

T.C.
KIRIKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
DOKTORA TEZİ

LİFLİ POLİMER DONATI ORANININ HİBRİT FRP-ÇELİK DONATILI
BETON KİRİŞLERİN EĞİLME DAVRANIŞI ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ

SARUHAN KARTAL

OCAK 2020

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında Saruhan KARTAL tarafından hazırlanan LİFLİ POLİMER DONATI ORANININ HİBRİT FRP-ÇELİK DONATILI BETON KİRİŞLERİN EĞİLME DAVRANIŞI ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ adlı Doktora Tezinin Anabilim Dalı standartlarına uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. Orhan DOĞAN
Anabilim Dalı Başkanı

Bu tezi okuduğumu ve tezin **Doktora Tezi** olarak bütün gereklilikleri yerine getirdiğini onaylarım.

Doç. Dr. İlker KALKAN
Danışman

Jüri Üyeleri

Başkan	: Prof. Dr. Eray BARAN
Üye	: Doç. Dr. İlker KALKAN
Üye	: Dr. Öğr. Üyesi Halit Cenan MERTOL
Üye	: Dr. Öğr. Üyesi Eda AVANOĞLU SICACIK
Üye	: Dr. Öğr. Üyesi Şule BAKIRCI ER

...../...../2020

Bu tez ile Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Doktora derecesini onaylamıştır.

Prof. Dr. Recep ÇALIN
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ÖZET

LİFLİ POLİMER DONATI ORANININ HİBRİT FRP-ÇELİK DONATILI BETON KİRİŞLERİN EĞİLME DAVRANIŞI ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ

KARTAL, Saruhan

Kırıkkale Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Anabilim Dalı, Doktora Tezi

Danışman: Doç. Dr. İlker KALKAN

Ocak 2020, 228 Sayfa

Çelik donatılarda meydana gelen korozyon, yapı ömrünü kısaltmakta ve yapısal elemanların taşıma güçlerini azaltmaktadır. Yüksek korozyon ve çekme dayanımına sahip olan lifli polimer (FRP) donatılar, çelik donatılara alternatif olarak görülmekte ve bu donatıların kullanımı gün geçtikçe yaygınlaşmaktadır. Ancak FRP donatıların, düşük elastisite modülüne ve gevrek malzeme davranışına sahip olmaları gibi farklı dezavantajları da bulunmaktadır. Bu olumsuz malzeme özellikleri sebebiyle, salt FRP donatılı betonarme elemanlarda büyük deformasyonlar ve geniş çatlaklar gözlemlenmekte ve süneklik problemleri ortaya çıkmaktadır. Salt FRP donatılı kirişlerde meydana gelen süneklik ve servis sınır durumu problemleri ile salt çelik donatılı kirişlerde gözlemlenen korozyon problemlerinin çözümünde, çekme bölgesinde her iki donatı çeşidinin de yer aldığı hibrit FRP-çelik donatılı kiriş tasarımının etkili bir alternatif olabileceği düşünülmektedir. Bu çalışma, her iki donatının dezavantajlarını minimize eden ve bu iki donatının üstün özelliklerini eleman davranışına yansıtan hibrit FRP-çelik donatılı kirişlerin davranışlarının anlaşılabilmesi amacıyla gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, iki farklı tipte FRP donatısının kullanılmasıyla oluşturulan 3 farklı deney grubunda yer alan toplam 25 adet basit mesnetli kiriş, dört noktalı eğilme altında test edilmiştir. Hibrit donatılı kirişlerin davranış farklılıklarının en iyi biçimde ortaya konulabilmesi için her deney grubunda birer adet salt çelik ve salt FRP donatılı kirişe de yer verilmiştir.

Çalışmada çelik/FRP donatı oranı değişken tutularak bu oranın eğilme davranışı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Hibrit donatılı kirişlerin eğilme taşıma gücü

kapasiteleri, geliştirilen yeni bir model aracılığı ile deneysel verilere oldukça yakın bir biçimde tahmin edilmiştir. Hibrit donatılı ve salt FRP donatılı kirişlerin yük deformasyon eğrisi tahminleri için birer yeni metot önerilmiştir. Ayrıca literatürde yer alan farklı süneklik tanımları kullanılarak hibrit donatılı kirişlerin süneklikleri değerlendirilmiş ve enerjiyi temel alan süneklik tanımının hibrit FRP-çelik donatılı kirişler için en uygun tanım olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Salt FRP, salt çelik ve hibrit-FRP çelik donatılı kirişlerin ilk çatlama yüklerinin tahmininde, deneysel eğilmede çekme dayanımının yanı sıra iki farklı beton yönetmeliğine göre hesaplanan eğilmede çekme dayanımı değerleri kullanılmıştır. Bu hesaplarda atalet momenti ifadesi olarak da, brüt kesit ve çatlamamış kesit atalet momenti ifadelerinden faydalanılmıştır. Yapılan detaylı analitik çalışmalar, salt FRP, salt çelik ve hibrit FRP-çelik donatılı kirişlerin ilk çatlama yüklerinin hangi çekme dayanımı ve atalet momenti kombinasyonu yardımıyla daha yakın olarak hesaplanabileceğini göstermiştir. Ayrıca, bu kirişlerde yük-sehim eğrilerinin yakın olarak tahmin edilebileceği deneysel yöntemler ve etkili eylemsizlik momenti ifadelerine ulaşılmıştır. Son olarak, hibrit FRP-çelik donatılı kirişlerin taşıma gücü dayanım azaltma katsayılarının hesaplanması için bir yöntem önerilmiştir. Bu yöntem, dayanım azaltma katsayısını kirişin kırılma moduna, en dış çekme donatısı nihai birim deformasyonuna ve toplam donatı içerisindeki çelik donatı oranına bağlı olarak ifade etmektedir.

Anahtar Kelimeler: Hibrit donatılı kirişler, Polimer Lifli Donatı, Süneklik, Efektif Atalet Momenti, Güvenilirlik analizi, Dayanım azaltma katsayısı

ABSTRACT

THE EFFECTS OF THE FRP REINFORCEMENT RATIO ON THE FLEXURAL BEHAVIOR OF HYBRID FRP-STEEL REINFORCED CONCRETE BEAMS

KARTAL, Saruhan

Kırıkkale University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Civil Engineering, Ph. D. Thesis

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. İlker KALKAN

January 2020, 228 pages

The service life of a structure is shortened and the load-bearing capacities of structural members are reduced by the corrosion of steel reinforcement. The Fiber-Reinforced Polymer (FRP) bars, which have high corrosion resistance and tensile strength, are considered as alternative reinforcement for concrete to the conventional steel bars and the use of FRP reinforcement increases day by day. However, FRP reinforcement has various disadvantages, including but not limited to their low modulus of elasticity and brittle material behavior. Concrete members with FRP reinforcement undergo significant service-load deformations and wide cracks, accompanied by ductility problems, due to these unfavorable material properties. The hybrid FRP-steel reinforced concrete beam design, which is based on the simultaneous use of FRP and steel bars in the tension zone, is considered as an effective possible solution for the ductility and serviceability problems in FRP-reinforced concrete beams and the corrosion problems in steel-reinforced concrete beams. This study was carried out to understand the behavior of hybrid FRP-steel reinforced concrete beams, which minimize the disadvantages of the two types of reinforcement and incorporate the superior properties of the two into the member behavior. In this context, a total of 25 simply-supported beams in 3 different beam groups, having two different types of FRP reinforcement, were tested under four-point bending. In order to evaluate the behavior of hybrid reinforced beams in the most precise manner, a solely steel-reinforced and a solely FRP-reinforced reference beams were also included in each test beam group.

The influence of steel-to-FRP reinforcement ratio on flexural behavior of hybrid steel-FRP reinforced concrete beams was investigated in the present study for varying reinforcement ratio. The experimental bending capacities of hybrid reinforced beams were closely estimated through a new analytical model. Furthermore, a new analytical method was proposed for the estimation of the load-deflection behavior of hybrid steel-FRP reinforced and solely FRP-reinforced concrete beams. Finally, using different ductility definitions in the literature, the ductilities of hybrid steel-FRP reinforced concrete beams were evaluated and the most appropriate definition, which is based on energy absorption, was established accordingly.

In the prediction of initial cracking loads of pure FRP, pure steel and hybrid-FRP steel reinforced concrete beams, experimental modulus of rupture values were used as well as analytical tensile strength values from the formulations in two well-known international concrete codes. In these calculations, gross cross-section and uncracked transformed moment of inertia expressions were utilized. Detailed analytical studies illustrated the required tensile strength and uncracked moment of inertia combinations for closely estimating the first cracking load values of the solely FRP-, solely steel- and hybrid FRP-steel reinforced concrete beams. In addition, experimental methods and effective moment of inertia expressions for close estimation of load-deflection curves of hybrid FRP-steel reinforced concrete beams were proposed. Finally, a method for calculating the strength reduction coefficients of hybrid FRP-steel reinforced concrete beams was proposed. This method expresses the strength reduction coefficient according to the failure mode of the beam, the ultimate strain of the outermost tension reinforcement layer and the ratio of steel reinforcement area to the total reinforcement area.

Keywords: Hybrid FRP-steel reinforced concrete beam, FRP reinforcement, Ductility, Effective moment of inertia, Reliability analysis, Strength reduction factor

TEŞEKKÜR

Doktoraya başladığım andan itibaren emeğini, ilgisini, bilgisini, samimiyetini tereddütsüz esirgemeyen ve asistanı olmaktan bir ömür iftihar edeceğim çok değerli hocam Doç. Dr. İlker KALKAN'a yürekten teşekkür ederim. Ayrıca bana bir abiden öte yaklaşımı için tekrar teşekkür ederek kendisini abimden öte gördüğümü belirtmek isterim. Kıymetli hocam ile birlikte geçirdiğim yıllar içinde, mesleğimin neleri gerektirdiğini ve bu koşullarda ara vermeksizin çalışmam gerektiğini, iş ahlakını ve ciddiyetini yalnızca anlattıklarından değil ona en yakın tanık olarak öğrendim. Ben değerli hocamı, yalnızca mesleki olarak değil ayrıca insani yönü, mütevazılığı ve hakkaniyet yönleri itibari ile de rol model olarak kabul ediyorum. Tüm bunları düşündüğümde kendimi çok şanslı olarak addediyor ve başarılarının devamını diliyorum.

Tezimin başlangıcından itibaren, tüm deneylerimde yanımda olan, değerli fikir ve görüşlerini benden esirgemeyen, güler yüzlü, pozitif ve yapıcı tavrı ile beni çalışmaya teşvik eden değerli hocam Dr. Öğr. Üyesi Halit Cenani MERTOL'a, değerli fikir ve görüşleri tezime yön veren Prof. Dr. Eray BARAN'a teşekkürü bir borç bilirim. Tez izleme komitesinde yer alan resmi ve resmi olmayan tüm toplantılarımızda çokça vakitlerini aldığım, değerli ve yapıcı görüşleri ile tezime ve bilimsel bakış açıma fazlaca katkıda bulunan Doç. Dr. İlker KALKAN'a, Dr. Öğr. Üyesi Halit Cenani MERTOL'a ve Prof. Dr. Eray BARAN'a tekrar tekrar teşekkür ederim. Doktora tez jürime katılarak değerli fikirlerinden yararlandığım ve yüksek lisans tezime dâhil olmak üzere üzerimde çok emekleri bulunan çok değerli hocalarım Dr. Öğr. Üyesi Eda AVANOĞLU SICACIK ve Dr. Öğr. Üyesi Şule BAKIRCIER'e çok teşekkür ederim.

Doktora süresince bana desteğini hiç esirgemeyen dostum, değerli kardeşim Dr. Öğr. Üyesi Özer SEVİM'e çok teşekkür ederim. Lisanstan itibaren birlikte olduğumuz desteğini her zaman hissettiğim dostlarım ve değerli kardeşlerim Arş. Gör. Akın DUVAN'a, Arş. Gör. Mehmet Fethi ERTENLİ'ye, İrfan ÜNAL'a ve Umut KAYA'ya çok teşekkür ederim. Yine fakültemizde birlikte görev aldığım değerli arkadaşlarım Arş. Gör. Ali DOĞU, Arş. Gör. Orhan Gazi ODACIOĞLU ve Dr. Enes AYAN'a destekleri ve yardımları için çok teşekkür ederim. Ayrıca, Atılım Üniversitesi Yapı

Mekaniği Laboratuvar'ında çalışan ve bana çok yardımları bulunan Cafer HASTÜRK ve Muhammed SAĞLAM'a çok teşekkür ederim. Aynı laboratuvarda deneysel çalışmamın başlangıcından bitimine değin büyük emekleri geçen sevgili Doğan TOK ustama ayrıca teşekkür ederim.

Doktora öğrenciliğim boyunca, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'nun (TÜBİTAK) 2211-A kodlu Yurt İçi Lisansüstü Burs Programı kapsamında almış olduğum burs ile desteğini esirgemeyen TÜBİTAK'a teşekkürü bir borç bilirim. 2016/073 No'lu proje ile tezimi maddi olarak destekleyen Kırıkkale Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Koordinasyon Birimine çok teşekkür ederim. Tüm deneysel çalışmalarımız için laboratuvar imkânı sunan Atılım Üniversitesi'ne ve Atılım Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümüne çok teşekkür ederim.

Hayatımın her anında her konu hakkında istişare ettiğim, bana yol gösteren, mesleğe girmeme vesile olup ve ömrüm boyunca emeğini ödeyemeyeceğim sevgili babaannem emekli öğretmen Nefise KARTAL'a çok teşekkür ederim. Yine emeklerini ödeyemeyeceğim ve ilgilerini hiçbir zaman esirgemeyen biricik annem Sultan KARTAL'a ve sevgili babam Okan Doğan KARTAL'a çok teşekkür ederim. Kardeşlerim Nefise KARTAL, Mustafa KARTAL ve Abdulhay KARTAL'a içten destekleri için çok teşekkür ederim. Desteği için sevgili annem Sema AYDIN'a; destek ve ilgisini her fırsatta gösteren babam Turgut AYDIN'a da teşekkürü borç bilirim. Evlendiğimizden itibaren, özellikle mesleğim başta olmak üzere her konuda bana destek olan, hem eşim hem yol arkadaşım canım Nadide'me çok teşekkür ederim. Doğumundan itibaren evimizin neşe kaynağı olan, hayattaki en büyük motivasyonum canım kızım Zeynebime çok teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xii
ŞEKİLLER DİZİNİ	xv
SİMGELER DİZİNİ	xxiv
KISALTMALAR DİZİNİ	xxxii
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR	6
3. DENEYSEL ÇALIŞMA	24
3.1. Deney Elemanları	25
3.2. Malzeme Mekanik Özellikleri.....	31
3.2.1. Donatı	31
3.2.2. Beton	34
3.3. Deneysel Gözlemler ve Kirişlerin Yük-Deplasman İlişkileri	35
3.4. Test Düzeneği ve Ölçüm Düzeni.....	40
4. EĞİLME	44
4.1. Malzeme Modelleri	45
4.1.1. Todeschini Beton Modeli	45
4.1.2. Çelik Donatı Modeli	47
4.1.3. FRP Donatı Modeli	50

4.2. Hibrit Donatılı Kiriş Göçme Sınır Durumu Tanımları	51
4.2.1. Denge Üstü Kırılma Sınır Durumu	51
4.2.2. Denge Altı Kırılma Sınır Durumu.....	52
4.3. Eğilme Taşıma Gücü Hesabı	52
4.4. Eğilme Taşıma Gücü ve Kırılma Modu Tahminleri	56
4.5. İlk Çatlama Yükleri Tahmini	59
4.5.1. Betonun Prizmatik Numune Eğilmede Çekme Dayanımına Göre Hesaplanan İlk Çatlama Yükü Değerleri.....	61
4.5.2. Betonun Eurocode 2 [34] Formülünden Elde Edilen Eğilmede Çekme Dayanımına Göre Hesaplanan İlk Çatlama Yükü Değerleri	62
4.5.3. Betonun ACI 318M-11 [35] Formülünden Elde Edilen Eğilmede Çekme Dayanımına Göre Hesaplanan İlk Çatlama Yükü Değerleri	63
4.5.4. Farklı Yöntemler Kullanılarak Hesaplanan Kirişlerin İlk Çatlama Yükü Tahminlerinin Değerlendirilmesi	65
5. YÜK DEPLASMAN DAVRANIŞI.....	71
5.1. Atalet Momenti İfadesi.....	71
5.1.1. Çatlamamış Kesit Atalet Momenti.....	74
5.1.2. İlk Çatlama Sonrası	74
5.2. Elastisite Modülü.....	77
5.2.1. ACI 318M-11 [35] Elastisite Modülü Tanımı	77
5.2.2. Sekant Modülü Tanımı.....	77
5.2.2.1. Katman (Layer) Analizi	78
5.3. Salt Çelik Donatılı Kirişlerde Yük Deformasyon İlişkisi Tahmin Yöntemi..	80
5.4. Hibrit Donatılı Kirişlerde Yük Deformasyon İlişkisi Tahmin Yöntemi	81
5.5. Salt FRP Donatılı Kirişlerde Yük Deformasyon İlişkisi Tahmin Yöntemi....	85
5.5.1. A yöntemi.....	85
5.5.2. B yöntemi.....	87
5.6. Salt Çelik ve Hibrit FRP-Çelik Donatılı Kirişlerin Yük Deformasyon Tahminleri ve Deneysel Eğrilerle Karşılaştırılması	87
5.7. Salt FRP Donatılı Kirişlerde Yük Deformasyon Tahminleri (A ve B Yöntemi) ve Deneysel Eğrilerle Karşılaştırılması.....	109
6. SÜNEKLİK.....	121

6.1. Abdelrahman ve diğ. [41] Süneklik Tanımı	124
6.2. Spadea ve diğ. [42] Süneklik Tanımı	128
6.3. Tomlinson [43]-Jaeger [44] Süneklik Tanımı	131
6.4. Vijay ve GangaRao [45] Süneklik Tanımı	134
6.5. Zou [46] Süneklik Tanımı	137
6.6. Naaman ve Jeong [40] Süneklik Tanımı	140
7. GEREKLİ TASARIM DAYANIMI VE DAYANIM AZALTMA KATSAYISI	160
7.1. ACI 318M-11 [35] Yönetmeliğinin Kaynak Kabul Ettiği Çalışmalar	161
7.1.1. Yük Modelleri	162
7.1.2. Güvenilirlik Analizi ve Hedef Güvenilirlik İndisi	163
7.2. ACI 318M-11 [35] 'de Dayanım Azaltma Katsayısı (ϕ).....	164
7.3. ACI 440.1R-15 [1] Yönetmeliğinin Referans Kabul Ettiği Çalışmalar	165
7.4. ACI 440-1.R-15 [1]'da Dayanım Azaltma Katsayısı (ϕ)	166
7.5. Hibrit FRP-Çelik Donatılı Kirişlerde Dayanım Azaltma Katsayısının (ϕ) Belirlenmesi	167
7.5.1. Dayanım Değişkenleri ve Kapasitesinin Belirlenmesi.....	168
7.5.2. Analiz Edilecek Kirişlerin Seçilmesi	169
7.5.3. Yük modelleri ve Yük seçimi	170
7.5.4. Güvenilirlik Analizi ve Sonuçları	171
7.5.5. Hibrit Donatılı Kirişlerde Dayanım Azaltma Katsayısı (ϕ)	174
8. SONUÇLAR.....	176
KAYNAKLAR	180
ÖZGEÇMİŞ.....	187
EKLER.....	188
EK-1	188
EK-2	193
EK-3	195

EK-4		199
EK-5		224



ÇİZELGELER DİZİNİ

ÇİZELGE

Sayfa

2.1. Kalibre edilmiş etkili atalet momenti ifadesinde yer alan katsayılar	7
2.2. Aiello ve Ombres'in çalışmasında yer alan kirişlere ait deformabilite değerleri	8
2.3. Lau ve Pam'in çalışmasında yer alan kirişlere ait süneklik değerleri	12
2.4. Ge ve arkadaşlarının çalışmasında yer alan kirişlere ait süneklik değerleri	17
2.5. Refai ve arkadaşlarının çalışmasında yer alan salt FRP donatılı kirişlere ait deformabilite faktörü değerleri	19
2.6. Refai ve arkadaşlarının çalışmasında yer alan hibrit donatılı kirişlere ait deformabilite faktörü değerleri	19
2.7. Qin ve arkadaşlarının deneysel çalışmasında yer alan hibrit donatılı kirişlere ait süneklik değerleri	23
2.8. Qin ve arkadaşlarının nümerik çalışmasında yer alan hibrit donatılı kirişlere ait süneklik değerleri	23
3.1. Çalışmada yer alan tüm kirişlere ait kesit ölçüleri, çekme ve basınç donatı detayları, beton basınç dayanımı ve FRP mekanik özellikleri	28
3.2. Ölçülen FRP donatı çapları	31
3.3. 3 farklı BFRP donatı numunesine ait deneysel mekanik özellikler	32
3.4. 4 farklı GFRP _{Tip-1} donatı numunesine ait mekanik özellikler	32
3.5. 4 farklı GFRP _{Tip-2} donatı numunesine ait mekanik özellikler	33
3.6. Betonun silindir numune basınç dayanımları ve prizmatik numune eğilmede çekme dayanımları	35
4.1. Birinci deney grubunda yer alan kirişlere ait taşıma gücü ve kırılma modu tahminleri	57
4.2. İkinci deney grubunda yer alan kirişlere ait taşıma gücü ve kırılma modu tahminleri	58
4.3. Üçüncü deney grubunda yer alan kirişlere ait taşıma gücü ve kırılma modu tahminleri	59
4.4. Salt çelik donatılı kirişlere ait ilk çatlama yükleri	66

4.5. Salt FRP donatılı kirişlere ait ilk çatlama yükleri	66
4.6. Denge üstü hibrit FRP-çelik donatılı kirişlere ait ilk çatlama yükleri	67
4.7. Denge altı hibrit FRP-çelik donatılı kirişlere ait ilk çatlama yükleri	68
5.1. Layer analiz sonuçları	80
5.2. Hibrit donatılı kirişlerde yük-deplasman ilişkisi tahmini için yük seviyesine göre parametrelerin kullanım özeti	84
5.3. Salt FRP donatılı kirişlerde yük deformasyon ilişkisi tahmini için yük seviyesine göre parametrelerin kullanım özeti (A yöntemi)	86
5.4. Salt FRP donatılı kirişlerde yük deformasyon ilişkisi tahmini için yük seviyesine göre parametrelerin kullanım özeti (B yöntemi).....	87
5.5. Salt çelik ve hibrit donatılı kirişlerin deformasyon tahmin değişkenleri	88
5.6. Salt FRP donatılı kirişlerin deformasyon tahminini için kullanılan yöntemler	109
6.1. Birinci grup kirişler klasik süneklik tanımına göre süneklik oranları.....	122
6.2. İkinci grup kirişler klasik süneklik tanımına göre süneklik oranları	122
6.3. Üçüncü grup kirişler klasik süneklik tanımına göre süneklik oranları	122
6.4. Birinci grup kirişler için Abdelrahman ve diğ. [41] süneklik oranları.....	126
6.5. İkinci grup kirişler için Abdelrahman ve diğ. [41] süneklik oranları	126
6.6. Üçüncü grup kirişler için Abdelrahman ve diğ. [41] süneklik oranları	126
6.7. Birinci grup kirişlerin Spadea ve diğ. [42] tanımına göre süneklik değerleri...	129
6.8. İkinci grup kirişlerin Spadea ve diğ. [42] tanımına göre süneklik değerleri.....	129
6.9. Üçüncü grup kirişlerin Spadea ve diğ. [42] tanımına göre süneklik değerleri .	129
6.10. Birinci grup kirişlerin Tomlinson-Jaeger tanımına göre süneklik değerleri ...	132
6.11. İkinci grup kirişlerin Tomlinson-Jaeger tanımına göre süneklik değerleri.....	132
6.12. Üçüncü grup kirişlerin Tomlinson-Jaeger tanımına göre süneklik değerleri..	132
6.13. Birinci grup kirişlerin Vijay-GangaRao [45] tanımına göre süneklikleri	135
6.14. İkinci grup kirişlerin Vijay-GangaRao [45] tanımına göre süneklikleri.....	135
6.15. Üçüncü grup kirişlerin Vijay-GangaRao [45] tanımına göre süneklikleri.....	135
6.16. Birinci grup kirişlerin Zou [46] tanımına göre süneklik değerleri.....	138
6.17. İkinci grup kirişlerin Zou [46] tanımına göre süneklik değerleri.....	138
6.18. Üçüncü grup kirişlerin Zou [46] tanımına göre süneklik değerleri.....	138
6.19. İlk grup kirişlerine ait eğimler, sınır yük değerleri ve Naaman ve Jeong [40] süneklik değerleri.....	155

6.20. İkinci grup kirişlerine ait eğimler, sınır yük değerleri ve Naaman ve Jeong [40] süneklik değerleri.....	156
6.21. Üçüncü grup kirişlerine ait eğimler, sınır yük değerleri ve Naaman ve Jeong [40] süneklik değerleri.....	156
7.1. Yük modelleri.....	162
7.2. FRP tiplerine göre çevresel dayanım azaltma katsayısı.....	166
7.3. Beton için istatistiki veriler	168
7.4. Çelik donatı için istatistiki veriler	168
7.5. FRP donatısı için istatistiki veriler.....	168
7.6. Güvenilirlik analizi gerçekleştirilen kirişlere ait kesit detayları ve kapasiteler	170
7.7. Güvenilirlik analizleri gerçekleştirilen kirişlere ait güvenilirlik indisleri ve dayanım azaltma katsayıları.....	172
7.8. Denge altı hibrit donatılı kirişlerde güvenilirlik analizleri ve tahmin edilen dayanım azaltma katsayıları.....	173
7.9. Denge üstü hibrit donatılı kirişlerde güvenilirlik analizleri ve tahmin edilen dayanım azaltma katsayıları.....	173
EK-1.1. S6 Referans kirişine ait kesit ölçümleri.....	188
EK-1.2. G1S5 kirişine ait kesit ölçümleri	188
EK-1.3. G2S4 kirişine ait kesit ölçümleri	189
EK-1.4. G3S3 kirişine ait kesit ölçümleri	189
EK-1.5. G4S2 kirişine ait kesit ölçümleri	189
EK-1.6. G5S1 kirişine ait kesit ölçümleri	190
EK-1.7. G6 Referans kirişine ait kesit ölçümleri	190
EK-1.8. S3 Referans kirişine ait kesit ölçümleri.....	190
EK-1.9. G1S2 kirişine ait kesit ölçümleri	191
EK-1.10. G2S1 kirişine ait kesit ölçümleri	191
EK-1.11. G3 Referans kirişine ait kesit ölçümleri	191
EK-1.12. B1S2 kirişine ait kesit ölçümleri	192
EK-1.13. B2S1 kirişine ait kesit ölçümleri	192
EK-1.14. B5 (B3) Referans kirişine ait kesit ölçümleri	192
EK-2.1. BFRP ve GFRPTip-1 donatı çapı ölçümleri.....	193
EK-2.2. GFRPTip-2 donatı çapı ölçümleri	194

EK-3.1. İlk grup kirişlerin dökümünden alınan silindir beton numunelerinin basınç dayanımları	196
EK-3.2. İlk grup kirişlerin dökümünden alınan kare prizma beton numunelerinin eğilmede çekme dayanımları	197
EK-3.3. İkinci ve üçüncü grup kirişlerin dökümünden alınan silindir beton numunelerinin basınç dayanımları	197
EK-3.4. İkinci ve üçüncü grup kirişlerin dökümünden alınan kare prizma beton numunelerinin eğilmede çekme dayanımları	198



ŞEKİLLER DİZİNİ

ŞEKİL

Sayfa

1.1. Korozyon sebebiyle tahrip olmuş bir köprü ayağı	1
1.2. Korozyon sebebiyle tahrip olmuş bir kiriş	2
1.3. GFRP donatılar kullanılarak inşaa edilen bir köprü tabliyesi	3
1.4. FRP donatılı bir köprü tabliyesi	3
2.1. Aiello ve Ombres'in çalışmasında yer alan kirişlere ait en kesitler.....	6
2.2. Leung ve Balendran'ın çalışmasında yer alan kirişlere ait en kesitler.....	9
2.3. Qu'nun çalışmasında yer alan kirişlere ait en kesitler	10
2.4. Lau ve Pam'in çalışmasında yer alan kirişlere ait en kesitler	11
2.5. Safan'in çalışmasında yer alan kirişlere ait en kesitler	13
2.6. Yinghao ve Yong'un çalışmasında yer alan kirişlere ait en kesitler	13
2.7. Refai ve arkadaşlarının çalışmasında yer alan kirişlere ait en kesitler.....	18
3.1. Çalışmada yer alan tüm kirişlerin en-kesitleri	27
3.2. (a) Birinci grup (b) ikinci ve üçüncü grup kirişlere ait yükleme, mesnet ve enine donatı detayları.....	29
3.3. Kiriş ebatlarının belirlenmesi için alınan ölçüm şablonu.....	30
3.4. BFRP donatıların çekme testlerine ait gerilme-birim deformasyon eğrileri.....	32
3.5. GFRP _{Tip-1} donatıların çekme testlerine ait gerilme-birim deformasyon eğrileri .	33
3.6. GFRP _{Tip-2} donatıların çekme testlerine ait gerilme-birim deformasyon eğrileri .	34
3.7. Salt çelik, salt BFRP ve BFRP-çelik hibrit donatılı denge üstü donatılı birinci grup kirişlerine ait yük-deformasyon grafikleri	36
3.8. Salt çelik, salt GFRP ve GFRP-çelik hibrit donatılı denge üstü donatılı birinci grup kirişlerine ait yük-deformasyon grafikleri.....	37
3.9. Salt çelik, salt GFRP ve GFRP-çelik hibrit donatılı denge üstü donatılı ikinci grup kirişlerine ait yük-deformasyon grafikleri	37
3.10. Salt çelik, salt BFRP ve BFRP-çelik hibrit donatılı denge altı donatılı üçüncü grup kirişlerine ait yük-deformasyon grafikleri.....	38
3.11. Salt çelik, salt GFRP ve GFRP-çelik hibrit donatılı denge altı donatılı üçüncü grup kirişlerine ait yük-deformasyon grafikleri.....	38

3.12. Eğilme Test Düzeneği	40
3.13. Deneysel mesnetlenme modeli.....	41
3.14. FRP donatı çekme test düzeneği	43
4.1. Todeschini beton modeline ait gerilme-birim deformasyon eğrisi	46
4.2. Çelik çekme donatısı gerilme birim deformasyon eğrisi modeli	48
4.3. Çelik basınç donatısı gerilme birim deformasyon eğrisi modeli	49
4.4. FRP donatısı gerilme birim deformasyon eğrisi modeli	50
4.5. Kesit taşıma gücü anında kirişte oluşan iç kuvvetler ve birim deformasyon dağılımı	53
4.6. Basınç donatılı bir kesite ait brüt ve çatlamamış dönüştürülmüş kesitler	60
4.7. Basınç donatısız bir kesite ait brüt ve çatlamamış dönüştürülmüş kesitler.....	60
5.1. Kesit atalet momentinin ilk çatlama anından tamamen çatlamış olduğu ana kadar kademeli değişimi gösteren etkili atalet momenti.....	73
5.2. (a) Basınç donatılı (Birinci grup), (b) basınç donatısız (İkinci ve üçüncü grup) kirişlerin tamamen çatlamış olduğu ana ait dönüştürülmüş kesitleri	75
5.3. (a) Basınç donatılı (Birinci grup), (b) basınç donatısız (İkinci ve üçüncü grup) kirişlerin akma anına ait dönüştürülmüş kesitleri.....	76
5.4. Hognestad [38] beton modeli kullanılarak gerçekleştirilen layer analiz şeması..	79
5.5. Hibrit donatılı kirişlerde akma sonrası yük-deplasman modeli	82
5.6. Salt FRP donatılı kirişlerde kesit tamamen çatladıktan sonra yük-deplasman ilişkisi tahmin şeması	86
5.7. S5 Referans kirişi deneysel ve analitik yük-deplasman eğrileri (a) 1. Grafik, (b) 2. Grafik (c) 3. Grafik yöntemi kullanılarak	89
5.8. B1S4 kirişi deneysel ve analitik yük-deplasman eğrileri (a) 1. Grafik, (b) 2. Grafik (c) 3. Grafik yöntemi kullanılarak	90
5.9. B2S3 kirişi deneysel ve analitik yük-deplasman eğrileri (a) 1. Grafik, (b) 2. Grafik (c) 3. Grafik yöntemi kullanılarak	91
5.10. B3S2 kirişi deneysel ve analitik yük-deplasman eğrileri (a) 1. Grafik, (b) 2. Grafik (c) 3. Grafik yöntemi kullanılarak.....	92
5.11. B4S1 kirişi deneysel ve analitik yük-deplasman eğrileri (a) 1. Grafik, (b) 2. Grafik (c) 3. Grafik yöntemi kullanılarak.....	93
5.12. G1S4 kirişi deneysel ve analitik yük-deplasman eğrileri (a) 1. Grafik, (b) 2. Grafik (c) 3. Grafik yöntemi kullanılarak.....	94

