması
```

```
Dim mom2(), epsm(), bet2(), eps(), sigm(), bet(), egr2(), dep(), sign1(), sign2(),  
_nokkor(), dondeg(), fark() As Double
```

```
‘ Girdilerin Excel sayfasından alınması
```

```
‘ b: Kesit genişliği, h: Kesit yüksekliği, a: Yük ile mesnet arası mesafe, blmsy: Tarafsız  
eksenin bulunması için iterasyon bölüm sayısı, hasmik2; Kabul edilen hata miktarı, ert;  
Bulunan gerilmelerin ortalamasının alınıp alınmayacağını belirten değişken.
```

```
b = Cells(3, 3)
```

```
h = Cells(4, 3)
```

```
a = Cells(5, 3)
```

```
blmsy = Cells(9, 3)
```

```
hasmik2 = Cells(10, 3)
```

```
ert = Cells(11, 3)
```

```
‘ Nokta sayısının belirlenmesi
```

```
i = 2
```

```
Do
```

```
    i = i + 1
```

```
    If Cells(i, 10) = "" Then Exit Do
```

```
Loop
```

```
noksay = i - 4
```

```
‘ Dizilerin nokta sayısına göre tekrardan boyutlandırılması
```

```
ReDim mom2(0 To noksay)
```

```
ReDim eps(0 To noksay)
```

```
ReDim sigm(0 To noksay)
```

```
ReDim bet(0 To noksay)
```

```
ReDim bet2(0 To blmsy)
```

```
ReDim egr2(0 To noksay)
```

```
ReDim nokkor(0 To noksay + 10)
```

```
ReDim dondeg(0 To noksay + 10)
```

```
ReDim sign1(0 To blmsy)
```

```
ReDim sign2(0 To blmsy)
```

```
ReDim fark(0 To blmsy, 1 To 5)
```

```
‘Gerilme ve birim uzamanın yazılacağı bölgenin temizlenmesi
```

```
i = 1
```

```
Do
```

```
    i = i + 1
```



```

    If Cells(i, 13) = "" Then Exit Do
Loop
tmz = i - 1
Range(Cells(4, 13), Cells(tmz + 5, 16)).Clear

```

‘Eğrilik ve moment değerlerinin dizilere aktarılması

```

For i = 0 To noksay
    egr2(i) = Cells(i + 3, 10) / (10 ^ 3)
    mom2(i) = Cells(i + 3, 11) * (10 ^ 6)
Next i

```

‘Elastik noktaya ait değerlerin (mukavemet momenti, atalet momenti, elastik gerilme, elastisite modülü) belirlenmesi

```

mukmom2 = b * (h ^ 2) / 6
atlt = b * (h ^ 3) / 12
fctkel = mom2(1) / mukmom2
elsm = mom2(1) / (egr2(1) * atlt)

```

```

eps(0) = 0
sigm(0) = 0
bet(0) = 0
cort = 0.5

```

‘ ALGORİTMANIN BAŞLANGICI

```

For t = 1 To noksay
    cbas = cort - 0.2
    cson = cort + 0.2
    blmsy2 = blmsy
    For p = 1 To 50
        For j = 0 To blmsy2
            bet2(j) = cbas + (cson - cbas) * j / blmsy2
            eps(t) = egr2(t) * bet2(j) * h

            toplam = 0
            For i = 1 To t - 1
                islem = (-1 * (eps(i - 1) - eps(i)) * (sigm(i) + sigm(i -
_1))) * b / 2

                toplam = toplam + islem
            Next i

            toplam2 = 0
            For i = 1 To t - 1
                islem = (-1 * (eps(i - 1) - eps(i)) * ((2 * eps(i) + eps(i -
_1)) * sigm(i) + (2 * eps(i - 1) + eps(i)) * sigm(i - 1))) * b / 6
                toplam2 = toplam2 + islem
            Next i

```

```

_* -1
ktsy1 = 1 / 2 * ((1 - bet2(j)) ^ 2) * egr2(t) * (h ^ 2) * b * elsm
ktsy2 = 1 / egr2(t)

If eps(t - 1) - eps(t) = 0 Then
    sign1(j) = 0
Else
    sign1(j) = (-ktsy1 / ktsy2 - toplam) * 2 / (-b * (eps(t -
_1) - eps(t))) - sigm(t - 1)
End If

ktsy1a = (h ^ 3) * ((1 - bet2(j)) ^ 3) * egr2(t) * b * elsm / 3
ktsy2a = ((1 / egr2(t)) ^ 2)