5.13. G2S3 kirişı deneysel ve analitik yük-deplasman eğrileri (a) 1. Grafik, (b) 2. Grafik (c) 3. Grafik yöntemi kullanılarak.....	95
5.14. G3S2 kirişı deneysel ve analitik yük-deplasman eğrileri (a) 1. Grafik, (b) 2. Grafik (c) 3. Grafik yöntemi kullanılarak.....	96
5.15. G4S1 kirişı deneysel ve analitik yük-deplasman eğrileri (a) 1. Grafik, (b) 2. Grafik (c) 3. Grafik yöntemi kullanılarak.....	97
5.16. S6 Referans kirişı deneysel ve analitik yük-deplasman eğrileri (a) 1. Grafik, (b) 2. Grafik (c) 3. Grafik yöntemi kullanılarak.....	98
5.17. G1S5 kirişı deneysel ve analitik yük-deplasman eğrileri (a) 1. Grafik, (b) 2. Grafik (c) 3. Grafik yöntemi kullanılarak.....	99
5.18. G2S4 kirişı deneysel ve analitik yük-deplasman eğrileri (a) 1. Grafik, (b) 2. Grafik (c) 3. Grafik yöntemi kullanılarak.....	100
5.19. G3S3 kirişı deneysel ve analitik yük-deplasman eğrileri (a) 1. Grafik, (b) 2. Grafik (c) 3. Grafik yöntemi kullanılarak.....	101
5.20. G4S2 kirişı deneysel ve analitik yük-deplasman eğrileri (a) 1. Grafik, (b) 2. Grafik (c) 3. Grafik yöntemi kullanılarak.....	102
5.21. G5S1 kirişı deneysel ve analitik yük-deplasman eğrileri (a) 1. Grafik, (b) 2. Grafik (c) 3. Grafik yöntemi kullanılarak.....	103
5.22. S3 Referans kirişı deneysel ve analitik yük-deplasman eğrileri (a) 1. Grafik, (b) 2. Grafik (c) 3. Grafik yöntemi kullanılarak.....	104
5.23. B1S2 kirişı deneysel ve analitik yük-deplasman eğrileri (a) 1. Grafik, (b) 2. Grafik (c) 3. Grafik yöntemi kullanılarak.....	105
5.24. B2S1 kirişı deneysel ve analitik yük-deplasman eğrileri (a) 1. Grafik, (b) 2. Grafik (c) 3. Grafik yöntemi kullanılarak.....	106
5.25. G1S2 kirişı deneysel ve analitik yük-deplasman eğrileri (a) 1. Grafik, (b) 2. Grafik (c) 3. Grafik yöntemi kullanılarak.....	107
5.26. G2S1 kirişı deneysel ve analitik yük-deplasman eğrileri (a) 1. Grafik, (b) 2. Grafik (c) 3. Grafik yöntemi kullanılarak.....	108
5.27. B5 Referans kirişı (a) 1. Grafik (b) 2. Grafik yöntemine göre çizilen analitik ve deneysel yük-deplasman eğrileri.....	110
5.28. G5 Referans kirişı (a) A yöntemi (b) B yöntemine göre çizilen analitik ve deneysel yük-deplasman eğrileri	111

5.29. G6 Referans kirişı (a) A yöntemi (b) B yöntemine göre çizilen analitik ve deneysel yük-deplasman eğrileri	112
5.30. B5 (B3) Referans kirişı (a) A yöntemi (b) B yöntemine göre çizilen analitik ve deneysel yük-deplasman eğrileri	113
5.31. G3 Referans kirişı (a) A yöntemi (b) B yöntemine göre çizilen analitik ve deneysel yük-deplasman eğrileri	114
5.32. B5 Referans kirişı analitik ve deneysel yük-deplasman eğrileri (a) (I_{ucr} -A Yöntemi) (b) (I_g -A Yöntemi) (deneysel çatlama yükü).....	116
5.33. G5 Referans kirişı analitik ve deneysel yük-deplasman eğrileri (a) (I_{ucr} -A Yöntemi) (b) (I_g -A Yöntemi) (deneysel çatlama yükü).....	117
5.34. G6 Referans kirişı analitik ve deneysel yük-deplasman eğrileri (a) (I_{ucr} -A Yöntemi) (b) (I_g -A Yöntemi) (deneysel çatlama yükü).....	118
5.35. B5 (B3) Referans kirişı analitik ve deneysel yük-deplasman eğrileri (a) (I_{ucr} -A Yöntemi) (b) (I_g -A Yöntemi) (deneysel çatlama yükü).....	119
5.36. G3 Referans kirişı analitik ve deneysel yük-deplasman eğrileri (a) (I_{ucr} -A Yöntemi) (b) (I_g -A Yöntemi) (deneysel çatlama yükü).....	120
6.1. Birinci grup kirişlerin S5 referans kirişine göre klasik süneklik oranları	123
6.2. İkinci grup kirişlerin S6 referans kirişine göre klasik süneklik oranları	123
6.3. Üçüncü grup kirişlerin S3 referans kirişine göre klasik süneklik oranları.....	123
6.4. Abdelrahman süneklik tanımı	125
6.5. Birinci grup kirişlerin S5 Referans kirişine göre Abdelrahman ve diğ. [41] süneklik oranları.....	127
6.6. İkinci grup kirişlerin S6 Referans kirişine göre Abdelrahman ve diğ. [41] süneklik oranları	127
6.7. Üçüncü grup kirişlerin S3 Referans kirişine göre Abdelrahman ve diğ. [41] süneklik oranları.....	127
6.8. Birinci grup kirişlerin S5 Referans kirişine göre Spadea ve diğ. [42] süneklik oranları	130
6.9. İkinci grup kirişlerin S6 Referans kirişine göre Spadea ve diğ. [42] süneklik oranları	130
6.10. Üçüncü grup kirişlerin S3 Referans kirişine göre Spadea ve diğ. [42] süneklik oranları.....	130

6.11. Birinci grup kirişlerin S5 Referans kirişine göre Jaeger (Tomlinson) süneklik oranları.....	133
6.12. İkinci grup kirişlerin S6 Referans kirişine göre Jaeger (Tomlinson) süneklik oranları.....	133
6.13. Üçüncü grup kirişlerin S3 Referans kirişine göre Jaeger (Tomlinson) süneklik oranları.....	133
6.14. Birinci grup kirişlerin S5 Referans kirişine göre Vijay-GangaRao [45] süneklik oranları.....	136
6.15. İkinci grup kirişlerin S6 Referans kirişine göre Vijay-GangaRao [45] süneklik oranları.....	136
6.16. Üçüncü grup kirişlerin S3 Referans kirişine göre Vijay-GangaRao [45] süneklik oranları.....	136
6.17. Birinci grup kirişlerin S5 Referans kirişine göre Zou [46] tanımına göre süneklik oranları.....	139
6.18. İkinci grup kirişlerin S6 Referans kirişine göre Zou [46] tanımına göre süneklik oranları.....	139
6.19. Üçüncü grup kirişlerin S3 Referans kirişine göre Zou [46] tanımına göre süneklik oranları.....	139
6.20. Elasto-plastik kirişlerde tüketilen elastik ve elastik olmayan enerji alanları ..	141
6.21. FRP donatılı kirişlerde tüketilen elastik ve elastik olmayan enerji alanları....	142
6.22. Hibrit FRP-çelik donatılı kirişlerde tüketilen elastik ve elastik olmayan enerji alanları	143
6.23. S5 Referans kirişi yük-sehim eğrisi üzerinde doğrusal bölgelerin gösterimi .	144
6.24. B1S4 kirişi yük-sehim eğrisi üzerinde doğrusal bölgelerin gösterimi	144
6.25. B2S3 kirişi yük-sehim eğrisi üzerinde doğrusal bölgelerin gösterimi	144
6.26. B3S2 kirişi yük-sehim eğrisi üzerinde doğrusal bölgelerin gösterimi	145
6.27. B4S1 kirişi yük-sehim eğrisi üzerinde doğrusal bölgelerin gösterimi	145
6.28. B5 Referans kirişi yük-sehim eğrisi üzerinde doğrusal bölgelerin gösterimi .	145
6.29. G1S4 kirişi yük-sehim eğrisi üzerinde doğrusal bölgelerin gösterimi.....	146
6.30. G2S3 kirişi yük-sehim eğrisi üzerinde doğrusal bölgelerin gösterimi.....	146
6.31. G3S2 kirişi yük-sehim eğrisi üzerinde doğrusal bölgelerin gösterimi.....	146
6.32. G4S1 kirişi yük-sehim eğrisi üzerinde doğrusal bölgelerin gösterimi.....	147
6.33. G5 Referans kirişi yük-sehim eğrisi üzerinde doğrusal bölgelerin gösterimi .	147

6.34. S6 Referans kirişi yük-sehim eğrisi üzerinde doğrusal bölgelerin gösterimi .	147
6.35. G1S5 kirişi yük-sehim eğrisi üzerinde doğrusal bölgelerin gösterimi.....	148
6.36. G2S4 kirişi yük-sehim eğrisi üzerinde doğrusal bölgelerin gösterimi.....	148
6.37. G3S3 kirişi yük-sehim eğrisi üzerinde doğrusal bölgelerin gösterimi.....	148
6.38. G4S2 kirişi yük-sehim eğrisi üzerinde doğrusal bölgelerin gösterimi.....	149
6.39. G5S1 kirişi yük-sehim eğrisi üzerinde doğrusal bölgelerin gösterimi.....	149
6.40. G6 Referans kirişi yük-sehim eğrisi üzerinde doğrusal bölgelerin gösterimi .	149
6.41. S3 Referans kirişi yük-sehim eğrisi üzerinde doğrusal bölgelerin gösterimi .	150
6.42. B1S2 kirişi yük-sehim eğrisi üzerinde doğrusal bölgelerin gösterimi.....	150
6.43. B2S1 kirişi yük-sehim eğrisi üzerinde doğrusal bölgelerin gösterimi.....	150
6.44. B5 (B3) Referans kirişi yük-sehim eğrisi üzerinde doğrusal bölgelerin gösterimi	151
6.45. G1S2 kirişi yük-sehim eğrisi üzerinde doğrusal bölgelerin gösterimi.....	151
6.46. G2S1 kirişi yük-sehim eğrisi üzerinde doğrusal bölgelerin gösterimi.....	151
6.47. G3 Referans kirişi yük-sehim eğrisi üzerinde doğrusal bölgelerin gösterimi .	152
6.48. Birinci grup kirişlere (BFRP) ait yük-sehim grafikleri	152
6.49. Birinci grup kirişlere (GFRP) ait yük-sehim grafikleri.....	153
6.50. İkinci grup kirişlere (GFRP) ait yük-sehim grafikleri.....	153
6.51. Üçüncü grup kirişlere (BFRP) ait yük-sehim grafikleri.....	154
6.52. Üçüncü grup kirişlere (GFRP) ait yük-sehim grafikleri	154
6.53. İlk grup kirişlerinin referans çelik donatılı kirişe (S5 Referans) göre Naaman ve Jeong [40] süneklik oranları	157
6.54. İkinci grup kirişlerinin referans çelik donatılı kirişe (S6 Referans) göre Naaman ve Jeong [40] süneklik oranları	157
6.55. Üçüncü grup kirişlerinin referans çelik donatılı kirişe (S3 Referans) göre Naaman ve Jeong [40] süneklik oranları	158
7.1. Salt çelik donatılı kirişlerde farklı $D/(D+L)$ oranlarına karşılık güvenilirlik indisi değerleri [49].....	164
7.2. Salt çelik donatılı kirişlerde ACI 318M-11 [35]'in önerdiği dayanım azaltma katsayısı değişimi.....	165
7.3. Salt FRP donatılı kirişlerde ACI 440-1.R-15 [1] önerdiği dayanım azaltma katsayısı değişimi.....	167
7.4. Hibrit donatılı bir kirişe (2 ϕ 16 Steel + 3 ϕ 12.86 GFRP) ait analiz sonucu.....	171

7.5. Denge altı hibrit donatılı kirişler için dayanım azaltma katsayısı ilişkisi	175
7.6. Denge üstü hibrit donatılı kirişler için dayanım azaltma katsayısı ilişkisi.....	175
EK-4.1. Salt çelik donatılı S5 Referans elemanı beton dökümü öncesi.....	199
EK-4.2. Salt çelik donatılı S5 Referans elemanı eğilme testi sonrası.....	199
EK-4.3. B1S4 elemanı beton dökümü öncesi	200
EK-4.4. B1S4 elemanı eğilme testi sonrası.....	200
EK-4.5. B2S3 elemanı beton dökümü öncesi	201
EK-4.6. B2S3 elemanı eğilme testi sonrası.....	201
EK-4.7. B3S2 elemanı beton dökümü öncesi	202
EK-4.8. B3S2 elemanı eğilme testi sonrası.....	202
EK-4.9. B4S1 elemanı beton dökümü öncesi	203
EK-4.10. B4S1 elemanı eğilme testi sonrası.....	203
EK-4.11. B5 Referans elemanı beton dökümü öncesi	204
EK-4.12. B5 Referans elemanı eğilme testi sonrası.....	204
EK-4.13. G1S4 elemanı beton dökümü öncesi	205
EK-4.14. G1S4 elemanı eğilme testi sonrası	205
EK-4.15. G2S3 elemanı beton dökümü öncesi	206
EK-4.16. G2S3 elemanı eğilme testi sonrası	206
EK-4.17. G3S2 elemanı beton dökümü öncesi	207
EK-4.18. G3S2 elemanı eğilme testi sonrası	207
EK-4.19. G4S1 elemanı beton dökümü öncesi	208
EK-4.20. G4S1 elemanı eğilme testi sonrası	208
EK-4.21. G5 Referans elemanı beton dökümü öncesi	209
EK-4.22. G5 Referans elemanı eğilme testi sonrası	209
EK-4.23. Salt çelik donatılı S6 Referans elemanı beton dökümü öncesi.....	210
EK-4.24. Salt çelik donatılı S6 Referans elemanı eğilme testi sonrası.....	210
EK-4.25. G1S5 elemanı beton dökümü öncesi	211
EK-4.26. G1S5 elemanı eğilme testi sonrası	211
EK-4.27. G2S4 elemanı beton dökümü öncesi	212
EK-4.28. G2S4 elemanı eğilme testi sonrası	212
EK-4.29. G3S3 elemanı beton dökümü öncesi	213
EK-4.30. G3S3 elemanı eğilme testi sonrası	213
EK-4.31. G4S2 elemanı beton dökümü öncesi	214

EK-4.32. G4S2 elemanı eğilme testi sonrası	214
EK-4.33. G5S1 elemanı beton dökümü öncesi	215
EK-4.34. G5S1 elemanı eğilme testi sonrası	215
EK-4.35. G6 Referans elemanı beton dökümü öncesi	216
EK-4.36. G6 Referans elemanı eğilme testi sonrası	216
EK-4.37. Salt çelik donatılı S3 Referans elemanı beton dökümü öncesi.....	217
EK-4.38. Salt çelik donatılı S3 Referans elemanı eğilme testi sonrası.....	217
EK-4.39. B1S2 elemanı beton dökümü öncesi	218
EK-4.40. B1S2 elemanı eğilme testi sonrası.....	218
EK-4.41. B2S1 elemanı beton dökümü öncesi	219
EK-4.42. B2S1 elemanı eğilme testi sonrası.....	219
EK-4.43. B5 (B3) Referans elemanı beton dökümü öncesi	220
EK-4.44. B5 (B3) Referans elemanı eğilme testi sonrası	220
EK-4.45. G1S2 elemanı beton dökümü öncesi	221
EK-4.46. G1S2 elemanı eğilme testi sonrası	221
EK-4.47. G2S1 elemanı beton dökümü öncesi	222
EK-4.48. G2S1 elemanı eğilme testi sonrası	222
EK-4.49. G3 Referans elemanı beton dökümü öncesi	223
EK-4.50. G3 Referans elemanı eğilme testi sonrası	223
EK-5.1. S5 Referans elemanı eğilme testi sonrası çatlak haritası.....	224
EK-5.2. B1S4 elemanı eğilme testi sonrası çatlak haritası	224
EK-5.3. B2S3 elemanı eğilme testi sonrası çatlak haritası	224
EK-5.4. B3S2 elemanı eğilme testi sonrası çatlak haritası	224
EK-5.5. B4S1 elemanı eğilme testi sonrası çatlak haritası	224
EK-5.6. B5 Referans elemanı eğilme testi sonrası çatlak haritası	224
EK-5.1. S5 Referans elemanı eğilme testi sonrası çatlak haritası.....	225
EK-5.7. G1S4 elemanı eğilme testi sonrası çatlak haritası	225
EK-5.8. G2S3 elemanı eğilme testi sonrası çatlak haritası	225
EK-5.9. G3S2 elemanı eğilme testi sonrası çatlak haritası	225
EK-5.10. G4S1 elemanı eğilme testi sonrası çatlak haritası	225
EK-5.11. G5 Referans elemanı eğilme testi sonrası çatlak haritası	225
EK-5.12. S6 Referans elemanı eğilme testi sonrası çatlak haritası.....	226
EK-5.13. G1S5 elemanı eğilme testi sonrası çatlak haritası	226

EK-5.14. G2S4 elemanı eğilme testi sonrası çatlak haritası	226
EK-5.15. G3S3 elemanı eğilme testi sonrası çatlak haritası	226
EK-5.16. G4S2 elemanı eğilme testi sonrası çatlak haritası	226
EK-5.17. G5S1 elemanı eğilme testi sonrası çatlak haritası	226
EK-5.18. G6 Referans elemanı eğilme testi sonrası çatlak haritası	226
EK-5.19. S3 Referans elemanı eğilme testi sonrası çatlak haritası.....	227
EK-5.20. B1S2 elemanı eğilme testi sonrası çatlak haritası	227
EK-5.21. B2S1 elemanı eğilme testi sonrası çatlak haritası	227
EK-5.22. B5 (B3) Referans elemanı eğilme testi sonrası çatlak haritası	227
EK-5.19. S3 Referans elemanı eğilme testi sonrası çatlak haritası.....	228
EK-5.23. G1S2 elemanı eğilme testi sonrası çatlak haritası	228
EK-5.24. G2S1 elemanı eğilme testi sonrası çatlak haritası	228
EK-5.25. G3 Referans elemanı eğilme testi sonrası çatlak haritası	228

SİMGELER DİZİNİ

a	Mesnet ile yük noktası arasındaki mesafe
A_b	Abdelrahman süneklik değeri
A_{cs}	Çelik basınç donatı alanı
A_{frp}	Lifli Polimer Donatı (FRP) alanı
A_{s1}	Lei Pang'ın çalışmasında yer alan çelik donatı alanı
A_{st}	Çelik çekme donatı alanı
A_{tot}	Toplam çekme donatı alanı
b	Kiriş kesitinin genişliği
c	Kiriş basınç derinliği
C_c	Betonun eşdeğer dikdörtgen basınç bloğunda oluşan basınç kuvveti
C_{cr}	Kesitin tamamen çatladığı anda sahip olduğu basınç derinliği
C_E	Çevresel dayanım azaltma faktörü
C_s	Çelik donatısındaki basınç kuvveti
c_y	Kesitte çelik donatısının aktığı anda sahip olduğu basınç derinliği
d	Çekme donatısı etkili derinliği
D	Ölü yük
d_{cc}	Basınç donatısının en dış basınç lifine uzaklığı
d_f	Donatı (FRP) donatı çapı
DF	Deformabilite faktörü
DF_{mod}	Refai'nin çalışmasında yer alan modifiye edilmiş deformabilite faktörü
d_s	Çelik donatı çapı
D_{uh}	Lei Pang'ın çalışmasında yer alan hibrit donatılı kiriş nihai deformasyonu
D_{yh}	Lei Pang'ın çalışmasında yer alan hibrit donatılı kirişte akma anındaki deformasyon
E	Elastisite Modülü
$E_{0.001}$	Tomlinson-Jeager süneklik tanımında servis sınır durumunda tüketilen toplam enerji

E_c	Betonun elastisite Modülü
E_e	Elastik enerji
E_f	Lifli Polimer Donatının (FRP) elastisite modülü
E_s	Çelik donatının elastisite modülü
$E_{s-(L/180)}$	Vijay and GangaRao süneklik tanımında servis sınır durumunda tüketilen toplam enerji
E_{s1}	Çelik donatının pekleşme bölgesinde sahip olduğu elastisite modülü
E_{tot}	Toplam tüketilen enerji
E_y	Akma anına kadar toplam tüketilen enerji
f'_c	Todeschini ve Hognestad Beton Modelinde betonun maksimum basınç dayanımı
f_c	Betonun silindir numune basınç dayanımı
$f_{c(i)}$	Beton basınç bloğu içerisinde alınan herhangi bir katmanın alt seviyesindeki basınç gerilmesi
$f_{c(i+1)}$	Beton basınç bloğu içerisinde alınan herhangi bir katmanın üst seviyesindeki basınç gerilmesi
$f_c(\epsilon_c)$	Todeschini/Hognestad Beton Modellerinde betonun birim deformasyona bağlı gerilme fonksiyonu
f_{ck}	Betonun karakteristik basınç dayanımını
$f_{cs}(\epsilon_{cs})$	Çelik basınç donatısının birim deformasyona bağlı gerilme fonksiyonu
f_{ctf}	Betonun eğilmede çekme dayanımı
f_{ctm}	Eurocode 2'ye göre betonun ortalama aksenal çekme dayanımı
$f_{ctm,fl}$	Eurocode 2'ye göre betonun eğilmede çekme dayanımı
$f_{frp}(\epsilon_{frp})$	FRP çekme donatısının birim deformasyona bağlı gerilme fonksiyonu
f_{fu}	FRP donatısı çekme (kopma) dayanımı
f_{fu}^*	Üretici tarafından garanti edilen FRP donatı çekme dayanımı
f_r	ACI 318M-11'e göre betonun eğilmede çekme dayanımı
$f_s(\epsilon_{st})$	Çelik çekme donatısının birim deformasyona bağlı gerilme fonksiyonu

F_t	Betonun maksimum birim deformasyonunun çatlama birim deformasyonuna oranı
f_u	Çelik donatı kopma (çekme) dayanımı
f_y	Çelik donatı akma dayanımı
g	Sınır durum fonksiyonu
h	Kiriş kesit yüksekliği
h_0	Yoon'un çalışmasında yer alan çelik donatı derinliği
h_1	Yoon'un çalışmasında yer alan Lifli Polimer Donatı (FRP) derinliği
I	Atalet momenti
I_{cr}	Tamamen çatlamış kesit atalet momenti
I_{cr2}	İkinci tamamen çatlamış kesit atalet momenti
I_e	Etkili atalet momenti
I_{e2}	Çelik donatılar aktıktan sonra deformasyon hesaplarında kullanılan etkili atalet momenti
I_g	Brüt kesit atalet momenti
I_m	Modifiye edilmiş kesit atalet momenti
I_{ucr}	Dönüştürülmüş kesit atalet momenti
I_y	Akma anında kesitin sahip olduğu atalet momenti
I_{y2}	İkinci akma atalet momenti (akma anından hemen sonra)
I_{y-yoon}	Yoon'un çalışmasında yer alan çelik donatının akmasından hemen sonraki etkili atalet momenti
J_{cr}	Aiello ve Ombres'in çalışmasında yer alan çatlamış kesit atalet momenti
J_e	Tomlinson-Jeager süneklik değeri
J_{ecal}	Aiello ve Ombres tarafından kalibre edilmiş etkili atalet momenti
J_g	Aiello ve Ombres'in çalışmasında yer alan brüt kesit atalet momenti
$k_2(\epsilon_c)$	Todeschini Beton Modelinde betonun birim deformasyona bağlı eşdeğer dikdörtgen basınç bloğu derinlik katsayısı fonksiyonu
L	Kiriş net açıklığı
L	Hareketli yük

L_{ss}	Kiriş kesme açıklığı
M_a	Uygulanan moment
M_{cc}	Beton basınç bloğunun eğilme momentine katkısı
M_{cr}	İlk çatlama momenti
M_{cr1}	Prizmatik numune dayanımı ve çatlamamış dönüştürülmüş kesit atalet momenti ifadesi kullanılarak tahmin edilen kiriş ilk çatlama momenti
$M_{cr1,ACI}$	ACI 318M-11'e göre dönüştürülmüş kesit atalet momenti ifadesi kullanılarak tahmin edilen kiriş ilk çatlama momenti
$M_{cr1,EC2}$	Eurocode 2'ye göre dönüştürülmüş kesit atalet momenti ifadesi kullanılarak tahmin edilen kiriş ilk çatlama momenti
M_{cr2}	Prizmatik numune dayanımı ve brüt kesit atalet momenti ifadesi kullanılarak tahmin edilen kiriş ilk çatlama momenti
$M_{cr2,ACI}$	ACI 318M-11'e göre brüt kesit atalet momenti ifadesi kullanılarak tahmin edilen kiriş ilk çatlama momenti
$M_{cr2,EC2}$	Eurocode 2'ye göre brüt kesit atalet momenti ifadesi kullanılarak tahmin edilen kiriş ilk çatlama momenti
M_{cs}	Basınç donatısının eğilme momentine katkısı
M_{max}	Maksimum moment
M_n	Kiriş karakteristik moment kapasitesi
M_s	Servis momenti
M_T	Çekme donatısının eğilme momentine katkısı
M_u	Moment kapasitesi
$M_{u,the}$	Kiriş teorik moment kapasitesi
M_{uh}	Lei Pang'ın çalışmasında yer alan hibrit donatılı kiriş nihai momenti
M_y	Akma anı moment değeri
M_{yh}	Lei Pang'ın çalışmasında yer alan hibrit donatılı kiriş akma momenti
M_{ys}	Lei Pang'ın çalışmasında yer alan hibrit donatılı kiriş akma momenti
n	Çelik donatının betona dönüşümü için kullanılan modüler oran
n_f	FRP donatının betona dönüşümü için kullanılan modüler oran

n'_f	Lifli Polimer Donatı (FRP) sayısı
n'_s	Lifli Polimer Donatı (FRP) sayısı
P	Yük
P_1	İlk çatlama yükü
P_2	Akma yükü
P_3	Nihai yük
P_{cr}	Çatlama yükü
$P_{cr,exp}$	Deneysel çatlama yükü
P_{cr1}	Prizmatik numune dayanımı ve dönüştürülmüş kesit atalet momenti ifadesi kullanılarak tahmin edilen kiriş ilk çatlama yükü
$P_{cr1,ACI}$	ACI 318M-11'e göre dönüştürülmüş kesit atalet momenti ifadesi kullanılarak tahmin edilen kiriş ilk çatlama yükü
$P_{cr1,EC2}$	Eurocode 2'ye göre dönüştürülmüş kesit atalet momenti ifadesi kullanılarak tahmin edilen kiriş ilk çatlama yükü
P_{cr2}	Prizmatik numune dayanımı ve brüt kesit atalet momenti ifadesi kullanılarak tahmin edilen kiriş ilk çatlama yükü
$P_{cr2,ACI}$	ACI 318M-11'e göre brüt kesit atalet momenti ifadesi kullanılarak tahmin edilen kiriş ilk çatlama yükü
$P_{cr2,EC2}$	Eurocode 2'ye göre brüt kesit atalet momenti ifadesi kullanılarak tahmin edilen kiriş ilk çatlama yükü
P_f	Göçme olasılığı
$P_{f-cracked}$	Kesitin tamamen çatladığı anda kiriş yükü
$P_{max,exp}$	Deneysel yük kapasitesi
$P_{max,pre}$	Teorik (tahmin edilen) yük kapasitesi
P_n	Lau ve Pam'ın çalışmasında teorik yük kapasitesi
$P_{u,the}$	Kirişin yük kapasitesi
P_y	Akma anı yük değeri
Q	Yük kombinasyonlarından elde edilen gerekli dayanım
R	Karakteristik dayanım
S	Naaman-Jeong süneklik tanımında ortalama eğim
S_1	Yük deformasyon eğrisinin başlangıç eğimi (ilk çatlama meydana gelene kadar)

S_2	İlk çatlama noktası ile akma noktası arasındaki eğim
S_3	Akma noktası ile kırılma noktası arasındaki eğim
S_p	Spadea süneklik değeri
T_f	FRP donatıdaki çekme kuvveti
T_s	Çelik donatıdaki çekme kuvveti
u_f	Ge'nin çalışmasında yer alan süneklik değerleri
U_H	Lei Pang'ın çalışmasında yer alan hibrit donatılı enerji sönümleme kapasitesi
u_s	Ge'nin çalışmasında yer alan hibrit donatılı kiriş ile aynı donatı oranına sahip olan çelik donatılı kirişin sünekliği
U_S	Lei Pang'ın çalışmasında yer alan salt çelik donatılı dönüştürülmüş kirişin enerji sönümleme kapasitesi
VG	Vijay and GangaRao süneklik değeri
w_s	Ge'nin çalışmasında yer alan salt çelik ya da salt FRP donatılı kirişlerin moment eğrilik eğrisi altındaki toplam alan
w_s^p	Ge'nin çalışmasında yer alan hibrit donatılı kirişlerin moment eğrilik eğrisi altındaki toplam alan
y'	Kesit ağırlık merkezinin basınç dış yüzüne uzaklığı
y_t	Betonun dış çekme yüzünden tarafsız eksene olan uzaklığı
Z	Zou süneklik değeri
α_b	ACI 440R-96'da yer alan Lifli Polimer Donatı (FRP) ile betona arasındaki aderansa bağlı katsayı
α_{cal}	Aiello ve Ombres tarafından kalibre edilmiş Lifli Polimer Donatı (FRP) ile betona arasındaki aderansa bağlı katsayı
β	Güvenilirlik indisi
β_1	Tarafsız eksen ile eşdeğer dikdörtgen gerilme basınç bloğu yüksekliği arasındaki oran
$\beta_1(\epsilon_c)$	Todeschini Beton Modelinde betonun birim deformasyona bağlı eşdeğer dikdörtgen basınç bloğu genişlik katsayısı fonksiyonu
β_{cal}	Aiello ve Ombres tarafından kalibre edilmiş atalet momenti azaltma katsayısı
β_d	Atalet momenti azaltma katsayısı
β_T	Hedef güvenilirlik indisi

δ	Kiriş orta açıklık deformasyonu
Δ_1	Abdelrahman süneklik tanımında kirişin çatlamamış olması durumunda nihai deformasyon değeri
Δ_{cr}	Zou süneklik tanımında kirişin ilk çatlama deformasyonu
$\delta_{f-cracked}$	Kesitin tamamen çatladığı anda kiriş deformasyonu
ΔP	Hibrit donatılı kirişlerde akma anından sonra, salt FRP donatılı kirişlerde kesitin tamamen çatlamasından sonra meydana gelen ilave yükler
δ_u	Maksimum yükün %85'ine düştüğü andaki kiriş deformasyonu
Δ_u	Nihai deformasyon değeri
Δ_y	Akma deformasyon değeri
δ_y	Akma anında kiriş orta açıklık deformasyonu
$\Delta\delta$	Hibrit donatılı kirişlerde akma anından sonra, salt FRP donatılı kirişlerde kesitin tamamen çatlamasından sonra meydana gelen ilave deformasyonlar
ϵ_c	Betonun en dış basınç lifinin birim deformasyonu
ϵ_{cs}	Çelik basınç donatısının birim deformasyonu
ϵ_{cu}	Betonun ezilme birim deformasyon değeri
ϵ_{frp}	FRP çekme donatısının birim deformasyonu
ϵ_{fu}	FRP donatısı kopma birim deformasyonu
ϵ_o	Betonun maksimum gerilmesine karşılık gelen birim deformasyon değeri
ϵ_{sh}	Çelik donatının pekleşmeye başladığı anda sahip olduğu birim deformasyon değeri
ϵ_{st}	Çelik çekme donatısının birim deformasyonu
ϵ_u	Çelik donatının kopma birim deformasyonu
ϵ_y	Çelik donatı akma birim deformasyonu
λ	Hata faktörü
μ	Deplasman süneklik oranı
μ_D	İhtiyaç duyulan süneklik değeri
μ_h	Lei Pang'ın çalışmasında yer alan süneklik indeksi
μ_{NJ}	Naaman-Jeong süneklik değeri
μ_Q	Gerekli dayanım değerlerinin ortalaması

μ_R	Dayanım değerlerinin ortalaması
ξ_n	Yoon'un çalışmasında yer alan basınç derinliği
ρ_f	FRP donatı oranı
$\rho_{f,b}$	Lei Pang'ın çalışmasında yer alan hibrit donatılı kirişlerde kritik donatı oranı
ρ_s	Çelik donatı oranı
$\rho_{s,b}$	Lei Pang'ın çalışmasında yer alan hibrit donatılı kirişlerde akmanın gerçekleşmesi için sınır donatı oranı
$\rho_{sf,f}$	Lei Pang'ın çalışmasında yer alan efektif FRP donatı oranı (dayanımları oranınca dönüştürülerek)
$\rho_{sf,s}$	Lei Pang'ın çalışmasında yer alan efektif çelik donatı oranı (elastisite modülleri oranınca dönüştürülerek)
σ_Q	Gerekli dayanım değerlerinin standart sapması
σ_R	Dayanım değerlerinin standart sapması
Φ^{-1}	Standart normal dağılım fonksiyonunun tersi
φ_u	Nihai eğrilik değeri
φ_{uh}	Lei Pang'ın çalışmasında yer alan hibrit donatılı kiriş nihai eğriliği
φ_{us}	Lei Pang'ın çalışmasında yer alan çelik donatılı kiriş (salt çelik donatılı ya da dönüştürülmüş salt çelik donatılı) nihai eğrilik
φ_y	Akma anı eğrilik değeri
φ_{yh}	Lei Pang'ın çalışmasında yer alan hibrit donatılı kiriş akma eğriliği
φ_{ys}	Lei Pang'ın çalışmasında yer alan çelik donatılı kiriş (salt çelik donatılı ya da dönüştürülmüş salt çelik donatılı) akma eğriliği
ψ	Ge'nin çalışmasında yer alan enerji absorbe katsayısı
ψ_s	Refai'nin çalışmasında yer alan servis eğrilik değeri
ψ_u	Refai'nin çalışmasında yer alan nihai eğrilik değeri
ψ_y	Refai'nin çalışmasında yer alan akma anı eğrilik değeri
ϕ	Dayanım azaltma katsayısı
$\phi \cdot R$	Tasarım dayanımı
ϕ_{Tahmin}	Tahmin edilen dayanım azaltma katsayısı

KISALTMALAR DİZİNİ

AFRP	Aramid Lifli Polimer Donatı
BFRP	Bazalt Lifli Polimer Donatı
CFRP	Karbon Lifli Polimer Donatı
COV	Değişim Katsayısı
DF	Deformabilite Faktörü
FRP	Lifli Polimer Donatı
GFRP	Cam Lifli Polimer Donatı
MR	Manyetik Rezonans
YDKT	Yük ve Dayanım Katsayıları Tasarımı

1. GİRİŞ

Buzlanmaya karşı tuzlama yapılan köprüler, betonarme yollar ile deniz yapıları gibi agresif ortamlara maruz kalan yapılarda nem, sıcaklık ve kimyasalların (sülfat, klor, vb.) etkisiyle geleneksel betonarme donatısı olan çelik çubuklar korozyona uğrar. Korozyonun donatılarda meydana getirdiği kesit kayıpları ve beton çatlakları, yapısal elemanların ve dolayısıyla yapıların taşıma güçlerinde ve rijitliklerinde azalmalara ve kullanım (servis) kabiliyetlerinde kayba neden olmaktadır. Ayrıca, çelik donatı korozyonu betonarme yapıların hizmet ömrünün kısılmasında en önemli etkenlerden biri olarak düşünülmektedir. Korozyon etkilerine karşı yapıların hizmetlerini güvenli bir şekilde sürdürebilmeleri için gerekli olan bakım maliyetleri, yapım maliyetlerini dahi aşabilmekte ve ekonomik kayıplara sebep olmaktadır. Korozyon sebebiyle tahrip olmuş bir köprü ayağı ve bir bina kirişi, sırasıyla Şekil 1.1 ve Şekil 1.2’de gösterilmektedir.



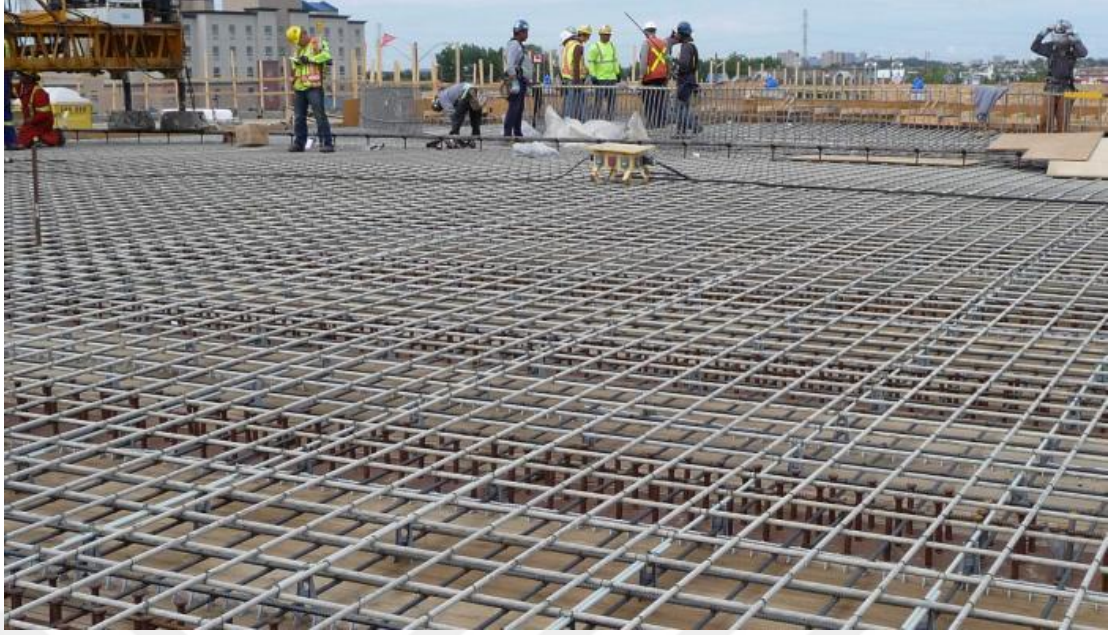
Şekil 1.1. Korozyon sebebiyle tahrip olmuş bir köprü ayağı



Şekil 1.2. Korozyon sebebiyle tahrip olmuş bir kiriş

Pek çok araştırmacı, donatı korozyonu probleminin önüne geçebilmek için çeşitli yöntemler geliştirmiştir. Bu yöntemlerden biri de korozyon dayanımı yüksek olan lifli polimer donatıların (FRP) çelik donatılar yerine kullanılmasıdır. FRP donatılar, barındırdığı lif türüne göre isimlendirilen (AFRP- Aramid Lifli Polimer Donatı, BFRP-Bazalt Lifli Polimer Donatı, CFRP-Karbon Lifli Polimer Donatı ve GFRP-Cam Lifli Polimer Donatı) ve bu liflerin farklı reçine türleri (Polyester, Vinyl ester, epoksi) ile sargılanması sonucu oluşturulan donatı çubuklardır. Ancak bu donatıların çelik donatılardan farklı mekanik özelliklere sahip olmaları, yapı davranışı üzerindeki etkilerinin iyi bir şekilde anlaşılması gerekliliğini ortaya çıkarmaktadır. Bu hususta geçmişte birçok çalışma yapılmış ve günümüzde de yeni çalışmalar yapılmaktadır.

FRP donatıların yüksek çekme dayanımına sahip olma, korozyona uğramama ve manyetik olmama gibi özellikleri göz önünde bulundurularak, bu donatıların korozyon riski bulunan ve eğilme etkisine maruz kalan yapısal elemanlarda kullanıma uygun olduğu ifade edilebilir. Köprü tabliyeleri, havaalanları, hastane MR (Manyetik Rezonans) alanları, beton yollar, tüneller, iskele ve liman yapılarında bu donatıların kullanımı gün geçtikçe yaygınlık kazanmaktadır. Şekil 1.3 ve Şekil 1.4'te tamamı FRP donatılar kullanılarak beton dökümü için hazırlanmış köprü tabliyesi örneklerine yer verilmektedir.



Şekil 1.3. GFRP donatılar kullanılarak inşa edilen bir köprü tabliyesi



Şekil 1.4. FRP donatılı bir köprü tabliyesi

FRP donatıların korozyona uğramama, hafif olma, manyetik olmama, yüksek çekme ve yorulma mukavemetine sahip olma gibi özellikleri yanında, göz ardı edilmemesi gereken olumsuz özellikleri de bulunmaktadır. Bu olumsuz özelliklerin başlıcaları, FRP donatıların düşük elastisite modülü değerleri ile akma bölgesi bulundurmayan

doğrusal gerilme birim deformasyon eğrileri olarak gösterilebilir. FRP malzemelerin elastisite modülü değerlerinin düşük olması, salt FRP donatılı elemanlarda önemli kullanım problemlerinin ortaya çıkmasına sebep olmaktadır. Bu gibi elemanlarda kullanım yükleri altındaki sehimler ve çatlak genişlikleri tolere edilebilir sınırların ötesine geçmektedir. Ayrıca, bu düşük elastisite modülü değerleri, FRP donatı çubuklarının basınç kuvvetleri altında çabuk burkulmalarına ve dolayısıyla kolon donatısı olarak kullanıma uygun olmamalarına neden olmaktadır. Bu malzemelerin gerilme-birim deformasyon eğrilerinde belirgin elastik ötesi bölgelerin bulunmaması ve deformasyon kapasitelerinin sınırlı olması da, salt FRP donatılı eğilme elemanlarında süneklik problemlerini ortaya çıkarmaktadır. Bütün bu olumsuzluklar, salt FRP donatılı elemanların tasarımlarında süneklik ve kullanılabilirlik sınır durumlarına özel dikkat edilmesi gerekliliğini doğurmuştur (ACI 440.1R-15 [1]). Süneklik ve kullanılabilirlik problemlerinin yanında, pahalı olma ve betona tutunma kabiliyetlerinin çelik çubuklara göre kısıtlı olması da FRP donatı çubuklarının dezavantajları olarak sıralanabilir.

Salt FRP donatılı ve salt çelik donatılı kirişlerin yukarıda belirtilen dezavantajlarını ortadan kaldırabilmek amacıyla çekme bölgesinde FRP donatılar ile birlikte çelik donatıların yer aldığı hibrit betonarme kiriş tasarımı, etkili bir çözüm olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu yöntem ile FRP donatıların yüksek korozyon ve çekme dayanımından, çelik donatıların ise yüksek elastisite modülü ve süneklik özelliklerinden faydalanılmaktadır. Böylelikle yeterli süneklik ve dayanıma sahip olması beklenen hibrit donatılı kirişlerin, salt FRP donatılı kirişlere göre daha iyi kullanım performansı (düşük deformasyon ve çatlak genişliği) göstereceği açıktır.

Hibrit donatılı kirişler ile gerçekleştirilen çalışmalar, genellikle eğilme momenti kapasitesi, kırılma modları, çatlak ve deformasyon konuları üzerinde yoğunlaşmıştır. Ancak süneklik konusu üzerinde fazlaca durulmamış ve bu kirişler için hangi süneklik tanımının daha uygun olduğu konusu da tartışmalı olarak kalmıştır. Bu çalışmada öncelikle çelik donatı oranının toplam donatı oranı içerisindeki değişiminin hibrit donatılı kiriş sünekliğini nasıl etkilediği araştırılmıştır. Bu kapsamda diğer çalışmalardan farklı olarak, karşılaştırma yapılacak elemanların taşıma güçleri ve toplam donatı oranı sabit tutularak çelik donatı oranının süneklik değerleri üzerindeki

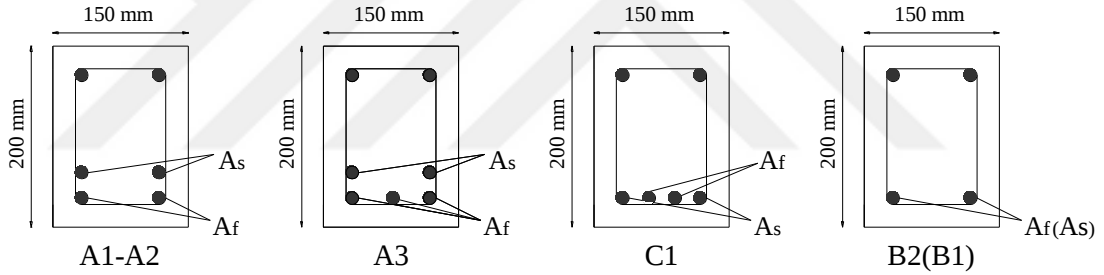
net etkisi gözlemlenmek istenmiştir. Ayrıca, literatürde yer alan farklı süneklik tanımları göz önünde bulundurularak hibrit donatılı kirişler için hangi süneklik tanımının daha uygun olduğu da araştırılmıştır.

Literatürde, hibrit donatılı kirişler üzerine gerçekleştirilmiş çalışmalar denge üstü donatılı kirişleri (FRP donatısı kopmadan önce betonun ezilmesi ile taşıma gücüne ulaşan kirişler) kapsamaktadır. FRP donatısı kopması beton ezilmesinden daha gevrek olduğu için, birçok yönetmelik (ACI 440.1R-15 [1], CSA-S806-12 [2], ISIS Canada-2007 [3]) salt FRP donatılı kirişlerin denge üstü donatı oranına sahip olacak şekilde tasarlanmasını öngörür. Ancak hibrit donatılı kirişler için bu durum zorunluluk arz etmemekte ve bu kirişler hem denge altı hem de denge üstü donatılı olarak tasarlanabilmektedir. Çünkü, ister denge altı ister denge üstü donatılı olsun, hibrit donatılı kirişlerde çelik donatılar kiriş taşıma gücüne ulaşmadan önce akmakta ve bu akma sayesinde istenen süneklik seviyelerine ulaşabilmektedir. Bu bağlamda, mevcut deneysel çalışmada hem denge altı hem de denge üstü donatılı hibrit donatılı kirişlere yer verilmiştir. Çalışmanın deneysel kısmı üç farklı bölümden oluşmaktadır. İlk kısım, BFRP ve GFRP donatılı ve denge üstü donatı oranına sahip hibrit donatılı kirişlerden, ikinci kısım GFRP donatılı ve denge üstü donatı oranına sahip hibrit donatılı kirişlerden ve üçüncü kısım ise BFRP ve GFRP donatılı ve denge altı donatı oranına sahip hibrit donatılı kirişlerden oluşmaktadır. Böylelikle, farklı kırılma modu ve FRP donatı tipine sahip olan hibrit donatılı kirişlerin sünekliklerinin, farklı süneklik tanımları ile değerlendirilme imkânı ortaya çıkmıştır. Ayrıca toplam donatı oranı içerisindeki çelik donatı oranının parametre olarak seçildiği bu çalışma, araştırmacılara hibrit donatılı kirişlerin eğilme davranışı, enerji sönümleme kapasitesi ve deformasyonları hakkında değerlendirme ve yorum yapma olanağı da sunmuştur. Gerçekleştirilen araştırmalar neticesinde, hibrit donatılı kirişlerin yük taşıma kapasiteleri, yük-sehim tahminleri, ilk çatlama momentleri ve dayanım azaltma katsayıları için modeller geliştirilmiştir. Ayrıca hibrit donatılı kirişler için uygun süneklik tanımı belirlenmiştir.

2. LİTERATÜR

Bu bölümde hibrit FRP-çelik donatılı kirişler ile gerçekleştirilmiş deneysel, nümerik ve analitik tüm çalışmalara detaylı bir biçimde yer verilmiştir. Bu, çalışmanın diğer çalışmalardan farkının ortaya konması, literatürdeki yeri ve öneminin en iyi biçimde anlaşılmasına olanak sağlamıştır.

Hibrit donatılı betonarme elemanların eğilme davranışları üzerine Aiello ve Ombres [4] tarafından gerçekleştirilen çalışmada, çelik donatıların korozyondan korunması amacıyla çelik çekme çubuklarının daha iç katmanda, aramid lifli polimer (AFRP) donatıların ise en dış katmanda yer aldığı bir tasarım esas alınmıştır. Bu tasarım ile birlikte iyi bir seviyede süneklik ve rijitlik garanti edilmektedir. Şekil 2.1’de çalışmada yer alan kirişlere yer verilmiştir.



Şekil 2.1. Aiello ve Ombres’in çalışmasında yer alan kirişlere ait en kesitler

Hibrit donatılı kirişler; sehim, eğrilik, süneklik, çatlama başlıkları altında irdelenmiştir. Salt AFRP donatılı kirişlere kıyasla hibrit donatılı kirişlerde, çelik donatıların katkısıyla çatlak genişlikleri ve servis yükü seviyesinde kiriş deformasyonlarında önemli ölçüde azalmalar gözlemlenmiştir. Kiriş yük-deformasyon ilişkileri, ACI 440R-96 (ACI 1996b) [5] (Denklem 2.1-2.2) ile Faza ve GangaRao’nun [6] (Denklem 2.3) önermiş olduğu etkili atalet momenti ifadeleri kullanılarak tahmin edilmiştir. Ayrıca her bir kiriş için, farklı katsayıların belirlenmesi (Çizelge 2.1) ile kalibre edilmiş efektif atalet momenti ifadesi tanımlanmıştır (Denklem 2.4). Bu ifade ile hibrit donatılı kirişlerin yük-deformasyon ilişkisi için

deneysel verilerle çok uyumlu tahminler yapabilen teorik bir model önerilmiştir. Daha sonra deneysel veriler ile analitik fomüller arasındaki karşılaştırmalar yapılmıştır. ACI 440R-96 [5] etkili atalet momenti ifadesi kullanılarak gerçekleştirilen hibrit donatılı kiriş deformasyon tahminlerinin düşük yük seviyeleri için (yük kapasitenin %50'sine karşılık gelen deformasyonlar) deneysel verilerle uyumlu olduğu ancak, yük seviyesinin artışıyla birlikte (yük kapasitenin %50'sinden sonrasına karşılık gelen deformasyonlar) deneysel verilerden daha farklı tahminlerin elde edildiği gözlemlenmiştir.

$$I_e = \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right)^3 \beta_d I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right)^3 \right] I_{cr} \leq I_g \quad (2.1)$$

$$\beta_d = \alpha_b \left(1 + \frac{E_f}{E_s} \right) \text{ ve } \alpha_b = 0.5 \quad (2.2)$$

$$I_m = \frac{23I_{cr}I_e}{8I_{cr} + 15I_e} \quad (2.3)$$

$$J_{ecal} = \alpha_{cal} J_g \left(\frac{M_{cr}}{M_{max}} \right)^3 + \beta_{cal} J_{cr} \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_{max}} \right)^3 \right] \quad (2.4)$$

Çizelge 2.1. Kalibre edilmiş etkili atalet momenti ifadesinde yer alan katsayılar

Kiriş Adı	α_{cal}	β_{cal}	R^2
A1	1.58	0.43	0.999
A2	1.54	0.53	0.994
A3	3.22	0.16	0.992
B2	1.20	0.31	0.997
C1	0.12	1.24	0.995

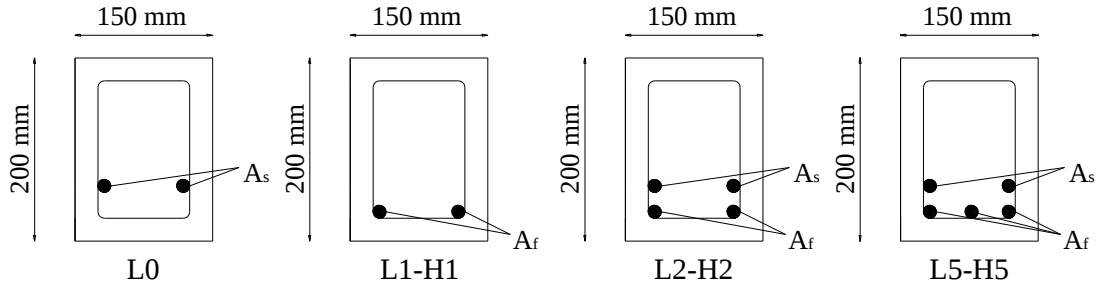
Çalışmada süneklikler Vijay ve GangaRao'nun [7] önermiş olduğu deformabilite faktörü (DF) ifadesi ile değerlendirilmiştir. Bu tanıma göre süneklik, moment eğrilik grafiği altındaki toplam alanın eğriliğin $0.005/d$ değeri ile sınırlandırılmış moment eğrilik grafiği alanına oranı olarak ifade edilmiştir. Bu tanıma göre DF değeri en büyük

ve en küçük olan elemanlar sırasıyla salt FRP donatılı (B2) ve toplam donatı oranı en büyük (A3) olan kirişler olduğu ifade edilmiştir. Çizelge 2.2’de çalışmada yer alan tüm kirişlere ait DF değerleri yer almaktadır. Bu çizelgeye göre, toplam donatı oranı içerisindeki çelik donatı oranı ile DF değerlerinin ilişkilendirilememesinin temel sebebi kirişlerin taşıma gücü arasındaki farklılıktan kaynaklanmaktadır.

Çizelge 2.2. Aiello ve Ombres’in çalışmasında yer alan kirişlere ait deformabilite değerleri

Kiriş Adı	Deformabilite Faktörü (DF)	A_{st}	A_{frp}	A_{st}/A_{tot}
A1	10.39	100.48	88.31	0.53
A2	7.53	100.48	157.00	0.39
A3	3.95	226.08	235.50	0.49
B2	16.21	-	88.31	-
C1	6.99	100.48	88.31	0.53

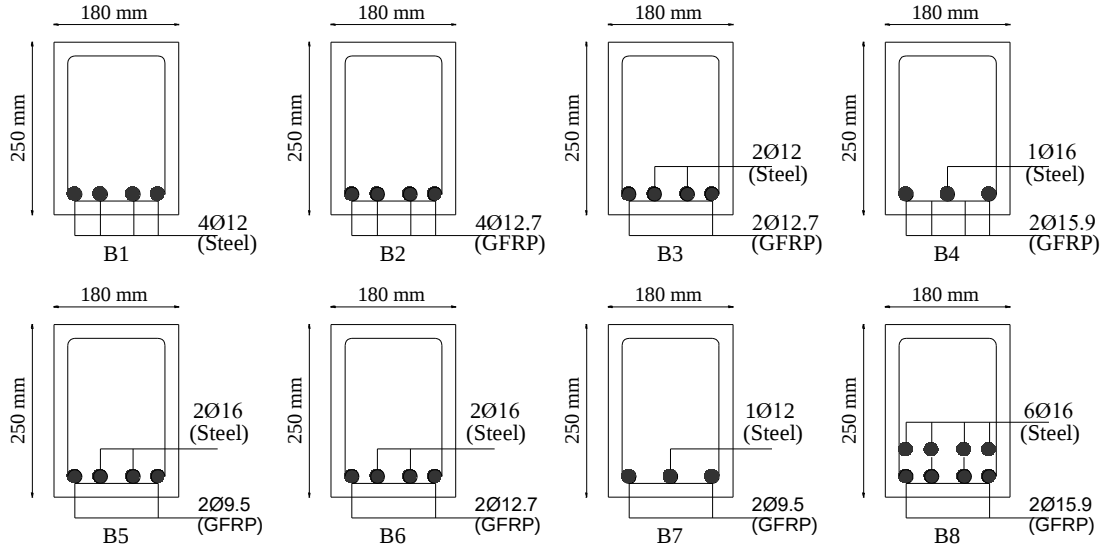
Hibrit GFRP-çelik donatılı kirişlerin eğilme davranışları ve beton basınç dayanımının bu davranışa etkileri Leung ve Balendran [8] tarafından araştırılmıştır. Bu kapsamda 4’ü düşük basınç dayanımlı (C30), 3 ü yüksek basınç dayanımlı beton (C50) kullanılarak toplam 7 adet kirişin eğilme testi gerçekleştirilmiştir. Tüm kirişler (L0 elemanı haricinde) aynı donatı oranı ve konfigürasyonuna sahip olup bu kirişler ile gerçekleştirilen testler, beton basınç dayanımının eğilme davranışı üzerindeki etkilerini ortaya koyma amacı taşımaktadır. Kiriş tasarımında çelik donatıların iç katmanda ve GFRP donatıların en dış katmanda konumlandırılması ile durabilite garanti altına alınmak istenmiştir. Şekil 2.2’de eğilme testleri gerçekleştirilen kirişlere ait en kesitlere yer verilmiştir.



Şekil 2.2. Leung ve Balendran'ın çalışmasında yer alan kirişlere ait en kesitler

Çalışmada hibrit donatılı kirişlerde GFRP donatı miktarındaki artışın beton dayanımına bakılmaksızın yük taşıma kapasitesini arttırdığı gözlemlenmiştir. Beton basınç dayanımı artışının eğilme kapasitesini kesme kapasitesine göre daha fazla artırması sebebiyle beklenen kırılma modunun (eğilme kırılma modu) yerine kesme kırılmasının gerçekleşme ihtimaline karşı kirişlerde yeterli enine donatı kullanılması gerekliliğine dikkat çekilmiştir. Hibrit donatılı kirişlerde salt FRP donatılı kirişlere göre çatlak sayısının daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Hibrit donatılı kirişlerde çelik donatıların akmasından sonra FRP donatıların daha etkin bir rol aldığı ifade edilmiştir.

Qu ve arkadaşları [9] tarafından gerçekleştirilen çalışmada, hibrit GFRP-çelik donatılı betonarme kirişlerin eğilme davranışları hem deneysel ve hem de teorik olarak incelenmiştir. Şekil 2.3'te çalışmada deneyleri gerçekleştirilen kirişlere ait en kesitlere yer verilmektedir. Donatı miktarı ve FRP/çelik donatı oranının ana parametreler olarak belirlendiği bu çalışmada, geliştirilen model aracılığı ile kirişlerin yük-deformasyon ilişkileri tahmin edilmiştir. Eğilme kapasitesi, çatlak genişliği ve deformasyonlar için geliştirilen modeller ile tahminler yapılarak deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. Bischoff [10] tarafından önerilen etkili atalet momenti tanımı ile servis yükü deformasyonları deneysel verilerle uyumlu bir biçimde tahmin edilebilirken, yük seviyesi arttıkça deneysel verilerden oldukça farklı tahminler (büyük deformasyonlar) elde edilmiştir.



Şekil 2.3. Qu'nun çalışmasında yer alan kirişlere ait en kesitler

Yük deplasman tahmini için geliştirilen teorik modelde ise Nayal ve Rasheed [11] tarafından önerilen çekme rijitleşmesi (tension stiffening) ifadesi kullanılmıştır (Denklem 2.5-2.6):

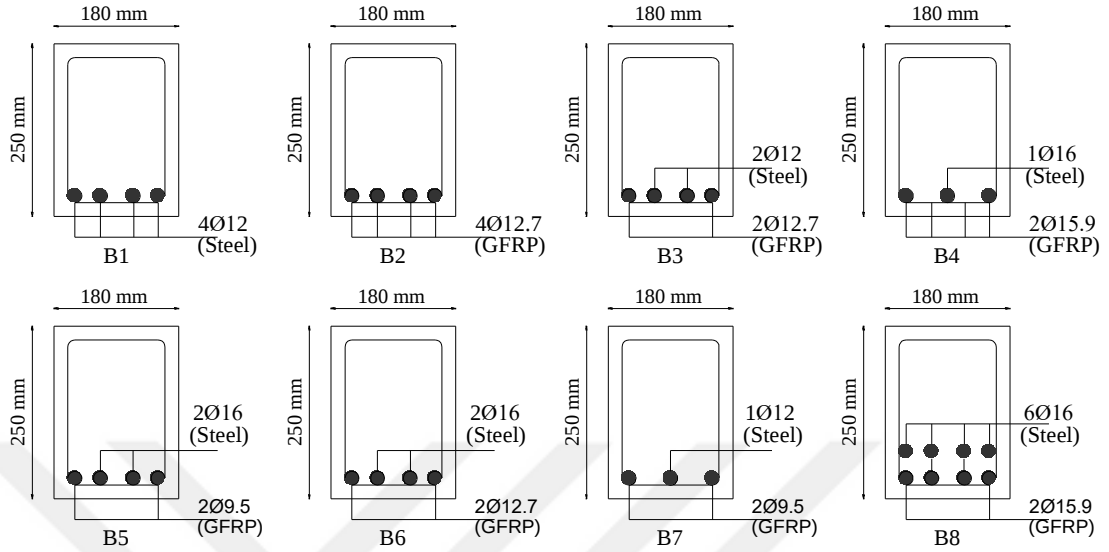
$$F_t = 124 - 0.05\lambda \quad (2.5)$$

$$\lambda = \frac{E_s A_s + E_f A_f}{n'_s d_s + n'_f d_f} \quad (2.6)$$

F_t betonun maksimum çekme birim deformasyonunun, çatlama anındaki çekme birim deformasyonuna oranı olarak tanımlanmıştır. Çelik donatılar için F_t değerinin 10'a, FRP donatılar için ise 100'e eşit olduğu sonucuna ulaşılarak tahminler gerçekleştirilmiştir. n'_s , d_s , n'_f ve d_f sırasıyla çelik donatı sayısı, çelik donatı çapı, FRP donatı sayısı ve FRP donatı çaplarını ifade etmektedir. Teorik modelde çekme rijitleşmesinin (tension stiffening) dikkate alınmasıyla deformasyon tahminlerinin deneysel verilerle çok daha uyumlu hale geldiği ifade edilmiştir.

Eğilme dayanımı ve sünekliğin ana parametreler olarak belirlendiği Lau ve Pam [12]'in çalışmada; salt çelik, salt GFRP ve hibrit GFRP-çelik donatılı kirişlerin eğilme

testleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 2.4'te bu çalışmada yer alan kirişlere ait en kesitler yer almaktadır.



Şekil 2.4. Lau ve Pam'ın çalışmasında yer alan kirişlere ait en kesitler

Çalışmada kirişlerin süneklikleri nihai deplasman oranı (Δ_u/L) ve deplasman süneklik faktörü (μ) tanımları aracılığı ile değerlendirilmiştir. Hibrit donatılı kirişlerin salt GFRP donatılı kirişlere göre daha sünek olduğu ve salt GFRP donatılı kirişlerde donatı oranı artışının sünekliği arttırdığı ifade edilmiştir. Çizelge 2.3'te değişen A_{frp}/A_{st} oranları için süneklik değerlerine yer verilmektedir.

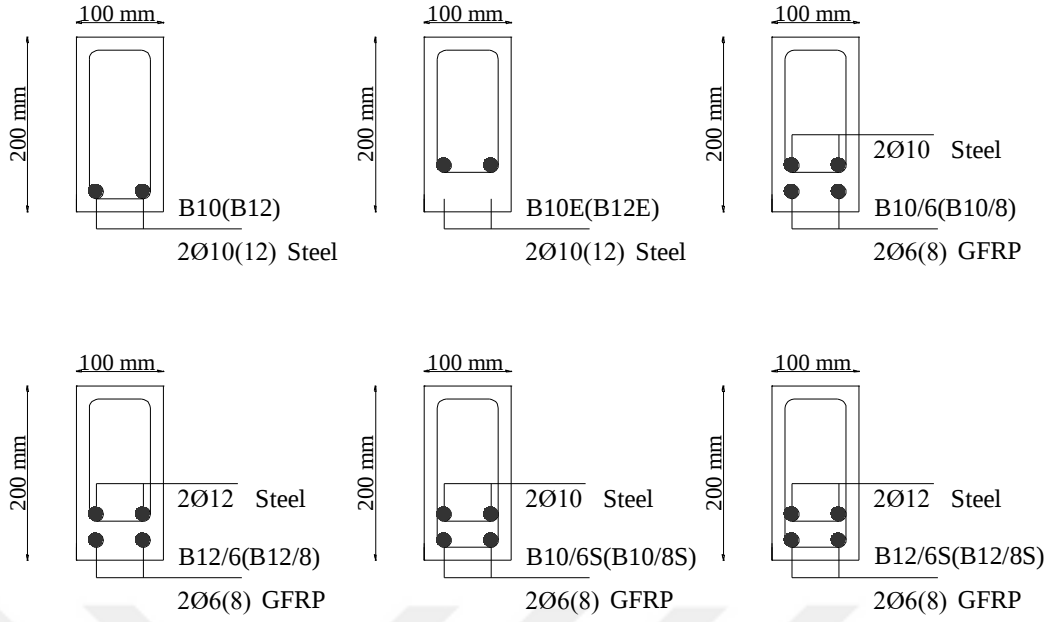
Δ_u maksimum yükten sonra maksimum yükün %80'ine karşılık gelen gelen deformasyon değeri Δ_y ise kapasiteye ulaşmadan önce maksimum yükün %75'ine karşılık gelen deplasman değeri olarak kabul edilmiştir. Ayrıca kirişlerin deneysel eğilme kapasiteleri, teorik modeller ile %0-%33 arasında değişen oranlarda daha düşük olarak tahmin edilmiştir.