If eps(t - 1) - eps(t) = 0 Then
    sign2(j) = 10
Else
    sign2(j) = (((mom2(t) - ktsy1a) / ktsy2a - toplam2) * 6
_/ (-1 * (eps(t - 1) - eps(t)) * b) - (2 * eps(t - 1) + eps(t)) * sigm(t - 1)) / ((2 *
_eps(t) + eps(t - 1)))
End If

fark(j, 1) = sign1(j) - sign2(j)
fark(j, 2) = bet2(j)
fark(j, 3) = eps(t)
fark(j, 4) = sign1(j)
fark(j, 5) = sign2(j)
Next j

kck = Abs(fark(1, 1))
For r = 0 To blmsy2
    If Abs(fark(r, 1)) < kck Then
        kck = Abs(fark(r, 1))
        kckno = r
    End If
Next r
If kck < hasmik2 Then
    sigm(t) = (fark(kckno, 4) + fark(kckno, 5)) / 2
    eps(t) = fark(kckno, 3)
    bet(t) = fark(kckno, 2)
    If sigm(t) = 0 Then
        eps(t) = eps(t - 1)
        sigm(t) = sigm(t - 1)
    End If
Exit For
End If

If kckno <> 0 And kckno <> blmsy2 Then

```

```

        cbas = fark(kckno - 1, 2)
        cson = fark(kckno + 1, 2)
    ElseIf kckno = 0 Then
        cbas = fark(kckno, 2)
        cson = fark(kckno + 1, 2)
    ElseIf kckno = blmsy2 Then
        cbas = fark(kckno - 1, 2)
        cson = fark(kckno, 2)
    End If
Next p

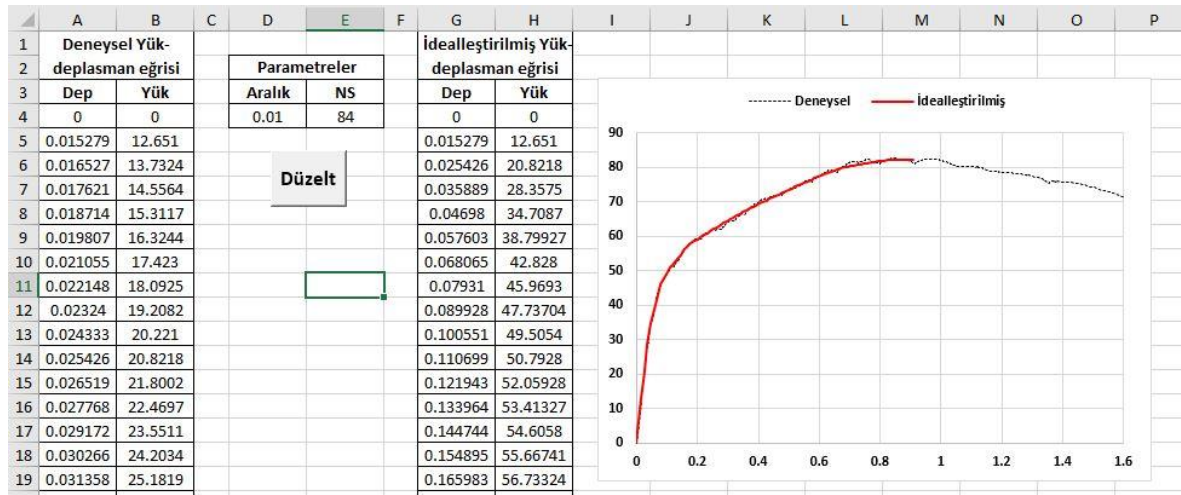
    If sigm(t) < 0 Or p = 51 Then
        answer = MsgBox(t & ".adımında hata bulundu!,Devam edilsin mi?",
        _vbYesNoCancel)
        If answer = vbYes Then
            sigm(t) = sigm(t - 1)
            eps(t) = eps(t - 1)
            bet(t) = bet(t - 1)
        Else
            Exit Sub
        End If
    End If
    cort = bet(t)
    If t <> 1 And ert = 1 Then sigm(t) = (sigm(t) + sigm(t - 1)) / 2
    Cells(t + 3, 13) = eps(t)
    Cells(t + 3, 14) = sigm(t)
    Cells(t + 3, 15) = bet(t)
Next t

‘Birim uzama, gerilme ve tarafsız eksen oranı değerlerinin yazılması
For i = 0 To noksay
    Cells(i + 3, 13) = eps(i)
    Cells(i + 3, 14) = sigm(i)
    Cells(i + 3, 15) = bet(i)
Next i