Çizelge 2.3. Lau ve Pam’ın çalışmasında yer alan kirişlere ait süneklik değerleri

Grup	Kiriş	$\mu = \Delta_u / \Delta_y$	Δ_u / L ($\times 10^{-3}$)	A_{frp} / A_{st}
A	MD1.3-A90	14.20	46.1	-
	G.08-A90	1.01	21	-
	G0.3-MD1.0-A90	1.09	15.1	0.289
B	MD2.1-A90	6.01	28.3	-
	G2.1-A90	1.62	21.8	-
	G1.0-T0.7-A90	3.86	25.7	1.562
	G0.6-T1.0-A90	4.19	25	0.578

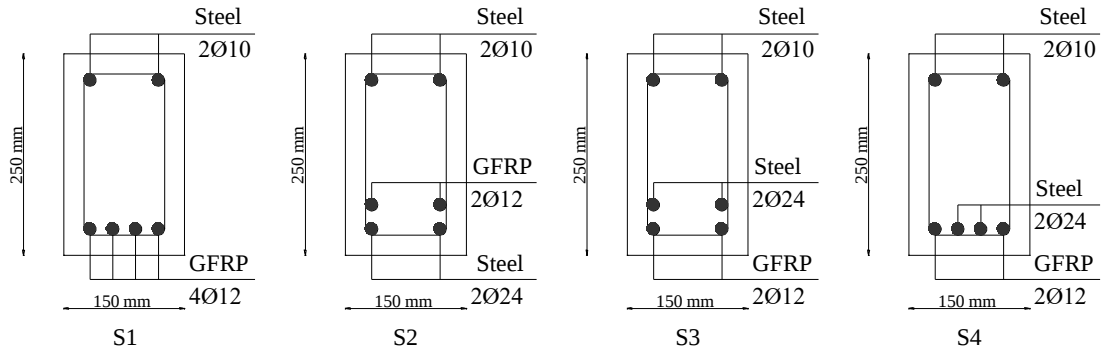
Safan [13] tarafından gerçekleştirilen çalışmada, GFRP ve çelik donatılar kullanarak tasarlanan hibrit donatılı kirişlerin eğilme davranışları incelenerek kirişlerin yük deformasyon ilişkileri, kırılma modları, çatlama tipleri ve eğilme kapasiteleri konuları üzerine odaklanılmıştır. Çelik donatılar korozyona karşı basınç bölgesine daha yakın bir yerde konumlandırılırken, GFRP donatılar çekme bölgesinin en dışına konumlandırılarak dayanım, rijitlik ve çatlak kontrolünü sağlayacak bir tasarım benimsenmiştir. Bu amaçla 12 adet kirişin 4 nokta eğilme altında testleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 2.5’te bu kirişlere ait en kesitlerine yer verilmektedir.

Hibrit donatılı kirişlerde çelik donatıların etkili derinliğinin daha küçük olması kaynaklı taşıma gücü kapasitesindeki azalışın GFRP donatılar aracılığı ile telafi edilebildiği ancak sünek davranışın garanti edilebilmesi adına çelik donatıların etkili derinliğinin bir sınır değer altına düşmemesi gerektiği ifade edilmiştir. Tasarımda bu duruma dikkat edilerek, tüm kirişler çelik donatılar aktıktan sonra betonun ezilmesi neticesinde taşıma gücüne ulaşmıştır. Ayrıca önerilen analitik model aracılığı ile hibrit donatılı kirişlerin eğilme kapasiteleri iyi bir düzeyde tahmin edilebilmiştir.



Şekil 2.5. Safan'ın çalışmasında yer alan kirişlere ait en kesitler

Yinghao ve Yong [14] tarafından gerçekleştirilen çalışmada yüksek beton dayanımına sahip GFRP-çelik donatılı hibrit kirişler üzerinde deneysel ve teorik olarak araştırmalar yapılmıştır. 3'ü hibrit 1'i salt GFRP donatılı olan kirişlerin dört nokta eğilme altında testleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 2.6'da çalışmada yer alan kirişlere ait en kesitler sunulmaktadır.



Şekil 2.6. Yinghao ve Yong'un çalışmasında yer alan kirişlere ait en kesitler

Hibrit donatılı kirişlerde çelik ve GFRP donatı alanlarının birbirine eşit olması sebebiyle donatı diziliminin (konfigürasyonunun) eğilme kapasitesi, kiriş rijitliği ve çatlama üzerindeki etkileri daha iyi anlaşılmıştır. Kirişlerde yük taşıma kapasitesi,

deformasyon ve çatlama için teorik modeller ile yapılan tahminlerin büyük uyum gösterdiği ifade edilmiştir.

Çalışmada üç farklı kırılma modu (i. çelik donatılar akmadan betonun ezilmesi, ii. çelik donatılar aktıktan sonra FRP donatısı kopmadan betonun ezilmesi, iii. çelik donatılar aktıktan sonra beton ezilmeden önce FRP donatısının kopması) için dengeli donatı oranları teorik olarak önerilmiştir. Test edilen hibrit donatılı kirişler taşıma güçlerine, çelik donatılar aktıktan sonra betonun ezilmesi neticesinde ulaşmıştır.

Deformasyon tahminleri için Bischoff [15] etkili atalet momenti ifadesi kullanılmıştır. Ancak klasik deformasyon tahmin yöntemleri ile çelik donatıların akmasından sonrası tahmin edilememektedir. Çalışmada kesitlerin tamamen çatlamış kesite dönüşmeden önce çelik donatılarda akma meydana geldiği tespit edilmiştir. Bunun üzerine, Bischoff [15] yaklaşımını temel alan ancak çelik donatının akmasından sonrasını göz ardı etmeyen Yoon ve diğ. [16] tarafından önerilmiş yeni bir etkili atalet momenti ifadesi kullanılmıştır. Salt çelik ya da FRP donatılı kirişler için kullanılan Bischoff [15] ifadesinde çatlamamış kesit etkili atalet momenti ile çatlamış kesit atalet momenti arasında (I_g ile I_{cr} arasında) çekme rijitleşmesini (tension stiffening) dikkate alarak kademeli azalan etkili atalet momenti (I_e) ifadesi yer almaktadır. Bu yeni yöntem ile etkili atalet momenti tanımı çelik donatıların aktığı andan önceki ve sonraki durumlar için farklı ifadeler aracılığı ile hesaplanmaktadır. Çelik donatıların akmasından sonra kullanılmış olan etkili atalet momenti, tamamen çatlamış kesit atalet momenti ve akma anından hemen sonraki kesit atalet momenti ifadeleri Denklem 2.7-2.9'da verilmektedir.

$$I_{e2} = \frac{I_{cr}}{\frac{I_{cr}}{I_{y-yoon}} + \frac{M_y}{M_a} \left(1 - \frac{I_{cr}}{I_{y-yoon}}\right) - \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^2 \left(1 - \frac{I_{cr}}{I_g}\right)} \quad (2.7)$$

$$I_{cr} = \frac{1}{3} b (\xi_n h)^3 + n_s A_s (h_0 - \xi_n h)^2 + n_f A_f (h_1 - \xi_n h)^2 \quad (2.8)$$

$$I_{y-yoon} = \frac{1}{3} b (\xi_n h)^3 + n_f A_f (h_1 - \xi_n h)^2 \quad (2.9)$$

Bu ifadelerde yer alan, I_{y-yoon} çelik donatının akmasından hemen sonraki etkili atalet momentini, I_{cr} kesitin tamamen çatlamış olduğu andaki atalet momentini ve I_{e2} ise çelik donatılar aktıktan sonraki deformasyonların hesabında kullanılan etkili atalet momentini temsil etmektedir. Hibrit donatılı kirişlerde çelik donatının akmasını da dikkate alan Yoon ve diğ. [16] modeli, salt GFRP donatılı kirişlerde ise ACI 440.1R-15'in [1] önerdiği ifadeler kullanılarak gerçekleştirilen deformasyon tahminlerinin deneysel verilerle uyum içinde olduğu ifade edilmiştir. Ayrıca gerçekleştirilen çalışma neticesinde çelik donatıların yer aldığı katmanın deformasyonlar açısından önemi anlaşılmıştır. Çelik donatıların iç katmanda bulunduğu hibrit donatılı kirişlerde deformasyonların arttığı gözlemlenmiştir. GFRP ve çelik donatıların birlikte en dış katmanda bulunduğu durum taşıma gücü kapasitesi açısından en etkin durumu yansıtmış yani bu kirişin taşıma gücü kapasitesi diğer kirişlerden daha fazla olduğu belirtilmiştir.

Yaz [17] tarafından gerçekleştirilen çalışmada GFRP ve/veya çelik donatılar kullanarak oluşturulan hibrit kirişlerin eğilme davranışları; enerji sönümleme kapasitesi, rijitlik ve süneklik temel başlıkları altında incelenmiştir.

Ge ve arkadaşlarının [18] gerçekleştirdikleri çalışmada, 5 adet hibrit (BFRP-çelik) donatılı betonarme kirişin eğilme testleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca bazalt lifli polimer donatıların (BFRP) standart çekip çıkarma (pull-out) ve eksenel çekme testlerini aracılığı ile bu donatıların mekanik özelliklerinin yanı sıra aderans mukavemetleri de belirlenmiştir. Bu testler neticesinde BFRP donatıların aderans mukavemetlerinin çelik donatılar ile benzerlik gösterdiği sonucuna ulaşılmıştır.

Hibrit donatılı kirişler için eğilme kapasitesi tahmini için basitleştirilmiş bir yöntem önerilmiş ve tahminlerin deneysel veriler ile uyduğu ifade edilmiştir. Ayrıca klasik süneklik tanımlarının hibrit donatılı kirişler için uygun olmadığı belirtilerek moment eğrilik grafiği altında kalan alanlar yani enerji absorbe kapasitesi ifadesi üzerinden kiriş süneklikleri değerlendirilmiştir. Hibrit donatılı kirişlerin moment eğrilik grafikleri ilk çatlama noktaları dikkate alınmaksızın Fortran 90 [19] aracılığı ile elde edilmiştir. w_s salt çelik ya da FRP donatılı kirişlerin, w_s^p ise hibrit donatılı kirişlerin

moment eğrilik grafiği altında kalan alanı temsil etmek üzere, bu alanlar Denklem 2.7-2.9 aracılığı ile hesaplanmıştır.

$$w_s = M_y (\varphi_u - \varphi_y / 2) \rightarrow (\text{Çelik donatılı betonarme kirişler için}) \quad (2.7)$$

$$w_s = M_u \varphi_u / 2 \rightarrow (\text{BFRP donatılı betonarme kirişler için}) \quad (2.8)$$

$$w_s^p = M_y \varphi_y / 2 + (M_u + M_y) (\varphi_u - \varphi_y / 2) \quad (2.9)$$

Klasik betonarme kirişlerde süneklik değerinin 3'ten büyük olması istenmektedir. Böylece hibrit donatılı kiriş sünekliklerinin klasik betonarme kiriş süneklikleri ile kıyaslanabilmeleri için bir faktöre ihtiyaç duyulmuştur. (Denklem 2.10-2.12)

$$u_f = \psi u_s \quad (2.10)$$

$$\psi = w_s^p / w_s \quad (2.11)$$

$$u_s = \varphi_u / \varphi_y \quad (2.12)$$

Bu ifadelerde ψ enerji absorbe katsayısı olup hibrit donatılı kirişin enerji absorbe kapasitesinin aynı donatı oranına sahip çelik donatılı kirişin enerji absorbe kapasitesine oranı olarak tanımlanmıştır. u_s hibrit donatılı kiriş ile aynı donatı oranına sahip olan çelik donatılı kirişin sünekliği olarak tanımlanmıştır. Çalışma neticesinde tüm kirişler için süneklik değerleri (u_f) 3 değerinden büyük olarak elde edilmiştir. Çizelge 2.4'te belirtildiği gibi salt BFRP donatılı kirişlerin sünekliklerinin en düşük, salt çelik donatılı kirişlerin sünekliklerinin en yüksek ve hibrit donatılı kirişlerin sünekliklerinin ise bu ikisinin arasında kaldığı sonucuna ulaşılmıştır. Böylelikle uygun A_{frp}/A_{st} oranlarına sahip hibrit donatılı kirişlerin yeterli süneklik değerlerine sahip olabileceği sonucu ortaya çıkmıştır.

Çizelge 2.4. Ge ve arkadaşlarının çalışmasında yer alan kirişlere ait süneklik değerleri

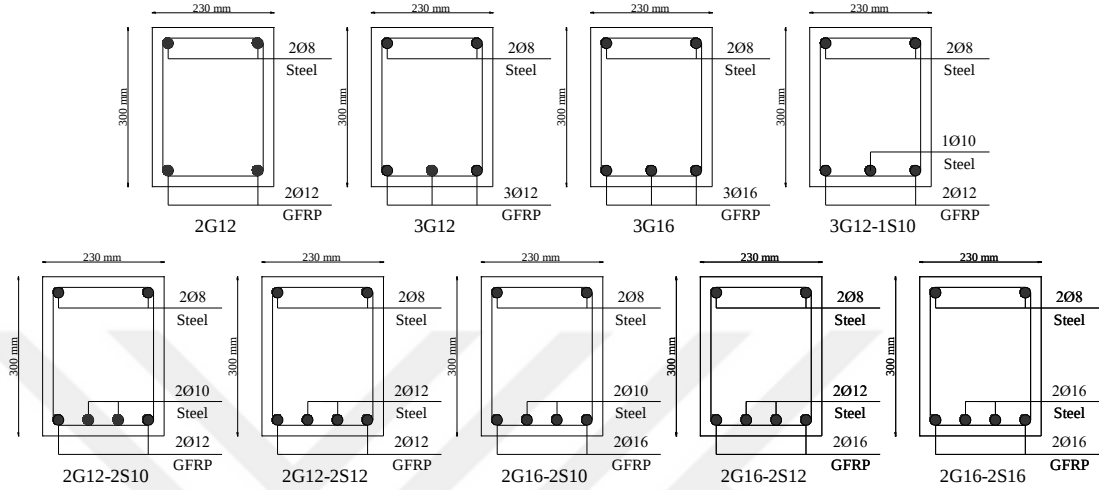
Kiriş	A_{frp}/A_{st}	M_y/kNm	$\phi_y / \%$	M_u /kNm	$\phi_u / \%$	ψ	u_s	u_f
FS1	0.96	37.2	0.9	75.3	5.9	0.83	4.63	3.85
FS2	0.64	42.6	0.9	74.6	5.9	0.82	4.55	3.73
FS3	0.43	48.0	1.0	73.8	6.0	0.81	4.55	3.68
F1	-	-	-	74.2	6.0	0.74	4.93	3.63
S1	-	69.8	1.2	69.8	5.0	1.00	4.16	4.16

Hawileh'in [20] gerçekleştirdiği çalışmada Aiello ve Ombres [4] tarafından deneyleri yapılmış kirişlerin yük deplasman ilişkilerini sonlu eleman modeli (ANSYS 12.0) [21] aracılığı ile incelenmiştir. AFRP ve/veya çelik donatılı kiriş sonlu eleman modellerinin hibrit kiriş davranışını doğru bir şekilde yansıttığı ayrıca bu modeller aracılığı ile kirişlerin eğilme kapasitelerinin yüksek doğrulukla (en fazla %10 farkla) tahmin edilebilmesi üzerine çalışmaya parametrik bir kısım daha eklenmiştir. Bu kapsamda Aiello ve Ombres'in [4] deney grubundan A1 kodlu hibrit donatılı kiriş referans olarak seçilerek AFRP donatı çapı, FRP donatı tipi, donatı ile beton arasındaki aderans ve beton basınç dayanımının hibrit donatılı kiriş davranışı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Parametrik çalışma neticesinde AFRP donatı çapının artması eğilme kapasitesindeki artışa, farklı FRP tiplerinden (AFRP-GFRP-CFRP) en iyi performansın CFRP donatıların kullanıldığı hibrit kirişte elde edildiği ve beton basınç dayanımının davranış üzerinde fazla bir etkisinin bulunmadığı ifade edilmiştir.

Kara ve diğ. [22] gerçekleştirdikleri nümerik çalışma ile literatürde yer alan hibrit FRP-çelik donatılı kirişlerin eğrilik, deformasyon ve moment kapasitelerini doğru bir biçimde tahmin edilebilmiştir. Deformasyon tahminlerinde Bischoff [10] ifadesi kullanılmış ve bu model ile yapılan deformasyon tahminlerinde düşük yük seviyeleri için iyi sonuçlar gözlemlenmiştir. Ancak yük seviyesi arttıkça deneysel verilere kıyasla daha büyük deformasyon değerleri elde edilmiştir. Ayrıca çalışmada çelik donatı oranının artışı ile kiriş sünekliği ve rijitliğinin de arttığı gözlemlenmiştir.

Refai ve arkadaşları [23] tarafından GFRP ve çelik donatılar kullanılarak gerçekleştirilen çalışmada, ebatları 230 x 300 x 4000(3700) mm olan 6'sı hibrit GFRP-çelik donatılı ve 3'ü salt GFRP donatılı olmak üzere toplam 9 adet kirişin eğilme

davranışları araştırılmıştır. Çalışmada yer alan kirişlere ait en kesitler Şekil 2.7’de verilmektedir. Çalışmada donatı oranı ile çelik donatı/GFRP donatı oranı ana parametre olarak belirlenmiş olup bu parametreler, kirişlerin servis sınır durumu ve nihai durumları göz önüne alınarak değerlendirmeler yapılmıştır.



Şekil 2.7. Refai ve arkadaşlarının çalışmasında yer alan kirişlere ait en kesitler

Deneyssel çalışmada, salt FRP donatılı kirişlerden biri denge altı kırılma (2G12 kirişi) diğer ikisi denge üstü kırılma ile taşıma gücüne ulaşırken, hibrit donatılı kirişlerde ise GFRP donatısı kopmadan beton ezilerek (denge üstü) taşıma gücüne ulaşılmıştır. Ancak 2G12-1S10 kirişi GFRP donatısının kopması ile betonun ezilmesi aynı anda gerçekleşmiş yani dengeli kırılma gözlenmiştir.

Çalışmada ACI 440.1R-15 [1], CSA-S806-12 [2] ve Bischoff [10] denklemleri aracılığı ile deformasyon tahminleri yapılmış ancak deneyssel verilerle en uyumlu sonuçlar CSA-S806-12 metodu [2] ile elde edilmiştir.

FRP donatılı kirişler için Kanada Karayolu Köprü Kasarım Standartında (CSA-S6-10) [24] yer alan deformabilite faktörü (DF) Denklem 2.13’te verildiği şekli ile ifade edilmektedir. Bu ifadede servis sınır durumu için en dıştaki beton basınç lifinin 0.001 birim deformasyon değerine ulaştığı an kabulü yapılmıştır. Ayrıca FRP donatılı kirişlerin DF değerlerinin 4’ten büyük olması istenmektedir.

$$DF = \frac{M_u \psi_u}{M_s \psi_s} \quad (2.13)$$

Bu ifadede yer alan M_s ve ψ_s servis sınır durumu için moment ve eğriliği, M_u ve ψ_u ise nihai durumu için moment ve eğriliği ifade etmektedir. Bu tanım, hibrit donatılı kirişlerde kırılma öncesi meydana gelen çelik donatılardaki akmanın ihmal edilmesi sebebiyle araştırmacılar tarafından Denklem 2.14'teki şekliyle (DF_{mod}) düzenlenmiştir.

$$DF_{mod} = \frac{M_u \psi_u}{M_y \psi_y} \quad (2.14)$$

Bu ifadede M_y ve ψ_y çelik donatıların aktığı andaki moment ve eğriliği temsil etmektedir. Çizelge 2.5'te salt FRP donatılı kirişlere ve Çizelge 2.6'da hibrit donatılı kirişlere ait deformabilite faktörü değerleri sunulmaktadır.

Çizelge 2.5. Refai ve arkadaşlarının çalışmasında yer alan salt FRP donatılı kirişlere ait deformabilite faktörü değerleri

Kiriş	Nihai Durum		Servis Durumu		DF
	M_u (kNm)	ψ_u (1/mm)	M_s (kNm)	ψ_s (1/mm)	
2G12	50.28	8.76×10^{-5}	23.21	3.53×10^{-5}	5.37
3G12	51.42	7.44×10^{-5}	22.99	3.12×10^{-5}	3.33
3G16	67.31	5.69×10^{-5}	30.48	2.37×10^{-5}	5.30

Çizelge 2.6. Refai ve arkadaşlarının çalışmasında yer alan hibrit donatılı kirişlere ait deformabilite faktörü değerleri

Kiriş	Nihai Durum		Akma Durumu		DF_{mod}	A_{frp}/A_{st}
	M_u (kNm)	ψ_u (1/mm)	M_y (kNm)	ψ_y (1/mm)		
2G12-1S10	47.27	8.15×10^{-5}	15.23	1.37×10^{-5}	18.52	2.88
2G12-2S10	58.43	7.14×10^{-5}	25.88	1.31×10^{-5}	12.34	1.44
2G12-2S12	55.72	6.83×10^{-5}	31.12	1.49×10^{-5}	8.23	1.00
2G16-2S10	71.41	5.75×10^{-5}	31.02	1.35×10^{-5}	9.76	2.56
2G16-2S12	70.92	5.51×10^{-5}	37.38	1.44×10^{-5}	7.24	1.78
2G16-2S16	81.39	4.73×10^{-5}	56.47	1.55×10^{-5}	4.41	1.00

Denge üstü hibrit donatılı kirişlerin salt GFRP donatılı kirişlere göre daha fazla sünekliğe ve dayanıma sahip olduğu ifade edilmiştir. Hibrit donatılı kirişlerde çelik donatı oranı arttıkça deformabilitenin azaldığı sonucu gözlemlenmiştir. Ayrıca hibrit donatılı kirişlerin yük taşıma kapasitesi, deformasyon, çatlak genişlikleri ve deformabilitesi için yapılan tahminler ile deneysel sonuçların uyumu kullanılan modellerin yeterliliğini kanıtlamıştır.

Lei Pang ve arkadaşları [25] tarafından gerçekleştirilen çalışmada, mevcut süneklik tanımlarının hibrit donatılı kirişler için uygun olmadığı belirtilmiş ve bu kirişlerin sünek bir davranış gösterebilmesi için donatı oranı sınır değerleri önerilmiştir. Ayrıca deformabilite ve enerji absorbe kapasitesini temel alan yeni bir süneklik ifadesi geliştirilmiştir. Geliştirilen modeller aracılığı ile hibrit donatılı kirişlerin süneklikleri ve yük taşıma kapasiteleri doğru bir biçimde tahmin edilebilmiştir.

Geliştirilen süneklik tanımında hibrit donatılı kirişlere muadil olabilecek salt çelik donatılı iki farklı kiriş modeli geliştirilmiştir. Bunlardan ilki toplam donatı alanlarının ikincisi ise efektif donatı alanlarının eşitlenmesi esasına dayalıdır (Denklem 2.15-2.16).

$$A_{s1} + A_{frp} = A_{st} \quad (2.15)$$

$$A_{s1} + A_{frp} E_f / E_s = A_{st} \quad (2.16)$$

Burada A_{s1} , A_{frp} sırasıyla hibrit donatılı kirişteki çelik donatı ve FRP donatı alanıdır. A_{st} ise muadil çelik donatı alanını simgelemektedir. Salt çelik ve hibrit FRP-çelik donatılı kirişlerin teorik moment eğrilik eğrisi altında kalan alanlar Denklem 2.17-2.18 aracılığı ile ifade edilmektedir.

$$U_S = \frac{M_{ys} \varphi_{ys}}{2} + M_{ys} (\varphi_{us} - \varphi_{ys}) \quad (2.17)$$

$$U_H = \frac{M_{yh} \varphi_{yh}}{2} + \frac{(M_{yh} + M_{uh})(\varphi_{uh} - \varphi_{yh})}{2} \quad (2.18)$$

Bu ifadelerde yer alan yeni süneklik indeksi (μ_h) (Denklem 2.19), salt çelik donatılı muadil kirişin enerji sönümleme kapasitesi (U_S), hibrit donatılı kirişin enerji sönümleme kapasitesi (U_H), hibrit donatılı kirişin nihai ve akma anındaki deformasyonları (D_{uh} , D_{yh}) süneklik azaltma faktörü ise (ψ) (Denklem 2.20) ile ifade edilmiştir. Bu yeni ifade ile süneklik tanımı hem deformasyon hem de enerji sönümleme kapasitesi parametrelerini içermektedir.

$$\mu_h = \psi D_{uh} / D_{yh} \geq [\mu_D] \quad (2.19)$$

$$\psi = U_H / U_S \leq 1.0 \quad (2.20)$$

Her iki model için de A_{frp}/A_{st} oranı değiştikçe hibrit donatılı kirişin enerji absorbe kapasitesinin muadil çelik donatılı kirişin enerji absorbe kapasitesine oranı (ψ) da değişkenlik göstermektedir. Ayrıca A_{frp}/A_{st} oranı deformasyon bazlı klasik süneklik indeksi değerlerini de etkilemektedir. Bu metod ile literatürde eğilme testleri gerçekleştirilmiş olan çalışmalara ait hibrit donatılı kirişlerin süneklikleri değerlendirilmiştir. Eksenel rijitliklerin yani efektif donatı oranınca muadil olan kirişler için hesaplanan süneklik indeksi değerlerinin daha güvenli tarafta kalması sebebiyle bu yöntemin hibrit donatılı kirişlerin süneklik hesaplarında kullanılması uygun bulunmuştur. Ayrıca $[\mu_D] \geq 2.0$ koşulunun sağlanabilmesi için A_{frp}/A_{st} oranının 0.1 ile 2.1 değerleri arasında olması gerektiği, $[\mu_D] \geq 3.0$ koşulunun sağlanabilmesi için ise A_{frp}/A_{st} oranının 0.3 değerinden daha düşük olması gerektiği ifade edilmiştir.

Çalışmada kirişlerin sünek kırılma neticesinde taşıma gücüne ulaşabilmesi için iki farklı donatı sınırı önerilmiştir. Bunlardan ilki çelik donatının akma özelliği sünek kırılmanın göstergesi olması nedeni ile salt çelik ve hibrit FRP-çelik donatılı kirişlerin çelik donatı bakımından denge altı donatı oranına sahip olması, ikincisi ise FRP donatısının kopmasının betonun ezilmesinden daha gevrek bir davranış olması sebebiyle hibrit FRP-çelik donatılı kirişlerin FRP donatı bakımından denge üstü donatı oranına sahip olması kriterlerine dayalıdır. Bu konuda ACI 318M-05 [26] ve ACI 440.1R-15 [1] dikkate alınarak Denklem 2.21-22’de verilen donatı dönüşümleri yapılarak donatı oranı sınır değerleri önerilmiştir.

$$\rho_{sf,s} = \rho_s + \frac{E_f}{E_s} \rho_f \leq 0.75 \rho_{s,b} = 0.64 \beta_1 \frac{f_c}{f_y} \frac{E_s \varepsilon_{cu}}{f_y + E_s \varepsilon_{cu}} \quad (2.21)$$

$$\rho_{sf,f} = \rho_s \frac{f_y}{f_{fu}} + \rho_f \geq 1.4 \rho_{f,b} = 1.19 \beta_1 \frac{f_c}{f_{fu}} \frac{E_f \varepsilon_{cu}}{f_{fu} + E_f \varepsilon_{cu}} \quad (2.22)$$

Bencardino ve diğ. [27] tarafından gerçekleştirilen nümerik ve analitik çalışma, sonlu eleman modelinin ve CNR DT 203/2006 [28] kodunun salt çelik donatılı, salt FRP donatılı ve hibrit çelik-FRP donatılı kirişler için kullanılabilir olduğunu gösterebilmesi amacını taşımaktadır. Bu kapsamda, literatürde yer alan Aiello ve Ombres'in [4] salt AFRP, salt çelik ve hibrit AFRP-çelik donatılı kirişleri ile Lau ve Pam'in [12] salt GFRP, salt çelik ve hibrit GFRP-çelik donatılı kirişleri sonlu eleman programı ABACUS [29] aracılığı ile modellenmiştir. Ayrıca mevcut İtalyan kodunun (CNR DT 203/2006) [28], kirişlerin taşıma gücü kapasitesi, kırılma modu ve yük deplasman eğrisi tahminleri bakımından etkinliği analitik olarak incelenmiştir. Bischoff ve Paixao'nun [30] önermiş olduğu çekme rijitleşmesini (tension stiffening) göz önüne alan denklemi aracılığı ile yapılan yük deplasman eğrisi tahminlerinin düşük ve normal seviyede donatı oranına sahip kirişlerde deneysel verilerle oldukça yakın sonuçlar gösterdiği belirtilmiştir. Ayrıca deneysel veriler ile nümerik ve analitik sonuçların kıyaslanması neticesinde sonlu eleman modeli ile analitik modelin her ikisinin de güvenilir olduğu sonucu ortaya çıkmıştır.

Qin ve arkadaşları [31] tarafından gerçekleştirilen çalışmada, FRP donatılı kirişlerde sünekliğin ve dayanımın geliştirilebilmesi için çekme bölgesinde FRP donatılar ile birlikte çelik donatıların kullanıldığı hibrit kirişler önerilmiştir. A_{frp}/A_{st} oranının yük taşıma kapasitesi ile süneklik arasındaki dengeyi sağlayan anahtar parametre olduğu düşünülmüş ve bu oranın hibrit donatılı kirişlerin eğilme davranışları üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bu amaçla çalışmada üç gruptan oluşan toplam 15 adet kiriş ABAQUS [29] sonlu eleman programı aracılığı ile modellenmiştir. İlk grup; salt çelik donatılı, salt FRP donatılı ve hibrit çelik-FRP donatılı toplam 6 adet kirişe ait deneysel sonuçların sonlu eleman modelinin geçerliliğini göstermek adına oluşturulmuştur. Deneysel veriler ile sonlu eleman modelleri arasında %10'dan daha az sapmalar meydana geldiği tespit edilmiş ve modelin uygunluğu anlaşıldıktan sonra diğer iki grubu oluşturan (denge altı ve denge üstü donatılı) kirişler modellenmiştir.

Çalışmada süneklik, deformasyon süneklik tanımı (klasik süneklik tanımı) aracılığı ile değerlendirilmiştir ($\mu = \Delta_u / \Delta_y$). Çizelge 2.7’de deneysel çalışmada yer alan 4 adet hibrit donatılı kirişin süneklik değerleri (A_{frp}/A_{st} oranı değişimi dikkate alınarak) ile bu değerlerin A1 referans elemanının ($A_{frp}/A_{st}=1$) süneklik değerine oranları sunulmuştur. Çizelge 2.8’de ise benzer şekilde nümerik çalışmada yer alan 4 adet hibrit donatılı kirişin süneklik değerleri ve B1 referans elemanına ($A_{frp}/A_{st}=1$) göre süneklik değişim oranlarına yer verilmiştir.

Çizelge 2.7. Qin ve arkadaşlarının deneysel çalışmasında yer alan hibrit donatılı kirişlere ait süneklik değerleri

Kiriş	A_{frp}/A_{st}	P_{max} (kN)	$(P_x - P_{A1}) / P_{A1}$	$\mu = \Delta_u / \Delta_y$	$(\mu_x - \mu_{A1}) / \mu_{A1}$
A1	1:1	99.4	-	3.53	-
A2	2:1	104.7	%5	4.08	%15.78
A3	1:2	108.6	%9.26	2.87	%-18.69
A4	1:4	116.9	%17.61	2.33	%-33.98

Çizelge 2.8. Qin ve arkadaşlarının nümerik çalışmasında yer alan hibrit donatılı kirişlere ait süneklik değerleri

Kiriş	A_{frp}/A_{st}	P_{max} (kN)	$(P_x - P_{B1}) / P_{B1}$	$\mu = \Delta_u / \Delta_y$	$(\mu_x - \mu_{B1}) / \mu_{B1}$
B1	1:1	209.4	-	3.09	-
B2	5:3	228.1	%8.93	3.20	%3.55
B3	3:5	224.8	%7.35	3.42	%10.67
B4	2:5	205.8	%-1.72	3.55	%10.89
B5	5:2	200.6	%-4.20	2.63	%-14.76

Çalışmada hibrit donatılı kirişlerin hem denge altı hem de denge üstü donatı oranına sahip olabileceği ifade edilmiştir. Denge üstü donatı oranına sahip olan kirişlerde A_{frp}/A_{st} oranının 1 ile 2.5 arasında olması durumunda kirişlerin yeterli sünekliğe, dayanıma ve rijitliğe sahip olabileceği, denge altı donatı oranına sahip olan kirişlerde ise A_{frp}/A_{st} oranının 1’den daha büyük olması durumunda yeterli sünekliğin sağlanabileceği görüşü öne çıkmıştır.

3. DENEYSEL ÇALIŞMA

Çalışmanın deneysel kısmı salt çelik, salt BFRP, salt GFRP, hibrit BFRP-çelik ve hibrit GFRP-çelik donatılı toplam 25 adet kirişin dört noktalı eğilme testlerinden oluşmaktadır. S420 sınıfı çelik, BFRP ve GFRP donatılar ile betonun mekanik özelliklerinin belirlenmesi için de malzeme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Tüm kiriş ve malzeme deneyleri, Atılım Üniversitesi Yapı Mekaniği Laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir.

Literatürde yer alan geçmiş çalışmalardan farklı olarak, toplam donatı içerisinde değişen çelik donatı oranının kiriş davranışı ve sünekliğini hangi ölçüde etkilediğinin belirlenebilmesi için, her deney grubunda yer alan kirişler taşıma güçleri birbirine çok yakın olacak şekilde tasarlanmıştır. Sağlıklı bir karşılaştırma yapılabilmesi adına her deney grubunda salt çelik ve salt FRP donatılı referans kirişler de bulunmaktadır.

Kiriş boyutları deney çerçevesi kapasitesine göre belirlenmiştir. Bu bağlamda, kirişler 200 x 300 mm kesit boyutlarına ve 3000 mm toplam uzunluğa sahip olacak şekilde tasarlanmıştır. Ayrıca çalışmada kullanılacak beton sınıfı seçiminde yüksek dayanımlı beton yerine normal dayanıma (C30/37) sahip, yani ezilme birim deformasyon kapasitesi daha yüksek bir beton tercih edilmiştir. Bunun temel sebebi, betonun düşük birim deformasyonlarda ezilmesine engel olunarak hibrit davranışın iyi bir biçimde gözlemlenmesini sağlamak düşüncesidir. Ayrıca, elemanların kesme kırılması meydana gelmeden eğilme kapasitelerine ulaşabilmeleri amacıyla kirişlerde yeterli oranda enine donatıların kullanılmasına ve a/d oranının olabildiğince yüksek seçilmesine dikkat edilmiştir.

Çalışmada eğilme testleri gerçekleştirilen tüm kirişler, kendi içlerinde taşıma güçlerinin yakınlığına ve FRP donatı bakımından kırılma modlarına göre üç gruba ayrılmıştır. Ancak farklı gruplarda yer alan referans çelik donatılı kirişler bulundukları grubun kırılma modundan bağımsız olarak çelik donatı bakımından denge altı donatılı olarak tasarlanmıştır.

Tüm kirişler çekme bölgelerinde yer alan donatı çeşidi ve sayısına göre isimlendirilmiştir. Öncelikle B,G ve S büyük harfleri sırasıyla BFRP, GFRP ve çelik donatıları temsil etmektedir. Bu harfleri takip eden rakamlar ise, ilgili çekme donatısının sayısını ifade etmektedir. Örneğin B2S3 kirişi çekme bölgesinde 2 adet BFRP ile 3 adet çelik donatı bulundururken, G5 Referans kirişi çekme bölgesinde 5 adet GFRP donatı bulundurmaktadır.

3.1. Deney Elemanları

İlk deney elemanı grubu, salt BFRP, salt GFRP ve salt çelik donatılı referans kirişlerin yanı sıra BFRP-çelik ve GFRP-çelik hibrit donatılı toplam 11 adet kirişten oluşmaktadır. Bu grupta salt çelik donatılı referans elemanı haricinde kalan tüm kirişler, FRP donatı bakımından denge üstü donatılı olacak şekilde tasarlanmıştır. Birinci eleman grubunda yer alan tüm kirişlerin çekme bölgesinde toplam 5'er adet donatı mevcuttur. İkinci deney elemanı grubu, salt GFRP ve salt çelik donatılı kirişler ile GFRP-çelik hibrit donatılı toplam 7 adet kirişten oluşmakta ve bu grupta yer alan tüm kirişlerin çekme bölgesinde toplam 6'şar adet donatı bulunmaktadır. İkinci deney elemanı grubunda yer alan salt çelik donatılı referans kiriş haricindeki kirişler de, FRP donatı bakımından denge üstü donatılı olacak şekilde tasarlanmıştır. Üçüncü deney elemanı grubunda ise, salt BFRP ve GFRP donatılı kirişlerin yanı sıra hibrit BFRP-çelik ve GFRP-çelik denge altı donatılı kirişlere yer verilmiştir.

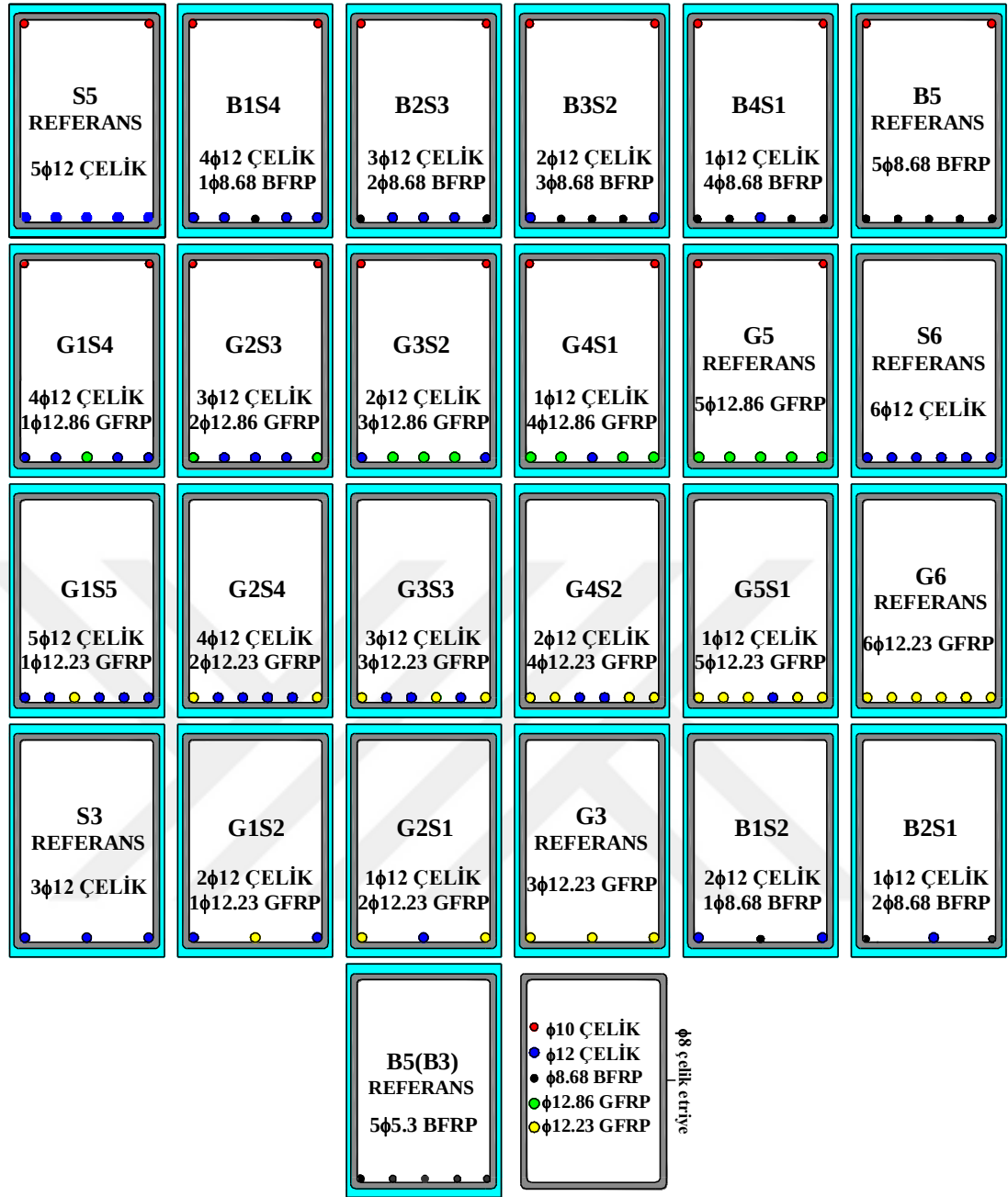
İkinci deney kirişi grubunda kullanılan GFRP donatılar, ilk eleman grubunda kullanılan donatıların temin edildiği firmadan temin edilmiştir. Ancak, bu donatıların mekanik özelliklerinin ilk grupta yer alan kirişlerde kullanılan GFRP donatıların mekanik özelliklerinden farklı olduğu çekme testleri sonucunda tespit edilmiştir. Üçüncü eleman grubunda kullanılan GFRP donatılar, ikinci eleman grubunda kullanılan GFRP donatılar ile, BFRP donatılar ise ilk deney elemanı grubunda kullanılan BFRP donatılar ile özdeştir (B5 referans kirişi haricinde).

FRP donatı üreticilerinde sınırlı miktarda üretilmiş olan BFRP donatıların önemli bir kısmı, eksenel çekme deneylerinde kullanılmıştır. Bu sayede, BFRP donatıların

mekanik özellikleri tam olarak belirlenerek, analiz sonuçları ile deneysel sonuçlar arasındaki uyum daha sağlıklı bir biçimde araştırılmıştır. Ancak, sınırlı sayıdaki BFRP donatılarının malzeme deneylerinde kullanılmasıyla, çalışma kapsamında test edilmesi planlanan referans B3 elemanı için gerekli sayıda donatı bulunamamıştır. Bu eleman yerine, B3 elemanı ile aynı çekme donatı alanına sahip, fakat donatı çapı üçüncü eleman grubunda yer alan diğer elemanlara nazaran daha küçük olan B5 referans elemanı üretilmiş ve test edilmiştir.

Çalışmada yer alan tüm kirişlere ait enkesitler Şekil 3.1’de verilmiş olup bu kirişlere ait donatı detayları, beton basınç dayanımları, gerçek kesit ölçüleri, kullanılan FRP donatı tipi ve bu donatıların mekanik özellikleri Çizelge 3.1’de sunulmuştur.





Şekil 3.1. Çalışmada yer alan tüm kirişlerin en-kesitleri

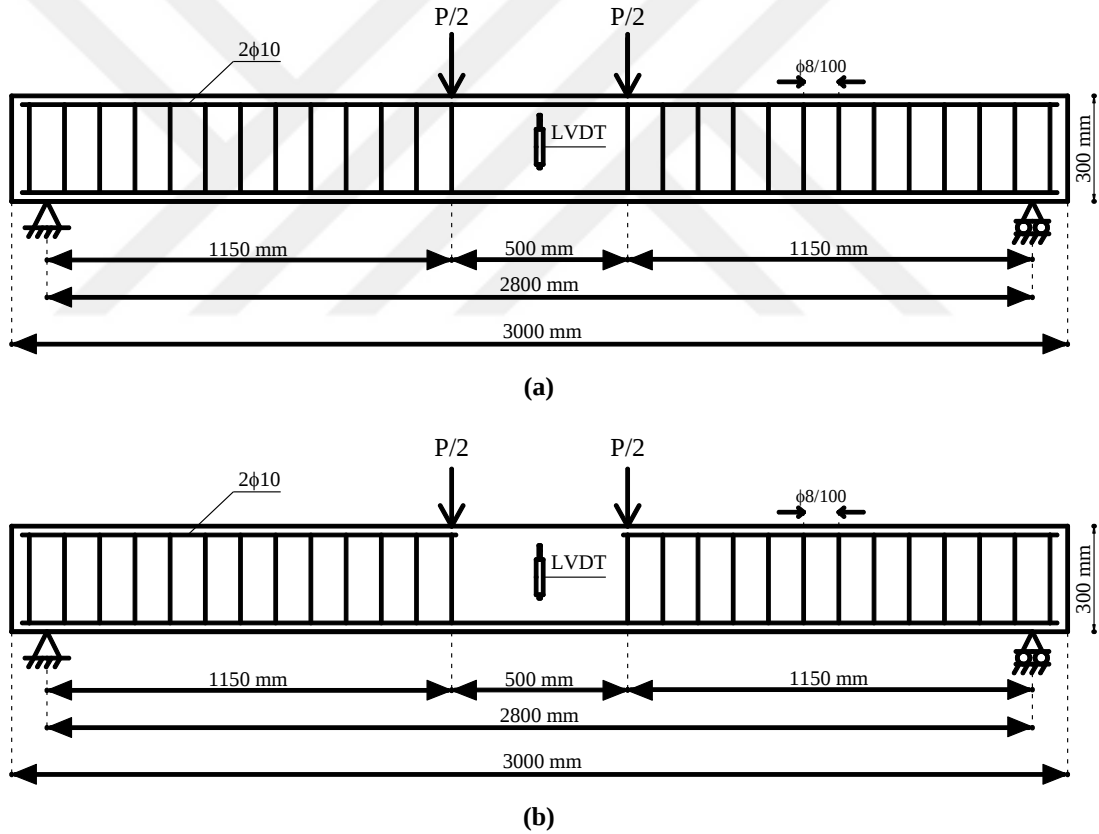
Çizelge 3.1. Çalışmada yer alan tüm kirişlere ait kesit ölçüleri, çekme ve basınç donatı detayları, beton basınç dayanımı ve FRP mekanik özellikleri

Grup No	Kiriş	Kesit ölçüleri (mm)	Çekme donatısı detayı	Basınç donatısı	f_c (MPa)	E_f (GPa)	f_{fu} (MPa)
1	S5 REFERANS	200x300	5 ϕ 12 Çelik	2 ϕ 10 Çelik	31.28	-	-
	B1S4	200x300	1 ϕ 8.68 BFRP + 4 ϕ 12 Çelik	2 ϕ 10 Çelik	31.28	43	1034
	B2S3	200x300	2 ϕ 8.68 BFRP + 3 ϕ 12 Çelik	2 ϕ 10 Çelik	31.28	43	1034
	B3S2	200x300	3 ϕ 8.68 BFRP + 2 ϕ 12 Çelik	2 ϕ 10 Çelik	31.28	43	1034
	B4S1	200x300	4 ϕ 8.68 BFRP + 1 ϕ 12 Çelik	2 ϕ 10 Çelik	31.28	43	1034
	B5 REFERANS	200x300	5 ϕ 8.68 BFRP	2 ϕ 10 Çelik	31.28	43	1034
	G1S4	200x300	1 ϕ 12.86 GFRP + 4 ϕ 12 Çelik	2 ϕ 10 Çelik	31.28	35	449
	G2S3	200x300	2 ϕ 12.86 GFRP + 3 ϕ 12 Çelik	2 ϕ 10 Çelik	31.28	35	449
	G3S2	200x300	3 ϕ 12.86 GFRP + 2 ϕ 12 Çelik	2 ϕ 10 Çelik	31.28	35	449
	G4S1	200x300	4 ϕ 12.86 GFRP + 1 ϕ 12 Çelik	2 ϕ 10 Çelik	31.28	35	449
	G5 REFERANS	200x300	5 ϕ 12.86 GFRP	2 ϕ 10 Çelik	31.28	35	449
2	S6 REFERANS	199.8x303.29	6 ϕ 12 Steel	-	30.49	-	-
	G1S5	200.8x301.86	1 ϕ 12.23 GFRP + 5 ϕ 12 Çelik	-	30.49	46	580
	G2S4	199.8x301.14	2 ϕ 12.23 GFRP + 4 ϕ 12 Çelik	-	30.49	46	580
	G3S3	200.6x304.43	3 ϕ 12.23 GFRP + 3 ϕ 12 Çelik	-	30.49	46	580
	G4S2	198.6x304.57	4 ϕ 12.23 GFRP + 2 ϕ 12 Çelik	-	30.49	46	580
	G5S1	200.6x306	5 ϕ 12.23 GFRP + 1 ϕ 12 Çelik	-	30.49	46	580
	G6 REFERANS	200x307	6 ϕ 12.23 GFRP	-	30.49	46	580
3	S3 REFERANS	200.8x304.71	3 ϕ 12 Çelik	-	30.49	-	-
	B1S2	199.8x308	1 ϕ 8.68 BFRP + 2 ϕ 12 Çelik	-	30.49	43	1034
	B2S1	199.2x301.71	2 ϕ 8.68 BFRP + 1 ϕ 12 Çelik	-	30.49	43	1034
	B5 (B3) REFERANS	199x302	5 ϕ 5.3 BFRP	-	30.49	-	-
	G1S2	198.6x304.86	1 ϕ 12.23 GFRP + 2 ϕ 12 Çelik	-	30.49	46	580
	G2S1	202x301.57	2 ϕ 12.23 GFRP + 1 ϕ 12 Çelik	-	30.49	46	580
	G3 REFERANS	198.8x308.71	3 ϕ 12.23 GFRP	-	30.49	46	580

Tüm kirişlerde kullanılan çekme ve basınç donatıları ile etriyelerin tamamı S420 sınıfı çelik malzemeden yapılmıştır. Çekme bölgesinde kullanılan çelik donatıların çapları 12 mm iken basınç bölgesinde kullanılan çelik donatıların çapları 10 mm'dir. Her kirişte 26 adet 8 mm çapında çelik etriyeler 100'er mm aralıklarla kullanılarak kirişe yeterli kesme dayanımı sağlanmış ve kirişlerin eğilme kapasitelerine ulaşmaları sağlanmıştır. Tüm kirişlerde iki yükleme noktası arasında, yani kesme kuvvetinin bulunmadığı bölgede, etriye kullanılmamıştır. Tüm elemanların sabit moment (sıfır kesme) bölgesinde basınç donatısının devam etmemesi planlanmıştır. Ancak, ilk deney elemanı grubunda yer alan kirişlerde sabit moment bölgesinde basınç donatısının

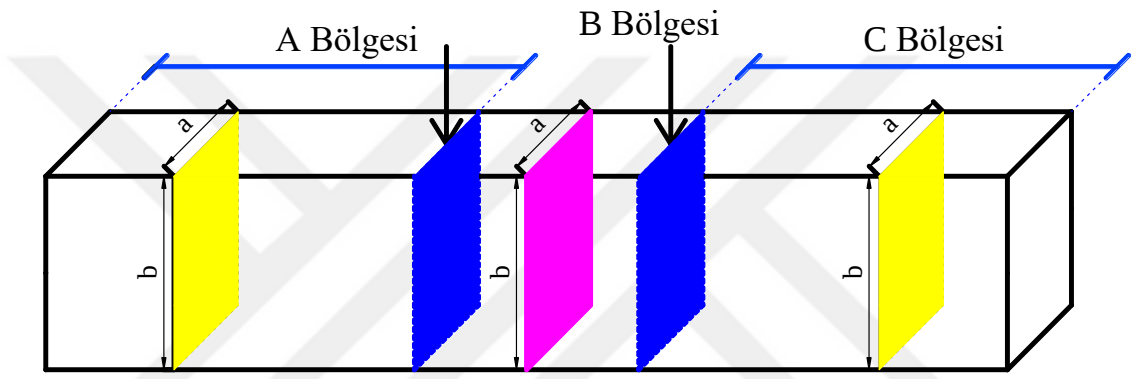
kesilmesi unutulduğundan, bu bölgede de basınç donatısı bulunmaktadır. Diğer kiriş gruplarında ise bu duruma dikkat edilerek, sabit moment bölgesinde basınç donatıları devam ettirilmemiştir. Şekil 3.2’de kirişlere ait yükleme, mesnet ve enine donatı detayları verilmiştir.

Birinci deney elemanı grubunda yer alan kirişlerde sabit moment bölgesinde yer alan basınç donatılarının deney sonuçlarına önemli ölçüde tesir etmediği görüldüğünden, kiriş grupları arasındaki bu farklılık göz ardı edilmiştir. Sabit moment bölgesinde etriye bulunmadığından, basınç donatıları deneyin başlangıç aşamalarında burkulmuş ve devre dışı kalmıştır. Dolayısıyla, yük kapasitesi, yük-sehim davranışı ve süneklik ölçütleri üzerinde ihmal edilebilecek bir farklılık ortaya çıkmıştır.



Şekil 3.2. (a) Birinci grup (b) ikinci ve üçüncü grup kirişlere ait yükleme, mesnet ve enine donatı detayları

Daha önce de belirtildiği üzere, tüm kirişler 200 mm genişliğe, 300 mm yüksekliğe, 3000 mm toplam uzunluğa ve 2800 mm net açıklığa sahip olacak şekilde tasarlanmıştır. Ancak, tasarlanan ölçütlerle yerinde dökülen kiriş boyutları arasında farklılıklar olacağı gerçeğinden hareketle, kiriş boyutları ölçümlerle de belirlenmiştir. Her deney kirişinin kesit boyutları için alınan ölçümlerin kiriş üzerindeki konumları, Şekil 3.3’de gösterilmiştir. Bu ölçümlerde elde edilen değerler ve ortalamaları, EK-1’de sunulmaktadır. Bu ölçümlere göre belirlenen gerçek ölçüler, analitik hesapların daha hassas bir şekilde yapılabilmesini sağlamıştır.



Şekil 3.3. Kiriş ebatlarının belirlenmesi için alınan ölçüm şablonu

Kirişlerin farklı bölgelerinde ve farklı kesitlerde ölçümler yapılarak, kiriş boyutları belirlenmiştir. Öncelikle, kiriş üç farklı bölgeye ayrılmıştır (A, B ve C bölgesi). A bölgesi kiriş sol ucu ile o uca en yakın yük noktası arasını, B bölgesi iki yük noktası arasını ve C bölgesi ise kiriş sağ ucu ile o uca en yakın yük noktası arasını göstermektedir. Kirişin farklı üç bölgesinden (A, B ve C bölgeleri) belirlenen kesitlere ait ölçümler alınarak çizelgeler oluşturulmuştur (EK-1).

Çizelgelerde, kiriş yüksekliği ölçümleri kirişin farklı üç bölgesinden ve kiriş ön ve arka yüzünden alınan yedişer ölçüm ile gösterilmekte ve bu ölçümler b harfi ile simgelenmektedir. Ayrıca, kiriş genişliği ölçümleri kirişin farklı üç bölgesinden ve kiriş üst yüzünden (basınç bölgesi) alınan beşer ölçüm ile gösterilmekte ve a harfi ile simgelenmektedir. Analitik hesaplarda kiriş boyutları, B bölgesinden alınan ölçümlerin ortalamalarıdır. Sabit moment bölgesi kirişin eğilme davranışını belirleyen

en önemli bölge olduğu için, bu bölgedeki ortalama kesit boyutlarının analitik hesaplarda kullanılması uygun görülmüştür.

3.2. Malzeme Mekanik Özellikleri

3.2.1. Donatı

Çalışmada kullanılan çelik çekme donatıları 12 mm, çelik basınç donatıları 10 mm, ve etriyeler 8 mm çapa sahiptir. FRP donatıların çapları ise, dijital kumpas kullanılarak alınan ölçümlerin ortalaması alınarak belirlenmiştir. Çizelge 3.2’de ortalama çap değerleri verilmektedir. Alınan tüm ölçümler ise, EK-2’de sunulmuştur.

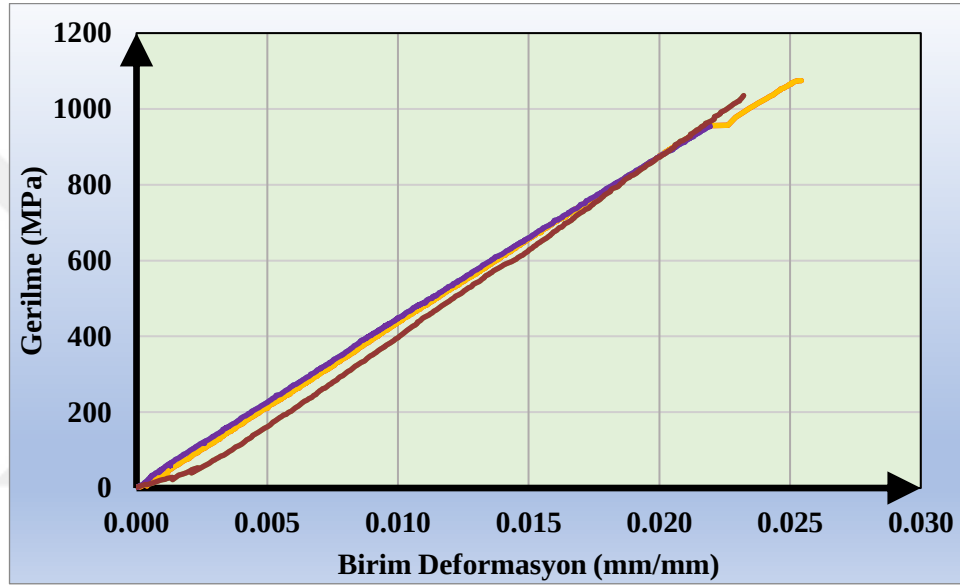
Çizelge 3.2. Ölçülen FRP donatı çapları

FRP Tipi	ϕ (mm)	Donatının Kullanıldığı Deney Elemanı Grubu
BFRP	8.68	1-3
GFRP _{Tip-1}	12.86	1
GFRP _{Tip-2}	12.23	2-3

Çalışmada kullanılan FRP donatıların mekanik özellikleri, çekme testleri yardımıyla tespit edilmiştir. Bu testlerden elde edilen veriler değerlendirilerek donatıların mekanik özellikleri belirlenmiştir. Çizelge 3.3-3.5’te sırasıyla BFRP, GFRP_{Tip-1} ve GFRP_{Tip-2} donatılara ait çekme testlerinden elde edilmiş mekanik özelliklere yer verilmiş olup Şekil 3.4-3.6’da sırasıyla bu çekme testlerine ait gerilme birim deformasyon grafikleri sunulmuştur. Ayrıca çelik çekme donatılarının 470 MPa’lık bir akma dayanımına sahip olduğu yine çekme testleri neticesinde belirlenmiştir.

Çizelge 3.3. 3 farklı BFRP donatı numunesine ait deneysel mekanik özellikler

No	Gerilme (MPa)	Birim Deformasyon	Elastisite Modülü (MPa)
1. Test	1074.58	0.0254	42254.21
2. Test	993.28	0.0231	42946.76
3. Test	1035.28	0.0232	44578.72
Ortalama	1034.00	0.024	43000
Standart Sapma	40.66	0.0013	1193.47
Değişim Katsayısı (%)	3.93	5.42	2.78



Şekil 3.4. BFRP donatıların çekme testlerine ait gerilme-birim deformasyon eğrileri

Çizelge 3.4. 4 farklı GFRP_{Tip-1} donatı numunesine ait mekanik özellikler

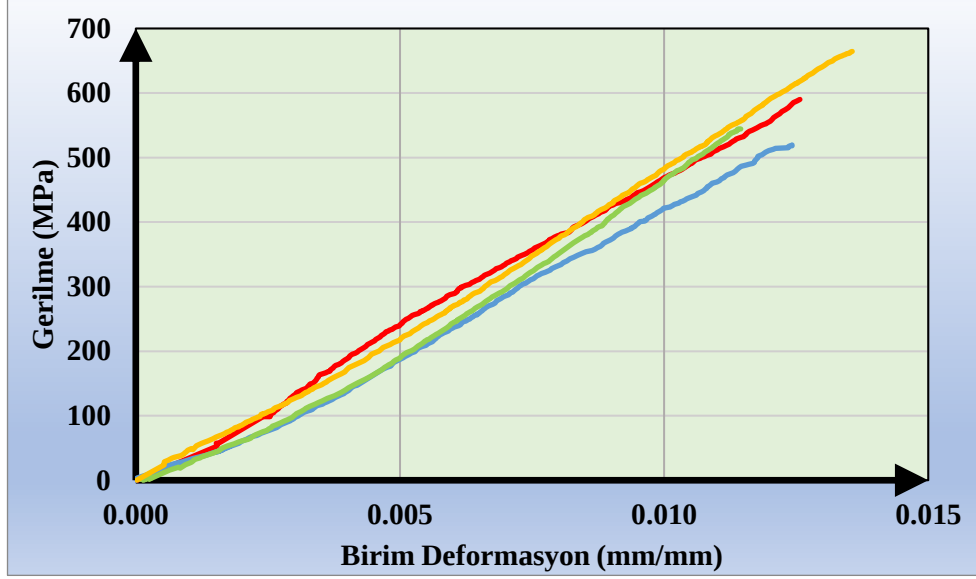
No	Gerilme (MPa)	Birim Deformasyon	Elastisite Modülü (MPa)
1. Test	504.28	0.0158	31819.07
2. Test	368.93	0.0110	33620.42
3. Test	410.96	0.0116	35576.67
4. Test	512.71	0.0128	40074.05
Ortalama	449.00	0.0128	35000
Standart Sapma	70.65	0.0022	3550
Değişim Katsayısı (%)	15.73	16.95	10.14



Şekil 3.5. GFRP_{Tip-1} donatıların çekme testlerine ait gerilme-birim deformasyon eğrileri

Çizelge 3.5. 4 farklı GFRP_{Tip-2} donatı numunesine ait mekanik özellikler

No	Gerilme (MPa)	Birim Deformasyon	Elastisite Modülü (MPa)
1. Test	590.06	0.0126	46942.45
2. Test	519.51	0.0124	41825.27
3. Test	544.33	0.0115	47539.98
4. Test	664.46	0.0136	49001.24
Ortalama	580.00	0.0125	46000
Standart Sapma	63.68	0.00086	3123
Değişim Katsayısı (%)	10.98	6.91	6.79



Şekil 3.6. GFRP_{Tip-2} donatıların çekme testlerine ait gerilme-birim deformasyon eğrileri

Çalışmada aynı deney elemanı grubu içerisinde kullanılan tüm FRP donatılar, aynı firmadan temin edilen aynı donatı serisine aittir. Bu sayede, FRP donatı özelliklerinin deney elemanı grubu için bir değişken olmasının önüne geçilmek istenmiştir. Ancak FRP donatısı çekme deneyleri sonucunda özdeş donatıların dahi farklı mekanik özelliklere sahip oluğu görülmüştür. Ayrıca donatıların mekanik özellikleri firmaların belirtmiş oldukları değerlerden oldukça farklı olarak elde edilmiştir. Bu değişkenliğin, FRP donatıların lif doğrultularındaki istenmeyen sapmalar ile malzeme (lif ve matris) özelliklerindeki farklılıklardan kaynaklandığı bilinmektedir.

3.2.2. Beton

Kirişler, iki farklı dökümde hazırlanmıştır. İlk grupta yer alan kirişler farklı beton dökümünde, ikinci ve üçüncü grupta yer alan kirişler ise farklı beton dökümünde hazırlanmıştır. Her beton dökümünde taze betondan alınan 150x300 mm veya 100x200 mm ebatlı silindir numuneler ile beton basınç dayanımları belirlenirken, 150x150x600 mm'lik altışar adet prizma numunenin dört noktalı eğilme testleri ile

beton karışımlarının eğilmede çekme dayanımları belirlenmiştir. Numune testlerinden elde edilen sonuçların ortalamaları Çizelge 3.6’da yer almaktadır.