End Sub

```

Deney sonucunda elde edilen yük-deplasman ilişkisinin düzenlenmesi için hazırlanan programa ait arayüz Şekil B.3’de gösterilmiştir. Program, girilen aralık değerine göre deneysel yük-deplasman eğrisini filtrelemekte, aynı zamanda maksimum yük değerine kadar olan bölgedeki rijitlik düzensizliklerini eğrinin genel karakteristiğini bozmadan düzeltmektedir.



Şekil B.3: Filtreleme programı arayüzü.

Filtreleme programına ait yazılım kodları aşağıda verilmiştir.

Sub veriduz()

‘FİLTRELEME ALGORİTMASI

‘Değişkenlerin boyutlandırılması

Dim dizi1(), dizi2() As Double

‘ars: Yük deplasman noktaları arasında istenen deplasman miktarı

ars = Cells(4, 4)

‘İdealleştirilen yük deplasman eğrisinin yazılacağı bölgenin silinmesi

i = 1

Do

    i = i + 1

    If Cells(i, 7) = "" Then Exit Do

Loop

tmz = i - 1

Range(Cells(4, 7), Cells(tmz + 5, 11)).Clear

‘Deneysel yük-deplasman eğrisinin nokta sayısının belirlenmesi

```
i = 1
Do
    i = i + 1
    If Cells(i, 1) = "" Then Exit Do
Loop
noksay = i - 3
```

‘Dizilerin nokta sayısına göre tekrardan boyutlandırılması

```
ReDim dizi1(1 To noksay, 1 To 2)
ReDim dizi2(0 To noksay, 1 To 2)
```

‘Deneysel yük-deplasman eğrisinin diziye aktarılması

```
For i = 1 To noksay
    dizi1(i, 1) = Cells(i + 1, 1)
    dizi1(i, 2) = Cells(i + 1, 2)
Next i
```

‘Deneysel yük-deplasman eğrisinin ars değerine göre filtrelenmesi

```
k = 0
For i = 1 To noksay
    If dizi1(i, 1) - dizi2(k, 1) > ars Then
        k = k + 1
        dizi2(k, 1) = dizi1(i, 1)
        dizi2(k, 2) = dizi1(i, 2)
    End If
Next i
```

‘RİJİTLİK DÜZENLEME ALGORİTMASI

‘Değişkenlerin boyutlandırılması

```
Dim veri(), egim() As Double
ReDim veri(0 To k, 1 To 2)
```

‘Filtreleme sonuçlarının diziye aktarılması

```
veri(1,1)=dizi1(2,1)
veri(1,2)=dizi1(2,2)
```

```
For i = 2 To k
    veri(i, 1) = dizi2(i, 1)
    veri(i, 2) = dizi2(i, 2)
Next i
```

```
For j = 1 To k - 1
    ReDim egim(1 To k)
    t = 0
    x1 = veri(j, 1)
    y1 = veri(j, 2)
```

```
x = veri(j - 1, 1)
y = veri(j - 1, 2)
egimref = (y1 - y) / (x1 - x)
```

```
For i = j + 1 To k - 1
    t = t + 1
    x2 = veri(i, 1)
    y2 = veri(i, 2)
    egim(t) = (y2 - y1) / (x2 - x1)
Next i
```

```
egimdeg = 0
For i = 1 To t
    If egim(i) <= egimref And egimdeg <= egim(i) Then
        egimdeg = egim(i)
    End If
Next i
```

```
x1 = veri(j, 1)
y1 = veri(j, 2)
x2 = veri(j + 1, 1)
veri(j + 1, 2) = egimdeg * (x2 - x1) + y1
Next j
```

```
byk = 0
For i = 1 To k
    If i = 350 Then
        ddfd = 1
    End If
    If veri(i, 2) > byk Then
        byk = veri(i, 2)
        bykyr = i
    End If
Next i
```

‘İdealleştirilme sonuçlarının yazılması

```
For i = 1 To bykyr
    Cells(i + 2, 10) = veri(i, 1)
    Cells(i + 2, 11) = veri(i, 2)
Next i
```

‘İdealleştirilmiş yük-deplasman eğrisine ait nokta sayısının yazılması

```
Cells(4, 4) = bykyr
```

```
End Sub
```

# ÖZGEÇMİŞ

## Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı : Cengiz Gültekin

Doğum tarihi ve yeri : 27.09.1993 / Konak

e-posta : cengizgultekin0@gmail.com

## Öğrenim Bilgileri

Derece	Okul/Program	Yıl
Y. Lisans	Balıkesir Üniversitesi/İnşaat Mühendisliği	2020
Lisans	Balıkesir Üniversitesi/İnşaat Mühendisliği	2015
Lise	Sıdıka Rodop Anadolu Lisesi	2011