Çizelge 3.6. Betonun silindir numune basınç dayanımları ve prizmatik numune eğilmede çekme dayanımları

Beton Dökümü	İstatistiki Veriler	f_c (MPa)	f_{ctf} (MPa)	Betonun Kullanıldığı Deney Grubu
Birinci Döküm	Ortalama	31.28	3.55	1
	Standart Sapma	3.67	0.25	
	Değişim Katsayısı (%)	11.74	7.11	
İkinci Döküm	Ortalama	30.49	3.25	2-3
	Standart Sapma	2.52	0.56	
	Değişim Katsayısı (%)	8.27	17.14	

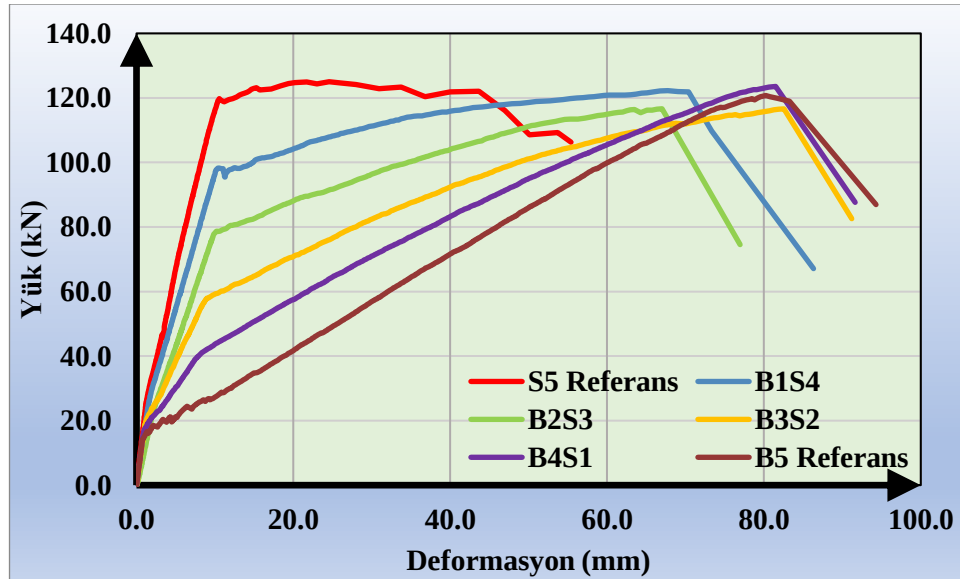
Alınan herbir numuneye ait beton basınç ve eğilmede çekme dayanımları EK-3’te yer verilmiştir.

3.3. Deneysel Gözlemler ve Kirişlerin Yük-Deplasman İlişkileri

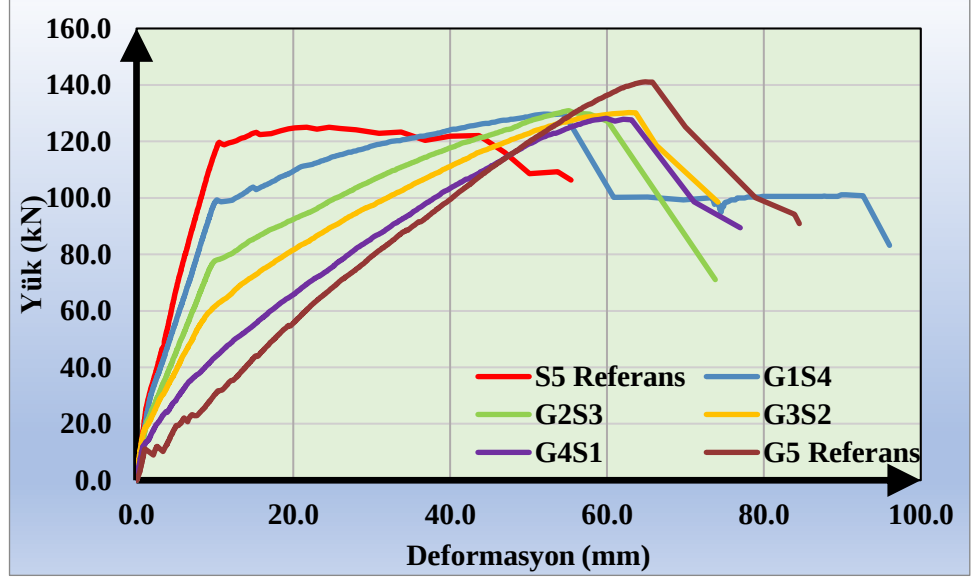
Kirişlerin deneysel yük-deplasman eğrileri Şekil 3.7-3.11’de verilmiştir. Genellikle hibrit donatılı kirişlerin yük deformasyon eğrileri, üç ayrı doğrusal bölgeye (trilinear) indirgenebilir. Bu kirişlerin yük deformasyon eğrilerinde iki noktada ani eğimsel değişimler gözlemlenmektedir. Bu değişimlerden ilki ilk eğilme çatlağının oluştuğu anı, ikincisi ise çelik donatıların aktığı anı temsil etmektedir. Hibrit donatılı kirişlerde FRP donatı oranı arttıkça ilk çatlama sonrasında rijitliklerde daha büyük düşüşler gözlemlenmektedir. Bunun sonucunda, FRP donatı oranı fazla olan kirişlerde aynı yük seviyesine karşılık gelen deformasyon değerleri artmaktadır. Ayrıca FRP donatı oranı arttıkça çelik donatılarda akma daha düşük yük seviyelerinde meydana gelmekte ve akma sonrası rijitliklerdeki azalmaların daha küçük olduğu görülmektedir. Yine FRP donatı oranı arttıkça kirişlerin deformabilitesi (toplam deformasyon kapasitesi) genel olarak artmaktadır.

Önceki çalışmalardan farklı olarak bu çalışmada, aynı deney elemanı grubunda yer alan kirişlerin taşıma güçlerinin birbirine yakın olması hedeflenmiştir. Çok yakın taşıma gücü değerleri araştırmacılara deformabilitenin, sünekliğin ve enerji tüketme kapasitelerinin doğru bir biçimde kıyaslanabilmesi imkanını sunmuştur. Bu biçimde hibrit FRP-çelik donatılı kirişlerin tasarımı için önemli değerlendirmeler yapılmış ve ilgili yönetmeliklere öneri niteliği taşıyan bir çalışma gerçekleştirilmiştir.

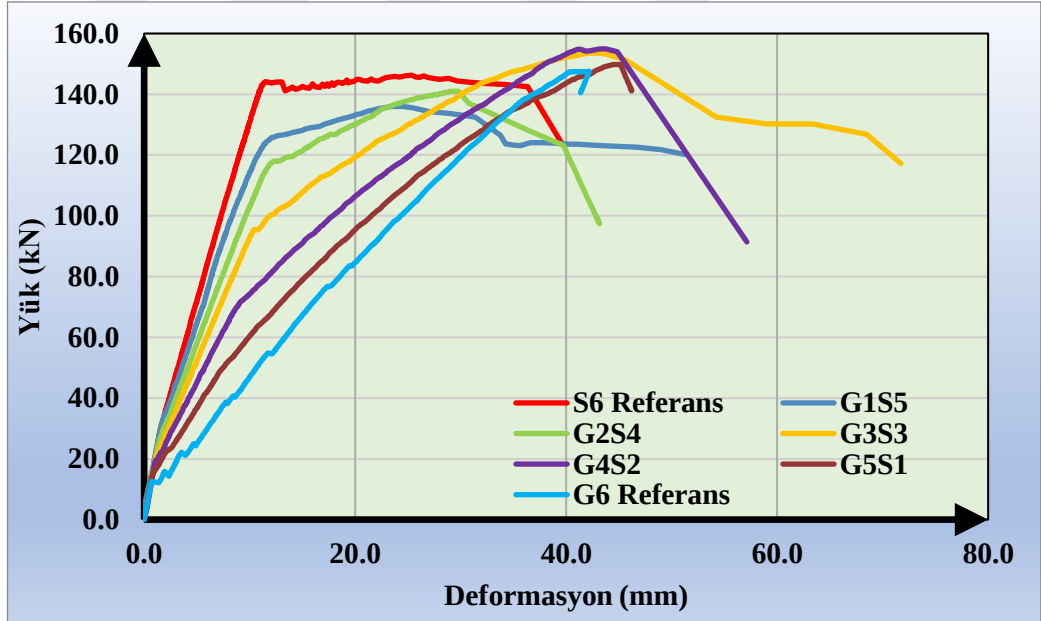
Şekil 3.7’de salt çelik donatılı S5 referans, salt BFRP donatılı B5 referans elemanı ve hibrit BFRP-çelik donatılı kirişlere ait yük-deformasyon eğrileri; Şekil 3.8’de salt çelik donatılı S5 Referans, salt GFRP donatılı G5 referans elemanı ve hibrit GFRP-çelik donatılı kirişlere ait yük-deformasyon eğrileri; Şekil 3.9’da salt çelik donatılı S6 referans, salt GFRP donatılı G6 referans elemanı ve hibrit GFRP-çelik donatılı kirişlere ait yük-deformasyon eğrileri; Şekil 3.10’da salt çelik donatılı S3 referans, salt BFRP donatılı B5 (B3) referans elemanı ve hibrit BFRP-çelik donatılı kirişlere ait yük-deformasyon eğrileri; ve Şekil 3.11’de S3 referans, salt GFRP donatılı G3 referans elemanı ve hibrit GFRP-çelik donatılı kirişlere ait yük-deformasyon eğrileri verilmiştir.



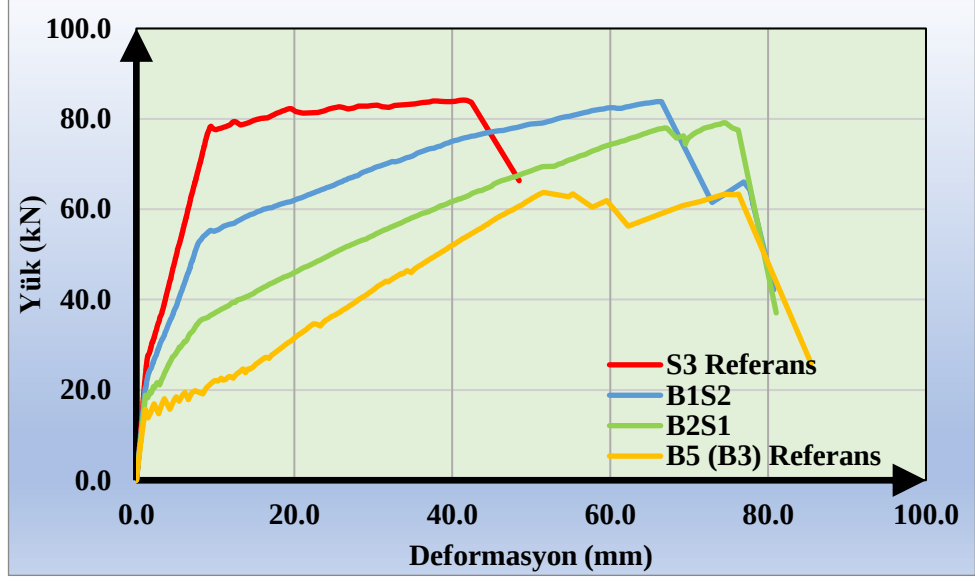
Şekil 3.7. Salt çelik, salt BFRP ve BFRP-çelik hibrit donatılı denge üstü donatılı birinci grup kirişlerine ait yük-deformasyon grafikleri



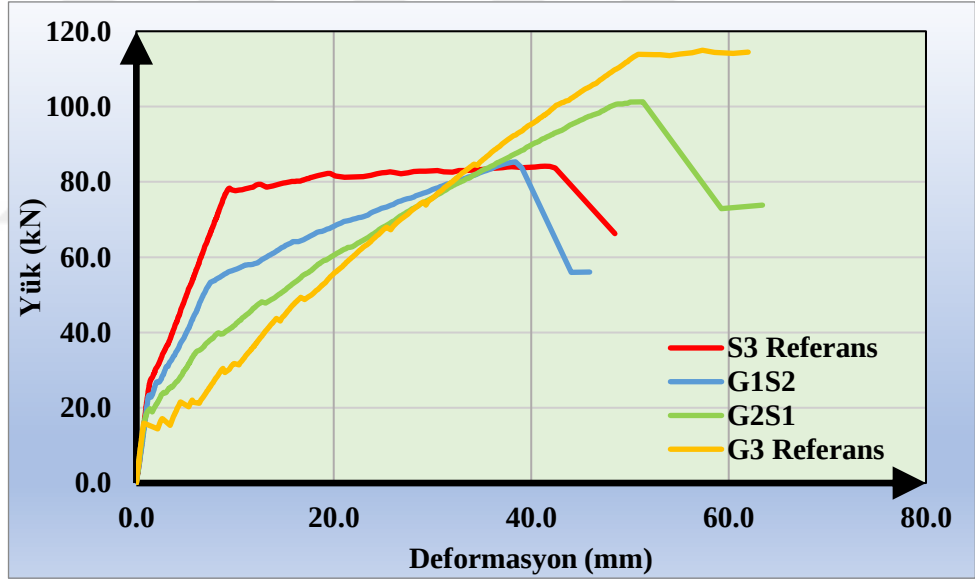
Şekil 3.8. Salt çelik, salt GFRP ve GFRP-çelik hibrit donatılı denge üstü donatılı birinci grup kirişlerine ait yük-deformasyon grafikleri



Şekil 3.9. Salt çelik, salt GFRP ve GFRP-çelik hibrit donatılı denge üstü donatılı ikinci grup kirişlerine ait yük-deformasyon grafikleri



Şekil 3.10. Salt çelik, salt BFRP ve BFRP-çelik hibrit donatılı denge altı donatılı üçüncü grup kirişlerine ait yük-deformasyon grafikleri



Şekil 3.11. Salt çelik, salt GFRP ve GFRP-çelik hibrit donatılı denge altı donatılı üçüncü grup kirişlerine ait yük-deformasyon grafikleri

Her deney grubu kendi içinde incelendiğinde rijitliği en yüksek elemanın salt çelik donatılı, rijitliği en düşük olan elemanın ise salt FRP donatılı kirişler olduğu ve bu durumun FRP malzemesinin düşük elastisite modülüne sahip olmasından kaynaklandığı görülmektedir. Hibrit donatılı kirişlerin rijitlikleri ise, salt çelik ve salt

FRP donatılı referans kirişlerin rijitlik değerleri arasında yer almaktadır. Ayrıca, salt FRP donatılı kirişlerin yük deformasyon ilişkilerinin doğrusala yakın devam ederek, yani akma özelliği göstermeksizin, ani bir göçmeye kadar devam etmesi, bu kirişlerin süneklik problemini gözler önüne sermektedir. Hibrit donatılı kirişlerde akmanın kiriş maksimum yük seviyesinin altında bir yük seviyesinde meydana gelmesi, bu kirişlere bir süneklik güvencesi sağlamaktadır. Tüm bu durumlar göz önünde bulundurularak, salt FRP donatılı kirişlerde gözlenen servis sınır durumu ve süneklik problemleri için hibrit donatılı kirişlerin iyi bir alternatif olabileceği sonucu ortaya çıkmaktadır.

İlk grupta yer alan elemanlardan G1S4 ve B1S4 numuneleri haricinde tüm kirişler, beklendiği gibi taşıma güçlerine betonun ezilmesi sonucunda ulaşmıştır. İkinci grupta yer alan kirişlerin tamamı, beklenen kırılma sınır durumuna uygun olarak, yani betonun ezilmesi neticesinde taşıma gücüne ulaşmıştır. Üçüncü grupta yer alan kirişlerde ise B1S2 ve G3 referans kirişleri dışında tüm kirişler, FRP donatıların kopması neticesinde, yani beklenen çekme kırılma türü ile taşıma gücüne ulaşmıştır. Deney kirişlerinden dört tanesinin beklenenden farklı kırılma türü sonucu taşıma güçlerine ulaşmalarının, FRP donatıların mekanik özelliklerinin önemli ölçüde değişkenlik göstermesinden ve özdeş donatıların dahi farklı mekanik özelliklere sahip olabileceği gerçeğinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Malzeme özelliklerinin tespiti sırasında da görüldüğü gibi, donatı içerisindeki liflerin dağılımı ve doğrultuları ile polimer özelliklerinde meydana gelen en ufak değişimlerin dahi FRP donatıların mekanik özelliklerinde farklılıklara sebep olduğu bilinmektedir.

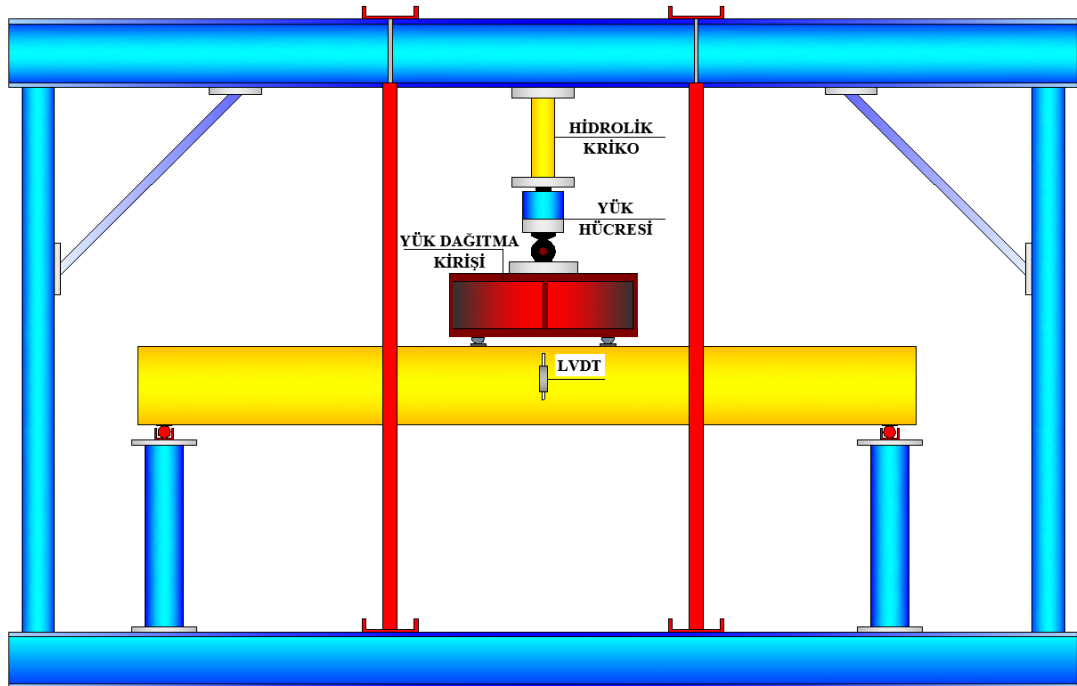
Tüm eleman gruplarında kirişler taşıma güçleri birbirine yakın olacak şekilde tasarlanmıştır. Deneysel grafiklerden de anlaşılabacağı üzere ilk deney grubu yaklaşık 125 kN, ikinci deney grubu ise yaklaşık 150 kN'luk taşıma gücüne sahip kirişlerden oluşmaktadır. Üçüncü deney grubu (bazalt donatılı grup) yaklaşık 80 kN'luk taşıma gücüne sahiptirler. Ancak, yalnızca B5 (B3) referans kirişi, diğerlerinden farklı taşıma gücüne sahip olmuştur. Bunun, kirişte aynı çaplı BFRP donatılarının kullanılmamasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Tüm deney grupları içerisinde yalnızca üçüncü deney grubu (cam elyaf donatılı grup) kirişlerinde taşıma güçleri birbirine yakın değildir. Bunun temel sebebi, bu grupta kullanılan cam elyaf donatıların aynı firmadan temin edilmesi neticesinde mekanik özelliklerinin aynı

olacağı düşünülerek kirişlerin tasarlanmasıdır. Daha sonra gerçekleştirilen çekme testleri neticesinde donatıların farklı mekanik özelliklere sahip olduğu belirlenmiştir. Deneysel çalışmada yer alan tüm kirişlere ait beton öncesi kalıp içinden ve deney sonu resimleri EK-4’te, çatlak haritaları ise EK-5’te verilmiştir.

3.4. Test Düzenegi ve Ölçüm Düzeni

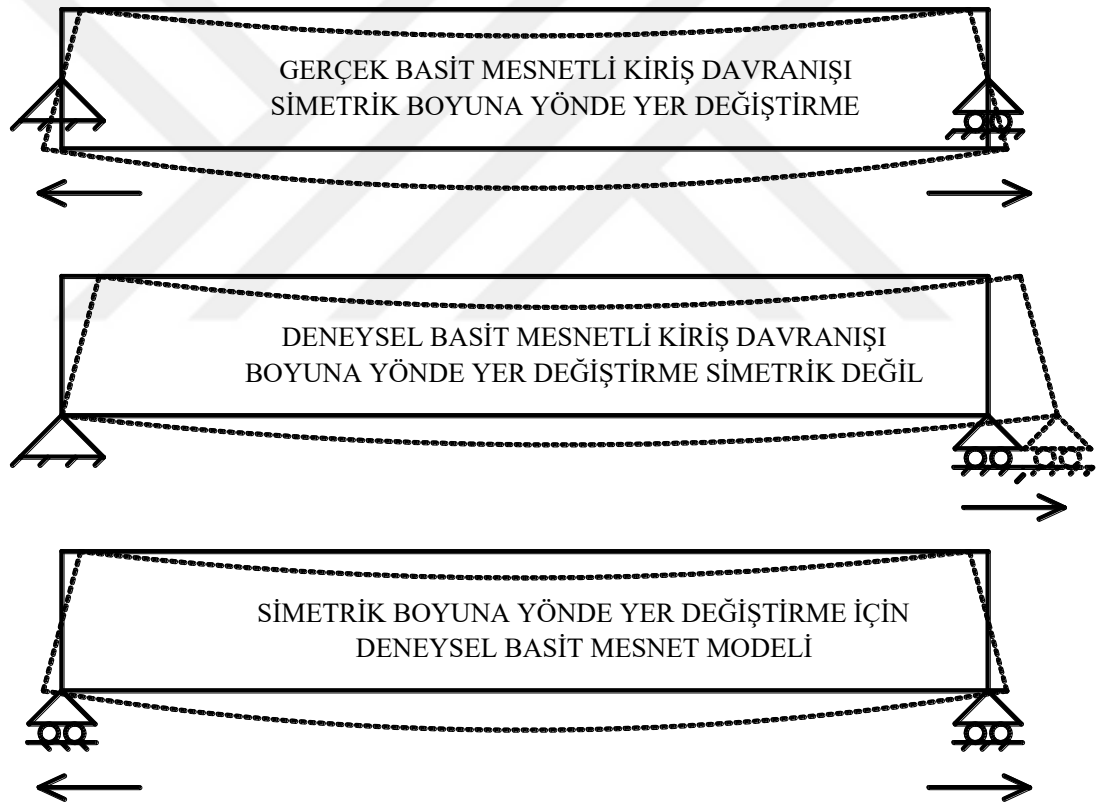
Tüm deneysel çalışmalar Atılım Üniversitesi Yapı Mekaniği Laboratuvarında yer alan çelik deney çerçevesinde gerçekleştirilmiştir. Tüm kirişler, iki noktalı yükleme (dört noktalı eğilmeye) maruz bırakılmıştır. Tüm kirişler basit mesnetli olup 2800 mm net açıklığa (mesnetler arası mesafeye) sahiptir.

Yük sisteme, otomatik pompa ve hidrolik kriko vasıtasıyla aktarılmıştır (Şekil 3.12). Yük, öncelikle dağıtma kirişine (I-profil), buradan da kirişin üstünde kiriş orta noktasına 250’şer mm uzaklıklarda bulunan iki adet yarım silindire aktararak paylaştırılmıştır. Bu yükleme şekliyle iki yük noktası arasında kalan bölgede kesme sıfırlanarak sabit moment altında salt eğilme etkisi gözlenmek istenmiştir. Aynı bölgede kesme etkisi olmaması nedeni ile enine donatılar bu bölgede kullanılmamıştır.



Şekil 3.12. Eğilme Test Düzenegi

Kirişler, sadece boyuna eksenlerini ifade eden çizgisel modeller yardımıyla analiz edilirken, basit mesnetlerin kiriş boyuna eksen hizasında yer aldığı düşünülür. Bu durumda, mesnet noktalarında boyuna doğrultuda herhangi bir yerdeğiştirme gerçekleşmemekte ve bu mesnetler dönme serbestliği sağladıkları için boyuna eksen seviyesinin altında ve üstünde boyuna yerdeğiştirmeler ortaya çıkmaktadır. Kiriş deneylerinde mesnetler kirişin boyuna eksen hizasına yerleştirilemez. Kirişin altına yerleştirilen basit mesnetlerden birinin sabit, diğerinin ise kayıcı olması durumunda simetrik olmayan bir kiriş davranışı ortaya çıkar (Şekil 3.13). Bu simetrik olmayan kiriş davranışının önüne geçmek için her iki mesnetin de kayıcı olarak seçilmesi daha uygundur. Kirişin iki kayıcı mesnetle boyuna yönde labil olması, boyuna yöndeki yer değiştirmelerin önemsenmeyecek kadar küçük olması sebebiyle göz ardı edilebilir.



Şekil 3.13. Deneyel mesnetlenme modeli

Çalışmada deney düzeneğinde yer alan bir adet yük hücresi, iki adet LVDT ve bir adet data logger (veri toplayıcı) aracılığı ile yük ve deformasyon ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Yük değerleri 50 ton kapasiteli yük hücresi aracılığı ile kg-f

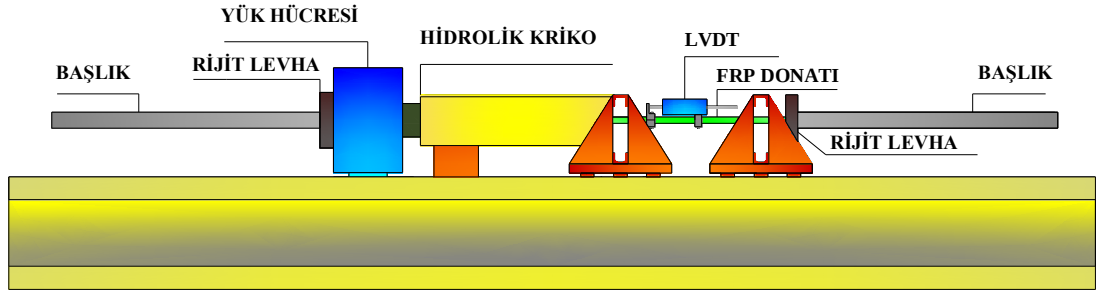
cinsinden ölçülürken yükleme etkisi neticesinde meydana gelen deformasyonlar 100'er mm kapasiteye sahip olan iki adet LVDT aracılığı ile mm cinsinden ölçülmüştür. Çalışmada tüm veriler veri toplayıcı aracılığı ile belirlenmiş, her yük değerinde iki adet sehim ölçümü yapılmıştır.

Çalışmada LVDT'ler kirişin tam orta noktasında kirişin arka ve ön yüzeylerine yerleştirilmiştir. Bunun amacı, kiriş yükleme esnasında yüklemenin dışmerkezliğini, yani kirişte dönme (burulma etkisi) meydana gelip gelmediğini kontrol etmek ve herhangi bir LVDT'de deformasyon verisi alınmasında problem yaşanmasına karşın önlem almaktır.

Çalışmada deneylerin yapıldığı her günün başlangıcında yük hücresi ve LVDT'lerin doğru ölçüm yapıp yapmadığı kontrol edilmiştir ve aksi durumlarda ölçüm cihazları kalibre edildikten sonra deneyler başlatılmıştır. Hiçbir deney elemanında veri okuma ilgili herhangi bir sıkıntı yaşanmamıştır. Farklı kirişler için 2 farklı LVDT aracılığı ile elde edilen tüm deformasyon değerlerinin birbirleriyle uyum içinde olduğu görülmüş ve her kirişin yük deplasman grafikleri çizdirilirken bu iki deformasyon ölçüm değerinin ortalaması alınmıştır.

BFRP ve GFRP donatıların çekme dayanımı, elastisite modülü ve kopma birim deformasyonları değerlerinin yani mekanik özelliklerinin belirlenebilmesi için bu donatılar öncelikle doğrudan (başlıksız) çekmeye maruz bırakılmıştır. Bu durumda donatı kendisini tutan çenelerce ezilmiş ve bu ezilme sebebiyle donatının mekanik özellikleri belirlenememiştir. Bu donatıların mekanik özelliklerinin belirlenebilmesi için, donatılara başlık yapılarak başlıklı donatı numuneleri yatay bir çekme düzeneğinde test edilmiştir (Şekil 3.14). Bu düzenekte, çelik bir I-profil kiriş üzerine monte edilmiştir. Sisteme yükler hidrolik krik o aracılığı ile uygulanmıştır. Yük değerleri yük hücresi ve deformasyonlar ise 1 adet LVDT aracılığı ile elde edilmiştir. FRP donatıların her iki ucuna da 300'er mm'lik başlık yapılarak çekme testleri gerçekleştirilmiştir. Dış çapı 26.9 mm ve et kalınlığı 2.6 mm olan başlıklar, yüksek dayanımlı ankraj (Groud) harcı ile doldurulmuştur. Yapılan bu çekme testlerinde genelde numuneler kopmaya ulaşmış ve donatıların mekanik özellikleri doğru bir şekilde belirlenmiştir. Bazı çekme testlerinde ise donatı başlıklardan sıyrılmış ve

deneyler başarısız olmuştur. Ancak başlık uzunluğu 600 mm'lere çıkarılmasıyla sıyrılma problemi de ortadan kaldırılmıştır.



Şekil 3.14. FRP donatı çekme test düzeneği

4. EĞİLME

Çalışmada yer alan kirişlerde sabit moment (kesme sıfır) bölgesi dışında sık etriyeler kullanılarak, kirişlerin önemli bir kesme hasarına maruz kalmadan eğilme kapasitelerine ulaşmaları sağlanmıştır. Bu sayede, kiriş sünekliği ve eğilme davranışının kesme çatlaklarından minimum düzeyde etkilenmesi hedeflenmiştir. Bu bölümde eğilme taşıma gücü hesapları ile bu hesaplarda faydalanan malzeme modelleri detaylı olarak anlatılmıştır.

Deney kirişlerinde kesme kuvvetlerinin sıfır olduğu bölgede (sabit moment bölgesi) basınç donatısının ve etriyenin bulunmaması planlanmış ve deney kirişlerinin bütününde sıfır-kesme bölgesinde etriye kullanılmamıştır. Ancak, ilk deney grubu kirişlerinin sabit moment bölgesindeki basınç donatılarının kesilmesi unutulmuş ve eğilme testleri bu şekilde gerçekleştirilmiştir. Bu durum, deneyler tamamlandıktan sonra fark edilmiştir. Bilindiği üzere, basınç donatıları yeteri kadar etriye ile desteklenmediklerinde artan eğilme momentleri altında burkularak etkisiz kılırlar. Etriyesiz bölgede basınç donatıları burkulmaya karşı yalnızca kendisini çevreleyen beton tarafından desteklenmektedir. Deneyler sırasında yük seviyesi arttıkça, donatı üzerindeki basınç kuvveti de artarak donatılar burkulmuştur. Bazı deney kirişlerinde burkulma ile ezilmenin aynı anda gerçekleşmesi, burkulmanın beton ezilmesini tetiklediğini yani ezilmenin daha düşük birim deformasyon değerlerinde gerçekleşmesine neden olduğunu düşündürmüştür. Bu etkinin gerçekleşip gerçekleşmediğini anlayabilmek için hibrit GFRP-çelik donatılı iki kiriş hazırlanmıştır. Bu kirişler, aynı mekanik özelliklere sahip olan 1'er adet GFRP ve 4'er adet çelik çekme donatısına sahiptir. Enine donatı detayları da diğer tüm kirişler ile aynı olan bu iki kirişin birbirinden tek farkı kirişlerden birinde etriyesiz bölgede basınç donatısı kullanılırken diğerinde basınç donatısının kullanılmaması olmuştur. Eğilme testlerinde gerinim pulları (strain gauge) kullanılarak betonun ezilme birim deformasyonları ölçülmüştür. Testlerin sonuçları, basınç donatısız kirişte betondaki ezilmenin 0.0037 birim deformasyon değerinde gerçekleştiğini ancak basınç donatılı kirişte bu değerin 0.003'e çok yakın olduğunu göstermiştir. Bu durum, basınç donatısında meydana gelen burkulmanın betonun ezilmesi üzerinde etkisini ortaya

çıkarmıştır. Ezilme birim deformasyon değerindeki bu düşüş ilk deney grubu kirişleri eğilme momenti kapasite hesapları yapılırken göz önünde bulundurulmuştur. Betonun burkulan donatı etkisiyle ezilme birim deformasyonundan kısa bir süre önce dağılmasının sünekliğe etkisi yok denecek kadar az olduğundan, aradaki bu fark süneklik karşılaştırmalarında ihmal edilmiştir.

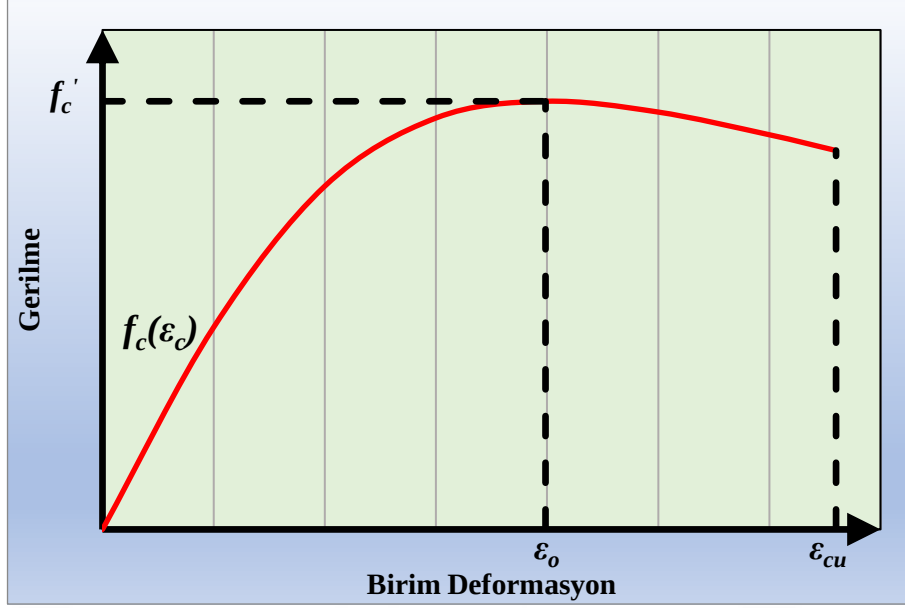
Çalışmanın ikinci ve üçüncü kısmında yer alan tüm kirişlerde sabit moment (sıfır-kesme) bölgelerinde basınç donatısının kullanılmamasına dikkat edilmiştir. Böylelikle, betonun ezilmesini tetikleyebilecek diğer faktörler ortadan kaldırılmıştır.

4.1. Malzeme Modelleri

Çalışmada analitik hesaplar için beton, çelik çekme donatısı, çelik basınç donatısı ve FRP donatılar için malzeme modelleri kullanılmıştır. Tüm bu modeller bu bölüm içerisindeki alt başlıklarda ele alınmıştır.

4.1.1. Todeschini Beton Modeli

Şekil 4.1’de çalışmada kullanılan Todeschini ve diğ. [32] beton modeline ait gerilme-birim deformasyon eğrisine yer verilmiştir. Bu modelin, beton dayanımı yaklaşık 6000 psi’a (41.37 MPa) kadar olan betonlar için geçerli olduğu belirtilmektedir. Bu modelde betonun gerilme-birim deformasyon ilişkisi sürekli tek bir fonksiyon ile ifade edilmektedir.



Şekil 4.1. Todeschini beton modeline ait gerilme-birim deformasyon eğrisi

Bu eğride betonun maksimum basınç dayanımı f'_c ile gösterilmekte ve bu dayanımın beton silindir basınç dayanımının (f_c) %90'ına eşit olduğu ($f'_c=0.9 \cdot f_c$) kabul edilmektedir. Bu durum, silindir numune ile eleman arasında kür koşulları, boyut etkisi ve yükleme hızından kaynaklanan dayanım farkını göstermektedir. ε_o betonda maksimum basınç dayanımına karşılık gelen birim deformasyon değerini göstermekte ve $\varepsilon_o=1.71 \cdot f'_c / E_c$ formülü ile hesaplanmaktadır. Todeschini ve diğ. [32] modelinde betonun ezilme birim deformasyon değeri $\varepsilon_{cu}=0.0038$ ve elastisite modülü E_c ile gösterilmektedir. Betonun belli bir birim deformasyonu (ε_c) değerine karşılık gelen gerilme Denklem 4.1 ile hesaplanmaktadır:

$$f_c(\varepsilon_c) = \frac{2 \cdot f'_c \cdot \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_o} \right)}{1 + \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_o} \right)^2} \quad (4.1)$$

Bu modelde eşdeğer dikdörtgen basınç bloğu genişlik katsayısı $\beta_1(\varepsilon_c)$, betonun birim deformasyon değerine bağlı bir fonksiyon ile Denklem 4.2'de verilmektedir. Bu

katsayısının f'_c ile çarpılması neticesinde beton basınç bloğunun ortalama gerilme değeri $\beta_1(\varepsilon_c) \cdot f'_c$ elde edilmektedir.

$$\beta_1(\varepsilon_c) = \frac{\ln \left[1 + \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_o} \right)^2 \right]}{\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_o}} \quad (4.2)$$

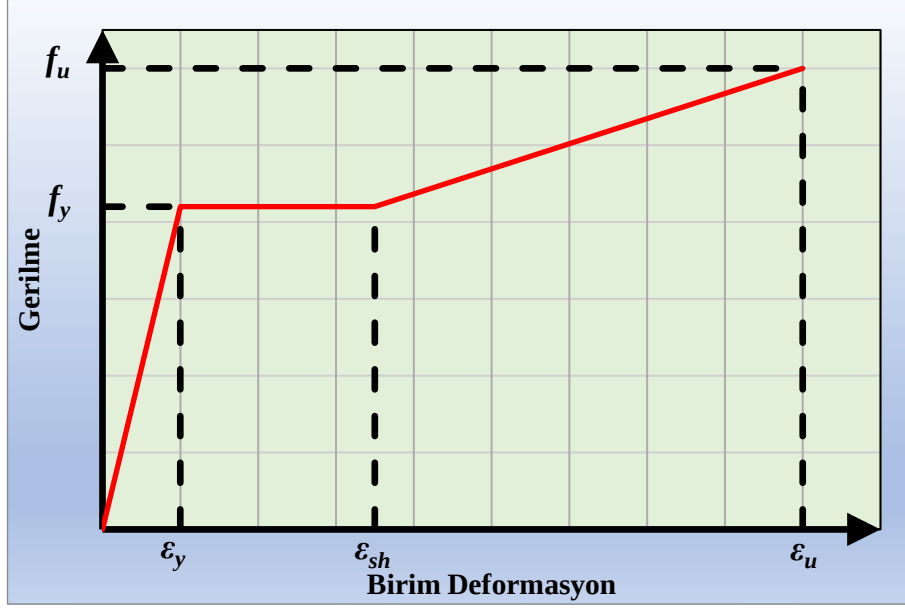
Betonun eşdeğer dikdörtgen basınç bloğu derinlik katsayısı $k_2(\varepsilon_c)$, Denklem 4.3'te verilen betonun birim deformasyonuna bağlı olarak değişen bir fonksiyon ile hesaplanmaktadır:

$$k_2(\varepsilon_c) = 1 - \frac{2 \cdot \left[\left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_o} \right) - a \tan \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_o} \right) \right]}{\left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_o} \right)^2 \cdot \beta_1(\varepsilon_c)} \quad (4.3)$$

4.1.2. Çelik Donatı Modeli

Çalışmada S420 sınıfı çelik çekme donatısı için pekleşmenin dikkate alındığı üç-dorusal (trilinear) bir donatı modeli kullanılmıştır. Şekil 4.2'de çelik çekme donatısı gerilme-birim deformasyon modeli gösterilmektedir. Donatıdaki gerilme $f_s(\varepsilon_{st})$, birim deformasyon değerine (ε_{st}) bağlı olacak şekilde Denklem 4.4'te verilen fonksiyon ile ifade edilmektedir:

$$f_s(\varepsilon_{st}) = \begin{cases} E_s \cdot \varepsilon_{st} & 0 \leq \varepsilon_{st} < \varepsilon_y \\ f_y & \varepsilon_y \leq \varepsilon_{st} < \varepsilon_{sh} \\ f_y + E_{s1} \cdot (\varepsilon_{st} - \varepsilon_{sh}) & \varepsilon_{sh} \leq \varepsilon_{st} < \varepsilon_u \end{cases} \quad (4.4)$$

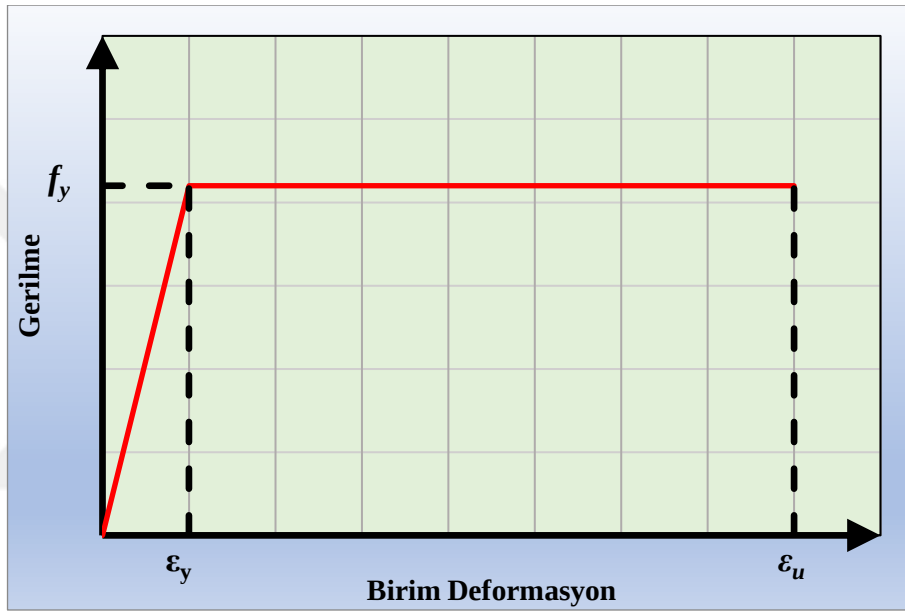


Şekil 4.2. Çelik çekme donatısı gerilme birim deformasyon eğrisi modeli

Bu modelde çelik donatı gerilme-birim deformasyon ilişkisi üç farklı bölgeye sahiptir. Birincisi elastik bölge olarak tanımlanmıştır. Donatının başlangıçtan akmaya ulaştığı ana kadar devam eden kısım, malzemenin doğrusal-elastik özellik gösterdiği kısımdır. Aslında, gerilme-birim deformasyon eğrisinin doğrusallığı, orantılılık limiti adı verilen ve akma gerilmesinin yaklaşık %80'ine eşit bir gerilme değerine karşılık gelen bir noktaya kadar devam eder ve bu orantılılık limitinin ötesinde doğrusallık belli oranda bozulur. Ancak bu çalışma kapsamında kullanılan gerilme-birim deformasyon modelinde bu sınırlı doğrusal olmayan kısmın varlığı ihmal edilmiştir. Donatının akma gerilmesi f_y ve bu noktaya karşılık gelen akma birim deformasyonu ϵ_y ile gösterilmektedir. Çekme testleri neticesinde donatılardaki akma gerilmesi ortalama olarak $f_y=470$ MPa olarak belirlenmiştir. Elastik bölgede gerilmenin birim deformasyona oranı donatının elastisite modülünü ($E_s=200$ GPa) göstermektedir. Modelde donatının akma anı ile pekleşme başlangıcı arasında kalan ikinci kısım akma bölgesi olarak adlandırılmıştır. Bu kısımda donatı sabit akma gerilmesi altında pekleşme başlangıcına kadar birim deformasyon yapmaya devam etmektedir. Donatının pekleşmeye başladığı anda sahip olduğu birim deformasyon değeri ϵ_{sh} ile gösterilmektedir ve bu donatı modelinde $\epsilon_{sh}=0.005$ değerine sahiptir. Bu modelde yer alan üçüncü ve son bölge, donatıda gerilmenin yeniden artmaya başladığı noktadan en büyük gerilmeye ulaştığı (koptuğu) noktaya kadar olan kısmı kapsayan pekleşme

bölgesidir. Donatının kopma dayanımı f_u ve kopma birim deformasyonu ε_u ile gösterilmektedir. Ayrıca bu bölgede grafiğin eğimi için pekleşme bölgesi elastisite modülü (E_{s1}) kullanılmış ve bu modül, modelde $E_{s1}=1379$ MPa olarak alınmıştır.

Çelik basınç donatısı için pekleşmenin ihmal edildiği elasto-plastik bir donatı modeli kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan basınç donatı modeline Şekil 4.3'te yer verilmektedir. Bu modelde donatı gerilmesi $f_{cs}(\varepsilon_{cs})$, fonksiyonu aracılığı ile donatının herhangi bir birim deformasyon değerine (ε_{cs}) bağlı olarak ifade edilmektedir.



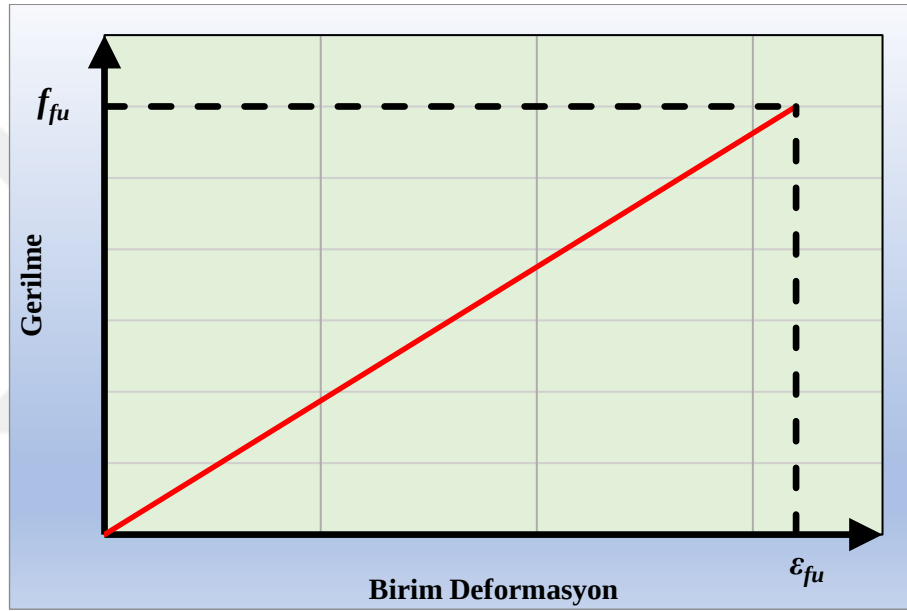
Şekil 4.3. Çelik basınç donatısı gerilme birim deformasyon eğrisi modeli

Bu donatı modeli elastik ve plastik bölge olmak üzere iki bölgeden oluşmaktadır. Elastik bölgede ve akma bölgesinde (plastik bölgede), çeliğin basınç altındaki gerilme-birim deformasyon özellikleri ile çekme altındaki özellikleri aynı olduğu için, aşağıdaki denklem (Denklem 4.5) kullanılmıştır:

$$f_{cs}(\varepsilon_{cs}) = \begin{cases} E_s \cdot \varepsilon_{cs} & 0 \leq \varepsilon_{cs} < \varepsilon_y \\ f_y & \varepsilon_y \leq \varepsilon_{cs} < \varepsilon_{su} \end{cases} \quad (4.5)$$

4.1.3. FRP Donatı Modeli

Çalışmada kullanılan FRP donatılar doğrusal gerilme birim deformasyon ilişkisine sahip olacak şekilde modellenmiştir. Bu donatılarda gerilme FRP donatısının herhangi bir birim deformasyonuna (ε_{frp}) bağlı olacak şekilde $f_{frp}(\varepsilon_{frp})$ fonksiyonu aracılığı ile gösterilmiştir. Şekil 4.4'te bu donatılara ait gerilme birim deformasyon ilişkisine yer verilmektedir. Gerçekte, gerilme ile birim deformasyon arasındaki doğrusal ilişki ilerleyen birim deformasyon değerleri altında yitirilse de, doğrusal olmayan bu sınırlı bölge analitik modelde ihmal edilmiştir.



Şekil 4.4. FRP donatısı gerilme birim deformasyon eğrisi modeli

FRP donatıları için kullanılan model, doğrusal tek bir fonksiyondan oluşmaktadır (Denklem 4.6). Gerilmenin birim deformasyona oranı olan FRP donatısının elastisite modülü E_f ile gösterilmektedir. FRP donatısı kopma dayanımı f_{fu} ve bu anda sahip olduğu kopma birim deformasyonu ε_{fu} ile ifade edilmektedir.

$$f_{frp}(\varepsilon_{frp}) = E_f \cdot \varepsilon_{frp} \quad (4.6)$$

4.2. Hibrit Donatılı Kiriş Göçme Sınır Durumu Tanımları

ACI 440.1R-15 [1], FRP donatı kopmasının betonun ezilmesinden daha gevrek bir kırılma şekli olmasından hareketle salt FRP donatılı kirişler için basınç kırılmasını önermektedir. Yani kiriş taşıma gücüne ulaşırken betonun ezilmesinin, FRP donatısının kopmasından önce gerçekleşmesi istenmektedir. Ancak hibrit donatılı kirişler için herhangi bir kırılma modu önerisi bu yönetmelikte yer almamaktadır. Literatürde yer alan çalışmalarda test edilen hibrit donatılı kirişlerin de FRP donatı oranı bakımından denge üstü donatılı olduğu, bu çalışmalarda denge altı donatılı kirişlerin ise göz ardı edildiği görülmektedir. Halbuki hibrit donatılı kirişlerde eleman ister denge altı ister denge üstü donatı oranına sahip olsun, kiriş taşıma gücüne ulaşmadan önce çelik çekme donatısı akacak ve kiriş kırılmadan önce yeterli uyarı göstermiş olacaktır.

Bu çalışmada yer alan tüm kirişler çelik donatı oranı bakımından denge altı donatılıdır, yani tüm kirişler taşıma güçlerine beton ezilmeden önce çelik donatıların akması neticesinde ulaşmıştır. Çalışmada kirişlerin gruplandırılmasında kullanılmış olan FRP donatı oranına göre kırılma sınır durumları aşağıdaki gibidir:

4.2.1. Denge Üstü Kırılma Sınır Durumu

FRP-çelik hibrit donatılı kirişlerde, çelik donatıların akmasından sonra ve FRP donatısı kopması gerçekleşmeden önce betonun ezilmesi neticesinde taşıma gücüne ulaşılan kırılma modudur. Taşıma gücü anında gevrek malzeme özelliğine sahip FRP donatısı kopmamakta yani kapasitesinin tamamına ulaşamamaktadır.

Bu durumda çelik donatısının birim deformasyon değeri (ϵ_{st}) akma birim deformasyon değerini (ϵ_y) aşmakta, betonun birim deformasyon değeri (ϵ_c) ezilme birim deformasyon değerine (ϵ_{cu}) eşit olmakta ve FRP donatısının birim deformasyon değeri (ϵ_{frp}) kopma birim deformasyon değerinden (ϵ_{fu}) daha düşük olmaktadır (Denklem 4.7):

$$\left. \begin{array}{l} \varepsilon_{st} > \varepsilon_y \\ \varepsilon_c = \varepsilon_{cu} \\ \varepsilon_{frp} < \varepsilon_{fu} \end{array} \right\} \text{ Denge üstü kırılma} \quad (4.7)$$

4.2.2. Denge Altı Kırılma Sınır Durumu

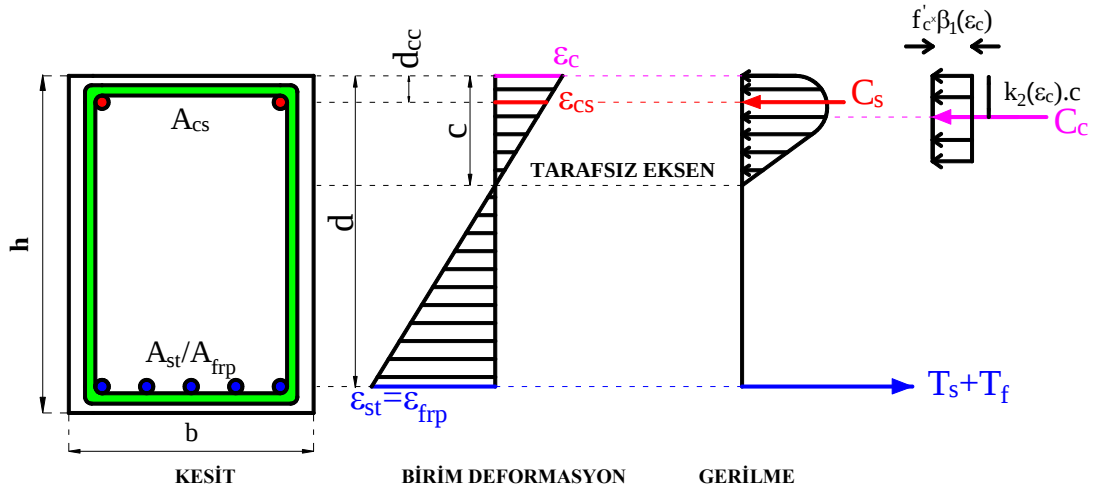
FRP-çelik hibrit donatılı kirişlerde, çelik donatıların akmasından sonra ve betonun ezilmesi gerçekleşmeden önce FRP donatısının kopması neticesinde taşıma gücüne ulaşılan kırılma modudur. Taşıma gücü anında beton, ezilme birim deformasyon değerine ulaşamamaktadır.

Bu durumda çelik donatısının birim deformasyon değeri (ε_{st}) akma birim deformasyon değerini (ε_y) aşmakta, betonun birim deformasyon değeri (ε_c) ezilme birim deformasyon değerinden (ε_{cu}) daha düşük olmakta ve FRP donatısının birim deformasyon değeri (ε_{frp}) kopma birim deformasyon değerine (ε_{fu}) eşit olmaktadır (Denklem 4.8):

$$\left. \begin{array}{l} \varepsilon_{st} > \varepsilon_y \\ \varepsilon_c < \varepsilon_{cu} \\ \varepsilon_{frp} = \varepsilon_{fu} \end{array} \right\} \text{ Denge altı kırılma} \quad (4.8)$$

4.3. Eğilme Taşıma Gücü Hesabı

Kirişlerin eğilme momenti kapasiteleri üç temel varsayıma dayalı olarak hesaplanmıştır. Bu varsayımlardan ilkinde göre, eğilme öncesindeki düzlem kesitler eğilme sonrasında da düzlem olarak kalmaktadırlar. İkincisi çekme bölgesinde yer alan betonun katkısının ihmal edilmesidir. Üçüncüsü ise donatılar ile beton arasında tam aderans kabulü yani aynı seviyede yer alan beton, çelik ve FRP donatıların birim deformasyonlarının birbirine eşit olmasıdır ($\varepsilon_{st} = \varepsilon_{frp}$). Şekil 4.5'te kesit taşıma gücü anında kirişte oluşan iç kuvvetler ile birim deformasyon eğrisi ilişkilerine yer verilmektedir.



Şekil 4.5. Kesit taşıma gücü anında kirişte oluşan iç kuvvetler ve birim deformasyon dağılımı

Taşıma gücü hesaplarında öncelikle kirişlerin FRP donatı oranına göre denge üstü donatılı olduğu varsayımı yapılmıştır. Yani betonun ezilmesinin FRP donatı kopmasından daha önce gerçekleştiği kabul edilmiştir. Bu kabule göre, taşıma gücüne ulaşıldığı anda betonun en dış basınç lifindeki birim deformasyon değeri $\epsilon_c = \epsilon_{cu}$ olmaktadır. Ardından kirişlerde birim deformasyonlar için uyumluluk denklemleri (Denklem 4.9-4.11) yazılmıştır. Malzemelere ait birim deformasyonlar böylece kiriş faydalı yüksekliği (d) ve kiriş basınç derinliği (c) cinsinden ifade edilmiştir. Kirişlerin gerçek boyutları deneyler öncesinde ölçüldüğü için, faydalı yükseklik (d) değerleri bilinmektedir. Ancak basınç derinliği değeri bilinmemektedir. Bu durumda tüm bilinenler uyumluluk denklemlerinde yerlerine yazıldığında, bilinmeyen malzeme birim deformasyonları ($\epsilon_{st} = \epsilon_{frp}$ ve ϵ_{cs}), basınç derinliği (c) cinsinden ifade edilebilmektedir.

$$\epsilon_{st} = \epsilon_{frp} = \epsilon_c \cdot \frac{d - c}{c} \quad (4.9)$$

$$\epsilon_c = \epsilon_{st} \cdot \frac{c}{d - c} \quad (4.10)$$

$$\epsilon_{cs} = \epsilon_c \cdot \frac{c - d_{cc}}{c} \quad (4.11)$$

Bu denklemlerde yer alan d_{cc} ifadesi, basınç donatısının en dış basınç lifine uzaklığını göstermektedir. Uyumluluk denklemleri yazıldıktan sonra her malzemede oluşacak iç kuvvetler Denklem 4.12-4.15 kullanılarak ayrı ayrı hesaplanmaktadır:

$$T_s = A_{st} \cdot f_s(\epsilon_{st}) \quad (4.12)$$

$$T_f = A_{frp} \cdot f_{frp}(\epsilon_{frp}) \quad (4.13)$$

$$C_s = A_{cs} \cdot f_{cs}(\epsilon_{cs}) \quad (4.14)$$

$$C_c = 0.9 \cdot f_c \cdot b \cdot \beta_1(\epsilon_c) \cdot c \quad (4.15)$$

Bu ifadelerde yer alan T_s , T_f , C_s ve C_c sırasıyla çelik çekme donatısı, FRP çekme donatısı, çelik basınç donatısı ve beton dikdörtgen basınç bloğunda oluşan toplam kuvvetleri göstermektedir. Ayrıca A_{st} , A_{frp} ve A_{cs} ise sırasıyla çelik çekme donatısı, FRP çekme donatısı ve çelik basınç donatısı kesit alanlarını ifade etmektedir.

Eğilme etkisi altında oluşan tüm basınç ve çekme kuvvetleri belirlendikten sonra tek bilinmeyen parametre olan basınç derinliği (c) iç kuvvetlerin eşitliği Denklem 4.16 yazılarak hesaplanabilmektedir.

$$C_c + C_s = T_s + T_f \quad (4.16)$$

Basınç derinliği belirlendikten sonra bu değer uyumluluk denkleminde (Denklem 4.9) yerine yazılarak taşıma gücü anında FRP donatısının birim deformasyon değeri (ϵ_{frp}) elde edilebilmektedir. Hesaplanan FRP donatısı birim deformasyon değeri, FRP donatısı kopma birim deformasyon değerinden küçük ise ($\epsilon_{frp} < \epsilon_{fu}$) kirişin denge üstü donatılı kabulünün doğru olduğu ispatlanmış olup kiriş taşıma gücü hesaplarına geçilebilmektedir. Ancak hesaplanan FRP donatısının birim deformasyon değerinin, FRP donatısı kopma birim deformasyon değerinden büyük ($\epsilon_{frp} > \epsilon_{fu}$) olduğu durumlarda denge üstü donatılı varsayımının yanlış olduğu sonucu ortaya çıkmaktadır. Bu durumda kiriş denge altı donatılı olduğundan bu duruma göre kiriş basınç derinliğinin (c) yeniden hesaplanması gerekmektedir. Denge altı donatılı kirişlerde taşıma gücüne ulaşıldığı anda beton ezilmeden önce FRP donatısı kopmaktadır. Yani taşıma gücü anında betonun en dış basınç lifindeki birim deformasyon değeri ezilme

birim deformasyon değerinden daha küçük bir değere sahip olmakta ($\varepsilon_c < \varepsilon_{cu}$) ve FRP donatısı birim deformasyon değeri kopma birim deformasyonu değerine ($\varepsilon_{frp} = \varepsilon_{fu}$) eşit olmaktadır. Ayrıca bu durumda çelik donatı ile FRP donatısı aynı seviyede bulunduğundan, çelik çekme donatılarının taşıma gücüne karşılık gelen birim deformasyon değeri de ($\varepsilon_{st} = \varepsilon_{frp} = \varepsilon_{fu}$) bilinmektedir. Tüm bilinenler uyumluluk denklemlerinde yerlerine yazıldığında, bilinmeyen malzeme birim deformasyon değerleri, basınç derinliği (c) cinsinden ifade edilebilmektedir. Uyumluluk denklemlerinden elde edilen birim deformasyon değerleri kullanılarak her malzemeye ait iç basınç ve çekme kuvvetleri belirlenmektedir. Denklem 4.16 yani iç kuvvetlerin birbirine eşitliği ilkesi kullanılarak kiriş basınç derinliği yeniden hesaplanmaktadır. Ardından da kiriş taşıma gücü hesaplarına geçilmektedir.

Kirişin kırılma türü, basınç derinliği ve buna göre malzeme iç kuvvetleri belirlendikten sonra, çekme donatısının, beton basınç bloğunun ve basınç donatısının kiriş tarafsız eksenine göre eğilme momenti katkıları belirlenir (Denklem 4.17-4.19). Bu katkıların toplamı da kesit eğilme taşıma gücünü vermektedir (Denklem 4.20).

$$M_T = (T_s + T_f) \cdot (d - c) \quad (4.17)$$

$$M_{cc} = C_c \cdot (c - k_2(\varepsilon_c) \cdot c) \quad (4.18)$$

$$M_{cs} = C_s \cdot (c - d_{cc}) \quad (4.19)$$

$$M_{u,the} = M_T + M_{cc} + M_{cs} \quad (4.20)$$

Bu ifadelerde yer alan M_T , M_{cc} ve M_{cs} sırasıyla çekme donatısının, beton basınç bloğunun ve basınç donatısının moment katkılarını gösterirken $M_{u,the}$ ise kirişin tahmin edilen (teorik) moment kapasitesini göstermektedir. Kirişlerin yükleme ve mesnet koşulları göz önünde bulundurularak, yük kapasitesi Denklem 4.21 kullanılarak hesaplanmaktadır. Bu ifadede yer alan L_{ss} ve $P_{u,the}$ sırasıyla kesme açıklığını ve teorik yük kapasitesini göstermektedir.

$$P_{u,the} = \frac{2 \cdot M_{u,the}}{L_{ss}} \quad (4.21)$$

4.4. Eğilme Taşıma Gücü ve Kırılma Modu Tahminleri

Çalışmada eğilme testleri gerçekleştirilen tüm kirişlerin taşıma güçleri ve kırılma sınır durumları (çekme ve basınç kırılması) bir önceki bölümde anlatılan yöntem ile tahmin edilmiştir. Tahminlerin büyük ölçüde deneysel sonuçlarla uyumlu olduğu ortaya çıkmıştır. Bu sonucun, malzeme mekanik özelliklerinin belirlenmesinde gösterilen hassasiyetten kaynaklandığı düşünülmektedir. Ancak unutulmamalıdır ki, tüm malzemeler homojen ve birebir aynı mekanik özelliklere sahip değildir. Tahminler ile deneysel sonuçlar arasındaki farklılıklar bu sebeplere dayanmaktadır.

Çizelge 4.1’de birinci deney grubunda yer alan salt çelik, salt BFRP, salt GFRP ve hibrit BFRP-çelik ve GFRP-çelik donatılı kirişlere ait, Çizelge 4.2’de ikinci deney grubunda yer alan salt çelik, salt GFRP ve hibrit GFRP-çelik donatılı kirişlere ait, Çizelge 4.3’te ise üçüncü deney grubunda yer alan salt çelik, salt BFRP, salt GFRP ve hibrit BFRP-çelik, GFRP-çelik donatılı kirişlere ait maksimum deneysel ($P_{max,exp}$) ve tahmin edilen ($P_{max,pre}$) eğilme momenti değerleri sunulmaktadır. Ayrıca deneyler sırasında gözlemlenen kırılma modları ile tahmin edilen kırılma modları da bu çizelgelerde sunulmaktadır.

Çalışmada ilk grupta yer alan salt çelik donatılı referans kiriş (S5) çelik donatı oranı bakımından denge altı donatılı olarak tasarlanırken, salt FRP donatılı referans kirişler (B5 ve G5) ile hibrit FRP-çelik donatılı kirişler FRP donatı bakımından denge üstü donatılı olarak tasarlanmıştır. Eğilme deneyleri neticesinde B1S4 ve G1S4 kirişleri dışında bu grupta yer alan tüm kirişlerin kırılma modlarının doğru bir şekilde tahmin edilebildiği görülmüştür. B1S4 ve G1S4 kirişleri, beklenen kırılma modunun aksine beton ezilmesi gerçekleşmeden önce FRP donatısı koparak taşıma gücüne ulaşmıştır. Deneysel ve analitik tahminler arasındaki bu farkın, FRP donatılarda lif doğrultusu ve içeriğinde ortaya çıkabilecek istenmeyen farklılıklar ve malzeme özelliklerindeki değişimlerden kaynaklanmış olduğu çıkarımı yapılmıştır.

Bu grupta yer alan kirişlerin taşıma gücü değerleri deneysel kapasitelerden maksimum %14’lük (B4S1 kirişi) bir farkla tahmin edilirken özellikle S5 Referans elemanı ile

bazı hibrit donatılı kirişlerde taşıma gücü kapasiteleri deneysel sonuçlara çok yakın olacak şekilde tahmin edilemiştir.

Çizelge 4.1. Birinci deney grubunda yer alan kirişlere ait taşıma gücü ve kırılma modu tahminleri

ELEMAN	$P_{max,exp}$ (kN)	$P_{max,pre}$ (kN)	$\frac{P_{max,exp}}{P_{max,pre}}$	Kırılma Modu (Deneysel)	Kırılma Modu (Tahmin)
S5 Referans	125.02	120.87	1.03	Denge altı	Denge altı
B1S4	122.26	116.24	1.05	Denge altı	Denge üstü
B2S3	116.64	112.81	1.03	Denge üstü	Denge üstü
B3S2	116.59	110.20	1.06	Denge üstü	Denge üstü
B4S1	123.56	108.17	1.14	Denge üstü	Denge üstü
B5 Referans	120.75	106.54	1.13	Denge üstü	Denge üstü
G1S4	129.72	121.38	1.07	Denge altı	Denge altı
G2S3	130.90	122.87	1.07	Denge üstü	Denge üstü
G3S2	130.22	123.74	1.05	Denge üstü	Denge üstü
G4S1	128.20	124.41	1.03	Denge üstü	Denge üstü
G5 Referans	141.11	124.90	1.13	Denge üstü	Denge üstü

İkinci grupta yer alan salt çelik donatılı referans kiriş (S6) çelik donatı oranı bakımından denge altı donatılı olarak tasarlanırken, salt FRP donatılı referans kiriş (G6) ile hibrit GFRP-çelik donatılı kirişler FRP donatı bakımından denge üstü donatılı olarak tasarlanmıştır. Eğilme testleri neticesinde tüm kirişlerde beklenen kırılma modlarına ulaşılmış yani kırılma modları doğru bir biçimde tahmin edilebilmiştir.

Bu grupta yer alan kirişlerde, özellikle de G1S5, G2S4 ve G6 kirişlerinde, analitik tahminler ile deneysel yük kapasiteleri arasındaki farklar %2 kadar düşük mertebelere ulaşmıştır. Deneysel ve analitik kapasiteler arasındaki en büyük fark, G4S2 kirişine aittir ve bu fark %9'dur.

Çizelge 4.2. İkinci deney grubunda yer alan kirişlere ait taşıma gücü ve kırılma modu tahminleri

ELEMAN	$P_{max,exp}$ (kN)	$P_{max,pre}$ (kN)	$P_{max,exp}/P_{max,pre}$	Kırılma Modu (Deneysel)	Kırılma Modu (Tahmin)
S6 Referans	146.26	138.69	1.05	Denge altı	Denge altı
G1S5	135.98	138.89	0.98	Denge üstü	Denge üstü
G2S4	141.04	138.72	1.02	Denge üstü	Denge üstü
G3S3	153.57	141.87	1.08	Denge üstü	Denge üstü
G4S2	154.95	141.63	1.09	Denge üstü	Denge üstü
G5S1	149.80	143.93	1.04	Denge üstü	Denge üstü
G6 Referans	147.56	144.81	1.02	Denge üstü	Denge üstü

Son grupta yer alan salt çelik donatılı referans kiriş (S3) çelik donatı oranı bakımından denge altı donatılı olarak tasarlanırken, bu grupta yer alan diğer tüm kirişler FRP donatı oranı bakımından denge altı donatılı olarak tasarlanmıştır. B1S2, B2S1 ve B3 kirişleri tasarım aşamasında denge altı donatılı olacak şekilde tasarlansa da, üretici tarafından gönderilen donatıların mekanik özellikleri malzeme deneyleri yardımıyla belirlendikten sonra yapılan hesaplar, bu kirişlerin denge kırılmasına uğrayacaklarını göstermiştir. Eğilme testleri neticesinde B1S2 ve G3 kirişleri dışında tüm kirişlerde tasarlanan kırılma modları gözlemlenmiştir. B1S2 ve G3 kirişlerinde tasarlanan kırılma modunun aksine FRP donatıları kopmamış yani bu kirişler taşıma güçlerine betonun ezilmesi neticesinde ulaşmışlardır.

Bu grupta yer alan kirişlerde taşıma gücü kapasiteleri G3 ve G2S1 kirişleri dışında iyi bir şekilde tahmin edilebilmiştir. Özellikle B2S1 kirişi için yapılan tahmin deneysel değerden yaklaşık %2’lik bir fark göstermektedir. G3 ve G2S1 kirişlerinin deneysel ve tahmini yük kapasiteleri arasında ise sırasıyla %23’lük ve %18’lik bir fark gözlenmektedir. Bunun temel sebebi, bu grupta kullanılan GFRP donatılarının ilk grupta kullanılan GFRP donatılar ile aynı mekanik özelliklere sahip olduğu düşünülerek kirişlerin tasarlanmış olmasıdır. Ancak yeni GFRP donatılarla yapılan çekme testleri, bu donatıların mekanik özelliklerinin birinci grupta kullanılan GFRP donatılardan farklı olduğunu göstermiştir. Bu farklılık dikkate alınarak, yeni GFRP donatı mekanik özelliklerine göre belirlenen kırılma modu ve taşıma gücü kapasiteleri

Çizelge 4.3'te sunulmuştur. Ayrıca B5 (B3) kirişi için tahminler çekme bölgesinde mekanik özellikleri bilinen 3 BFRP donatısı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

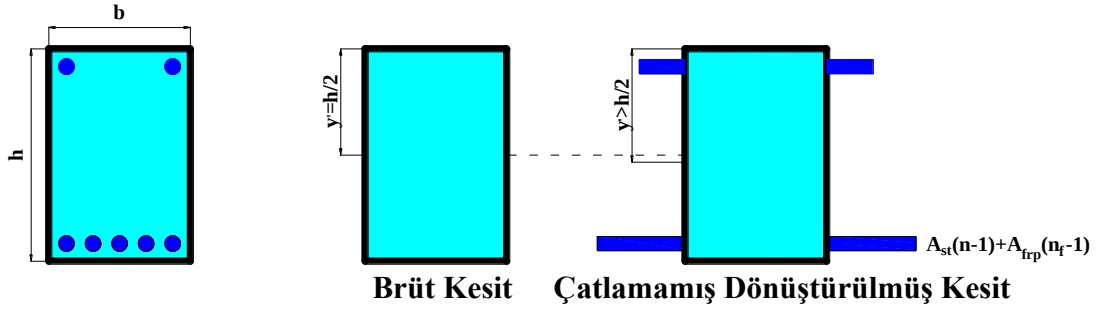
Çizelge 4.3. Üçüncü deney grubunda yer alan kirişlere ait taşıma gücü ve kırılma modu tahminleri

ELEMAN	$P_{max,exp}$ (kN)	$P_{max,pre}$ (kN)	$P_{max,exp}/P_{max,pre}$	Kırılma Modu (Deneyisel)	Kırılma Modu (Tahmin)
S3 Referans	84.16	77.05	1.09	Denge altı	Denge altı
B1S2	83.82	79.72	1.05	Denge üstü	Dengeli
B2S1	79.14	77.96	1.02	Denge altı	Dengeli
B5 (B3) Referans	63.73	78.52	0.81	Denge altı	Dengeli
G1S2	85.32	80.74	1.06	Denge altı	Denge altı
G2S1	101.25	85.65	1.18	Denge altı	Denge altı
G3 Referans	114.96	93.83	1.23	Denge üstü	Denge altı

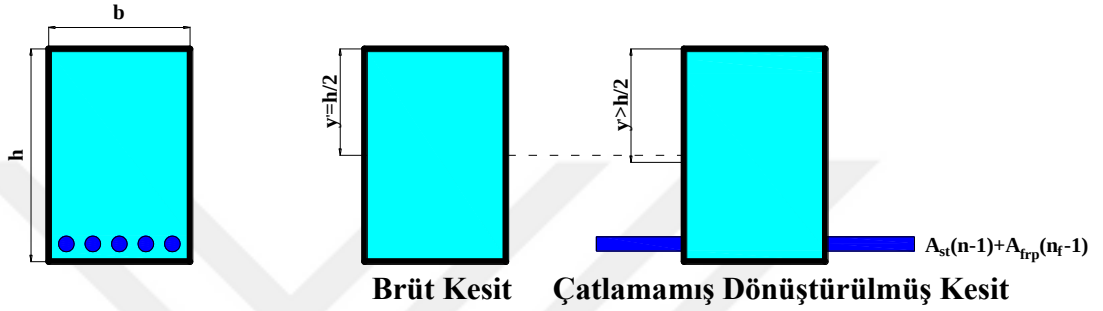
Eğilme testleri neticesinde ilk grupta yer alan B1S4 ve G1S4 kirişleri ile son grupta yer alan B1S2 ve G3 Referans kirişleri beklenenin aksine farklı kırılma modu ile taşıma gücüne ulaşmıştır. Gerçekleştirilen malzeme testlerinde de gözlemlendiği üzere, bu durumun FRP donatı çubuklarının kendi aralarında mekanik özellikleri arasındaki büyük farklılıklardan kaynaklandığı düşünülmektedir.

4.5. İlk Çatlama Yükleri Tahmini

Eğilme tesiri altında kirişlerde ilk çatlama anında kiriş kesitinin sahip olduğu atalet momenti ile ilgili iki farklı yaklaşım olduğu bilinmektedir. Bu yaklaşımlardan ilki donatı katkısının ihmal edildiği brüt kesit atalet momenti ifadesinin (I_g), ikincisi ise boyuna donatının katkısını dikkate alan çatlamamış dönüştürülmüş kesit atalet momenti ifadesinin (I_{ucr}) kullanılmasını öngörmektedir. Şekil 4.6'da basınç donatılı ve Şekil 4.7'de basınç donatısız kirişlere ait brüt ve çatlamamış dönüştürülmüş kesitlere ait çizimlere yer verilmektedir.



Şekil 4.6. Basınç donatılı bir kesite ait brüt ve çatlamamış dönüştürülmüş kesitler



Şekil 4.7. Basınç donatısız bir kesite ait brüt ve çatlamamış dönüştürülmüş kesitler

Kirişlerin ilk çatlama yükü tahmin edilirken Denklem 4.22 kullanılarak brüt kesit atalet moment değerleri hesaplanmıştır. Basınç donatılı kirişlerin (birinci grup kirişlerin) dönüştürülmüş kesit atalet momenti Denklem 4.23, dönüştürülmüş kesitin ağırlık merkezinin basınç dış yüzüne uzaklığı (y') Denklem 4.24 kullanılarak elde edilmiştir. Benzer şekilde basınç donatısız kirişler (ikinci ve üçüncü grup kirişlerin) için dönüştürülmüş kesit atalet momenti Denklem 4.25, dönüştürülmüş kesitin ağırlık merkezinin basınç dış yüzüne uzaklığı Denklem 4.26 kullanılarak elde edilmiştir:

$$I_g = \frac{bh^3}{12} \quad (4.22)$$

$$I_{ucr} = \frac{bh^3}{12} + bh \left(y' - \frac{h}{2} \right)^2 + (n_f - 1)A_{frp} (d - y')^2 + (n - 1)A_{st} (d - y')^2 + (n - 1)A_{cs} (d_{cc} - y')^2 \quad (4.23)$$

$$y' = \frac{\frac{bh^2}{2} + (n_f - 1)A_{frp} d + (n - 1)A_{st} d + (n - 1)A_{cs} d_{cc}}{bh + (n_f - 1)A_{frp} + (n - 1)(A_{cs} + A_{st})} \quad (4.24)$$

$$I_{ucr} = \frac{bh^3}{12} + bh \left(y' - \frac{h}{2} \right)^2 + (n_f - 1)A_{frp} (d - y')^2 + (n - 1)A_{st} (d - y')^2 \quad (4.25)$$

$$y' = \frac{\frac{bh^2}{2} + (n_f - 1)A_{frp} d + (n - 1)A_{st} d}{bh + (n_f - 1)A_{frp} + (n - 1)A_{st}} \quad (4.26)$$

Bu ifadelerde yer alan b ve h kiriş kesitinin genişliği ve yüksekliğini göstermektedir. Ayrıca n ve n_f çelik ve FRP donatılarının betona dönüşümü için kullanılan modüler oranlardır ve sırasıyla $n=E_s/E_c$, $n_f=E_f/E_c$ ifadeleri ile hesaplanmaktadır.

Ayrıca, çatlama yükü hesaplarında kullanılmak üzere üç farklı eğilmede çekme dayanımı tanımı kullanılmıştır. Bu tanımların herbiri ve bu tanımlar ile iki farklı çatlamamış kesit atalet momenti ifadesine göre hesaplanan çatlama yükü değerleri ilerleyen bölümlerde detaylı olarak anlatılmıştır.

4.5.1. Betonun Prizmatik Numune Eğilmede Çekme Dayanımına Göre Hesaplanan İlk Çatlama Yükü Değerleri

Çalışmada deney elemanlarının planlanması esnasında ilk çatlama yüklerinin hesaplanmasında kullanılacak olan eğilmede çekme dayanımlarının (f_{ctf}) belirlenebilmesi için kare prizma numunelerin hazırlanması kararlaştırılmıştır. Bu amaçla, her beton dökümünde beton karışımından alınan altışar adet kare prizma numunenin iki nokta eğilme testleri ilgili ASTM standardına [33] göre gerçekleştirilmiştir. Betonun eğilmede çekme dayanımı birinci grup kirişlerde 3.55 MPa, ikinci ve üçüncü grup kirişlerde ise 3.25 MPa olarak belirlenmiştir. Bu bölümde yapılan çatlama yükü ve momenti hesaplarında betonun deneysel eğilmede çekme dayanımı ile iki farklı çatlamamış kesit atalet momenti tanımı kullanılmıştır. Bu doğrultuda ilk çatlama moment ve yükleri Denklem 4.27-4.30 kullanılarak tahmin edilmiştir:

$$M_{cr1} = \frac{I_{ucr} f_{ctf}}{y_t} \quad (4.27)$$

$$P_{cr1} = \frac{2M_{cr1}}{L_{ss}} \quad (4.28)$$

$$M_{cr2} = \frac{I_g f_{ctf}}{y_t} \quad (4.29)$$

$$P_{cr2} = \frac{2M_{cr2}}{L_{ss}} \quad (4.30)$$

Bu ifadelerde yer alan M_{cr1} ve P_{cr1} sırasıyla çatlama moment ve yükü gösterirken M_{cr2} ve P_{cr2} ise sırasıyla brüt kesit atalet moment ve yükü göstermektedir. Ayrıca y_t betonun dış çekme yüzünden tarafsız eksene olan uzaklıktır. Dönüştürülmüş kesit için $y_t = h - y'$ ifadesi kullanılırken brüt kesit için ise $y_t = h/2$ ifadesi kullanılmıştır.

4.5.2. Betonun Eurocode 2 [34] Formülünden Elde Edilen Eğilmede Çekme Dayanımına Göre Hesaplanan İlk Çatlama Yükü Değerleri

Bu bölümde ilk çatlama yükleri hesaplanırken betonun eğilmede çekme dayanımı için Eurocode 2 [34] tarafından önerilen denklemler kullanılmıştır. Eurocode 2'ye [34] göre betonun eğilmede çekme dayanımı için Denklem 4.31, ortalama eksenel çekme dayanımı için ise Denklem 4.32 kullanılmaktadır:

$$f_{ctm,fl} = \max\{(1.6 - h/1000)f_{ctm} ; f_{ctm}\} \quad (4.31)$$

$$f_{ctm} = 0.30 \times f_{ck}^{2/3} \leq C50/60 \quad (4.32)$$

Bu ifadelerde yer alan f_{ck} ve f_{ctm} sırasıyla betonun karakteristik basınç dayanımını ve ortalama eksenel çekme dayanımını, $f_{ctm,fl}$ ise Eurocode 2'de [34] önerilen betonun eğilmede çekme dayanımını göstermektedir. Bu denklemler aracılığı ile birinci grup kirişlerde kullanılan 31.28 MPa silindir basınç dayanımına sahip olan betonun 3.87 MPa eğilmede çekme dayanımına, ikinci ve üçüncü grup kirişlerde kullanılan 30.49

MPa silindir basınç dayanımına sahip olan betonun ise 3.81 MPa eğilmede çekme dayanımına sahip olduğu belirlenmiştir.

Eurocode 2 [34] tanımına göre ilk çatlama yükü ve momenti benzer şekilde çatlamamış dönüştürülmüş ve brüt kesit atalet momenti ifadeleri için ayrı ayrı hesaplanmıştır. Denklem 4.33-4.36 kullanılarak bu tahminler yapılmıştır.

$$M_{cr1,EC2} = \frac{I_{ucr} f_{ctm,fl}}{y_t} \quad (4.33)$$

$$P_{cr1,EC2} = \frac{2M_{cr1,EC2}}{L_{ss}} \quad (4.34)$$

$$M_{cr2,EC2} = \frac{I_g f_{ctm,fl}}{y_t} \quad (4.35)$$

$$P_{cr2,EC2} = \frac{2M_{cr2,EC2}}{L_{ss}} \quad (4.36)$$

Bu denklemlerde yer alan $M_{cr1,EC2}$ ve $P_{cr1,EC2}$ Eurocode 2’de [34] yer alan eğilmede çekme dayanımı ifadesi ile çatlamamış dönüştürülmüş kesit atalet momenti kullanılarak elde edilen kiriş ilk çatlama momenti ve yükünü gösterirken, $M_{cr2,EC2}$ ve $P_{cr2,EC2}$ ise Eurocode 2’de [34] yer alan eğilmede çekme dayanımı ifadesi ile brüt kesit atalet momenti kullanılarak elde edilen kiriş ilk çatlama momenti ve yükünü göstermektedir.

4.5.3. Betonun ACI 318M-11 [35] Formülünden Elde Edilen Eğilmede Çekme Dayanımına Göre Hesaplanan İlk Çatlama Yükü Değerleri

Bu bölümde ilk çatlama yük ve moment değerleri hesaplanırken ACI 318M-11 [35] tarafından önerilen eğilmede çekme dayanımı ifadesi kullanılmıştır. ACI 318M-11 [35] kirişlerin eğilmede çekme dayanımlarının belirlenmesini için Denklem 4.37’de yer alan ifadeyi önermektedir.

$$f_r = 0.623\sqrt{f_c} \quad (4.37)$$

Bu ifadede yer alan f_r ve f_c , betonun eğilmede çekme ve silindir basınç dayanımını göstermektedir. Buna göre, birinci grup kirişlerde 31.28 MPa silindir basınç dayanımına sahip olan betonun eğilmede çekme dayanımının 3.48 MPa, 30.49 MPa silindir basınç dayanımına sahip olan ikinci ve üçüncü grup kirişlerde betonun eğilmede çekme dayanımının 3.44 MPa olduğu belirlenmiştir.

Önceki tahminlere benzer olarak ACI 318M-11 [35] tanımına göre ilk çatlama moment ve yük tahminleri için kesitin brüt atalet momentine ve çatlamamış dönüştürülmüş kesit atalet momentine sahip olduğu varsayımları göz önünde bulundurularak tahminler yapılmıştır. Bu amaçla Denklem 4.38-4.41 kullanılmıştır.

$$M_{cr1,ACI} = \frac{I_{ucr} f_r}{y_t} \quad (4.38)$$

$$P_{cr1,ACI} = \frac{2M_{cr1,ACI}}{L_{ss}} \quad (4.39)$$

$$M_{cr2,ACI} = \frac{I_g f_r}{y_t} \quad (4.40)$$

$$P_{cr2,ACI} = \frac{2M_{cr2,ACI}}{L_{ss}} \quad (4.41)$$

Bu denklemlerde yer alan $M_{cr1,ACI}$ ve $P_{cr1,ACI}$ ACI 318M-11 [35] eğilmede çekme dayanımı formülü ile çatlamamış dönüştürülmüş kesit atalet momenti kullanılarak tahmin edilen kiriş ilk çatlama momenti ve yükünü gösterirken, $M_{cr2,ACI}$ ve $P_{cr2,ACI}$ ise ACI 318M-11 [35] eğilmede çekme dayanımı formülü ile brüt kesit atalet momenti kullanılarak tahmin edilen kiriş ilk çatlama momenti ve yükünü göstermektedir.

4.5.4. Farklı Yöntemler Kullanılarak Hesaplanan Kirişlerin İlk Çatlama Yüğü Tahminlerinin Değerlendirilmesi

Bölüm 4.5.1, 4.5.2 ve 4.5.3'te prizmatik beton numune ve farklı iki yönetmelik [34,35] kullanılarak betonun eğilmede çekme dayanımları ve buna göre ilk çatlama yükünün hangi denklemler kullanılarak hesaplandığı anlatılmıştır. Bu bölümde ise deneysel ve hesaplanan veriler kıyaslanarak değerlendirmeler yapılmıştır. Değerlendirmeler yapılırken kirişler dört gruba ayrılmıştır. Bu bölümler, sırasıyla salt çelik donatılı, salt FRP donatılı, denge üstü hibrit ve denge altı hibrit FRP-çelik donatılı kiriş gruplarıdır.

Çizelge 4.4'te salt çelik donatılı, Çizelge 4.5'te salt FRP donatılı, Çizelge 4.6'da denge üstü hibrit FRP-çelik donatılı ve Çizelge 4.7'de denge altı hibrit FRP-çelik donatılı kirişlere ait ilk çatlama yükü tahminleri ve bu tahminlerin deneysel çatlama yüklerine ($P_{cr,exp}$) oranlarına yer verilmiştir. Ayrıca, bu oranların ortalamaları ve değişim katsayıları da sunulmuştur.

Çizelge 4.4. Salt çelik donatılı kirişlere ait ilk çatlama yükleri

Kiriş	$P_{cr,exp}$ (kN)	P_{cr1} (kN)	P_{cr2} (kN)	$P_{cr,exp}/P_{cr1}$	$P_{cr,exp}/P_{cr2}$	$P_{cr1,EC2}$ (kN)	$P_{cr2,EC2}$ (kN)	$P_{cr,exp}/P_{cr1,EC2}$	$P_{cr,exp}/P_{cr2,EC2}$	$P_{cr1,ACI}$ (kN)	$P_{cr2,ACI}$ (kN)	$P_{cr,exp}/P_{cr1,ACI}$	$P_{cr,exp}/P_{cr2,ACI}$
S5 Referans	25.70	22.29	18.52	1.15	1.39	24.30	20.19	1.06	1.27	21.85	18.16	1.18	1.42
S6 Referans	27.74	21.05	17.30	1.32	1.60	24.68	20.28	1.12	1.37	22.28	18.31	1.24	1.52
S3 Referans	23.13	19.45	17.55	1.19	1.32	22.8	20.57	1.01	1.12	20.59	18.57	1.12	1.25
Standart													
Sapma				0.09	0.15			0.06	0.13			0.06	0.14
Ortalama				1.22	1.44			1.06	1.25			1.18	1.40
Değişim													
Katsayısı (%)				7.29	10.14			5.19	10.05			5.09	9.76

Çizelge 4.5. Salt FRP donatılı kirişlere ait ilk çatlama yükleri

Kiriş	$P_{cr,exp}$ (kN)	P_{cr1} (kN)	P_{cr2} (kN)	$P_{cr,exp}/P_{cr1}$	$P_{cr,exp}/P_{cr2}$	$P_{cr1,EC2}$ (kN)	$P_{cr2,EC2}$ (kN)	$P_{cr,exp}/P_{cr1,EC2}$	$P_{cr,exp}/P_{cr2,EC2}$	$P_{cr1,ACI}$ (kN)	$P_{cr2,ACI}$ (kN)	$P_{cr,exp}/P_{cr1,ACI}$	$P_{cr,exp}/P_{cr2,ACI}$
B5 Referans	14.53	19.08	18.52	0.76	0.78	20.80	20.19	0.70	0.72	18.71	18.16	0.78	0.80
G5 Referans	11.08	19.11	18.52	0.58	0.60	20.83	20.19	0.53	0.55	18.73	18.16	0.59	0.61
G6 Referans	12.45	18.2	17.74	0.68	0.70	21.34	20.80	0.58	0.60	19.27	18.78	0.65	0.66
G3 Referans	15.93	18.06	17.83	0.88	0.89	21.18	20.90	0.75	0.76	19.12	18.87	0.83	0.84
Standart													
Sapma				0.13	0.12			0.10	0.10			0.11	0.11
Ortalama				0.73	0.74			0.64	0.66			0.71	0.73
Değişim													
Katsayısı (%)				17.50	16.55			15.99	15.02			15.65	15.12

Çizelge 4.6. Denge üstü hibrit FRP-çelik donatılı kirişlere ait ilk çatlama yükleri

Kiriş	$P_{cr,exp}$ (kN)	P_{cr1} (kN)	P_{cr2} (kN)	$P_{cr,exp}/P_{cr1}$	$P_{cr,exp}/P_{cr2}$	$P_{cr1,EC2}$ (kN)	$P_{cr2,EC2}$ (kN)	$P_{cr,exp}/P_{cr1,EC2}$	$P_{cr,exp}/P_{cr2,EC2}$	$P_{cr1,ACI}$ (kN)	$P_{cr2,ACI}$ (kN)	$P_{cr,exp}/P_{cr1,ACI}$	$P_{cr,exp}/P_{cr2,ACI}$
B2S3	23.00	21.02	18.52	1.09	1.24	22.91	20.19	1.00	1.14	20.60	18.16	1.12	1.27
B3S2	20.09	20.37	18.52	0.99	1.08	22.21	20.19	0.90	1.00	19.97	18.16	1.01	1.11
B4S1	18.02	19.73	18.52	0.91	0.97	21.51	20.19	0.84	0.89	19.34	18.16	0.93	0.99
G2S3	20.00	21.03	18.52	0.95	1.08	22.92	20.19	0.87	0.99	20.61	18.16	0.97	1.10
G3S2	17.62	20.39	18.52	0.86	0.95	22.23	20.19	0.79	0.87	19.99	18.16	0.88	0.97
G4S1	18.32	19.75	18.52	0.93	0.99	21.53	20.19	0.85	0.91	19.36	18.16	0.95	1.01
G1S5	23.09	20.41	17.22	1.13	1.34	23.93	20.19	0.97	1.14	21.60	18.23	1.07	1.27
G2S4	22.01	19.69	17.05	1.12	1.29	23.08	19.99	0.95	1.10	20.84	18.05	1.06	1.22
G3S3	18.85	19.62	17.50	0.96	1.08	23.00	20.51	0.82	0.92	20.77	18.52	0.91	1.02
G4S2	19.14	18.91	17.34	1.01	1.10	22.17	20.33	0.86	0.94	20.02	18.35	0.96	1.04
G5S1	14.17	18.70	17.68	0.76	0.80	21.92	20.72	0.65	0.68	19.79	18.71	0.72	0.76
B1S2	20.55	19.16	17.84	1.07	1.15	22.46	20.91	0.91	0.98	20.28	18.88	1.01	1.09
Standart Sapma				0.11	0.15			0.09	0.13			0.10	0.14
Ortalama Değişim Katsayısı (%)				0.98	1.09			0.87	0.96			0.97	1.07
				11.28	14.04			10.68	13.39			10.81	13.35

Çizelge 4.7. Denge altı hibrit FRP-çelik donatılı kirişlere ait ilk çatlama yükleri

Kiriş	$P_{cr,exp}$ (kN)	P_{cr1} (kN)	P_{cr2} (kN)	$P_{cr,exp}/P_{cr1}$	$P_{cr,exp}/P_{cr2}$	$P_{cr1,EC2}$ (kN)	$P_{cr2,EC2}$ (kN)	$P_{cr,exp}/P_{cr1,EC2}$	$P_{cr,exp}/P_{cr2,EC2}$	$P_{cr1,ACI}$ (kN)	$P_{cr2,ACI}$ (kN)	$P_{cr,exp}/P_{cr1,ACI}$	$P_{cr,exp}/P_{cr2,ACI}$
B1S4	24.39	21.66	18.52	1.13	1.32	23.61	20.19	1.03	1.21	21.23	18.16	1.15	1.34
G1S4	22.89	21.66	18.52	1.06	1.24	23.61	20.19	0.97	1.13	21.23	18.16	1.08	1.26
B2S1	18.84	17.76	17.07	1.06	1.10	20.82	20.01	0.90	0.94	18.80	18.06	1.00	1.04
G1S2	19.83	18.72	17.37	1.06	1.14	21.94	20.37	0.90	0.97	19.81	18.39	1.00	1.08
G2S1	17.32	18.07	17.29	0.96	1.00	21.18	20.27	0.82	0.85	19.12	18.30	0.91	0.95
Standart													
Sapma				0.06	0.12			0.08	0.15			0.09	0.16
Ortalama				1.05	1.16			0.92	1.02			1.03	1.13
Değişim													
Katsayısı				5.76	10.70			8.61	14.38			8.85	14.21
(%)													

Salt çelik donatılı kirişlerde deneysel çatlama yükleri analitik değerleri önemli ölçüde aşmaktadır (Çizelge 4.4). Atalet momenti ifadelerinden çatlamamış dönüştürülmüş kesit atalet momenti kullanılarak gerçekleştirilen tahminler, deneysel değerlere daha yakındır. Deneysel değerlere en yakın tahminler ise 1.063 ortalama ve yaklaşık %5'lik değişim katsayısı ile çatlamamış dönüştürülmüş kesit atalet momenti ve Eurocode 2 [34] eğilmede çekme dayanımı kullanılarak elde edilmiştir. Brüt kesit atalet momenti kullanılarak gerçekleştirilen tahminler, elastisite modülü yüksek olan çelik donatıların katkısını ihmal ettiği için deneysel verilerden önemli ölçüde farklılık göstermektedir. Salt çelik donatılı kirişlerin çatlama yükü tahminlerinde brüt ve çatlamamış dönüştürülmüş kesit atalet momenti ile yapılan tahminler arasındaki farkın diğer tüm gruplardan fazla olması, salt çelik donatılı kirişlerde donatının ilk çatlama yüküne katkısını göstermektedir.

Salt FRP donatılı kirişlerin tümünde ise tahmin değerleri deneysel değerlerden yüksektir (Çizelge 4.5). Yani hiçbir atalet momenti ve eğilmede çekme dayanımı formülü ile salt FRP donatılı kirişlerin ilk çatlama yükleri deneysel verilere yakın bir şekilde tahmin edilememiştir. Analitik değerler kıyaslandığında, prizmatik numune eğilmede çekme dayanımı ve brüt kesit atalet momenti ifadeleri aracılığı ile gerçekleştirilen tahminler deneysel verilere en yakın sonuçları (0.743 ortalama ve yaklaşık %16 değişim katsayısı) teşkil etmektedir. Yönetmelik formülleri arasında ise ACI 318M-11 [35] eğilmede çekme dayanımı ve brüt kesit atalet momenti ile gerçekleştirilen tahminler, Eurocode 2 [34] eğilmede çekme dayanımı ve brüt kesit atalet momenti ile gerçekleştirilen tahminlere göre deneysel verilere daha yakındır. FRP donatıların elastisite modülünün düşüklüğü sebebiyle brüt kesit ve çatlamamış dönüştürülmüş kesit kullanılarak yapılan tahminler arasında çok az bir fark bulunmaktadır.

Denge üstü hibrit donatılı kirişlerde (Çizelge 4.6) deneysel verilere en yakın sonuçlar çatlamamış dönüştürülmüş kesit atalet momenti ve prizmatik numune eğilmede çekme dayanımı kullanılarak elde edilmiştir (0.982 ortalama ve yaklaşık %11 değişim katsayısı). Yönetmelikler arasında ise ACI 318M-11 [35] eğilmede çekme dayanımı ve çatlamamış dönüştürülmüş kesit atalet momenti ifadeleri kullanılarak deneysel

verilere en yakın değerler elde edilmiştir (0.966 ortalama ve yaklaşık %11 değişim katsayısı).

Denge altı hibrit donatılı kirişlerde (Çizelge 4.7) ise deneysel verilere en yakın sonuçlar ACI 318M-11 [35] eğilmede çekme dayanımı ve çatlamamış dönüştürölmüş kesit atalet momenti ifadeleri kullanılarak elde edilmiştir (1.028 ortalama ve yaklaşık %9 değişim katsayısı). Denge altı donatılı kirişlerde tahminler genellikle deneysel verilerden daha düşük yani daha güvenli tarafta kalırken denge üşü hibrit donatılı kirişlerde ise tahminler deneysel verilerden daha büyük yani güvenli olmayan tarafta kalmaktadır.



5. YÜK DEPLASMAN DAVRANIŞI

Çalışmada tüm kirişler için yükleme ve mesnetlenme koşullarının aynı olduğu daha önceki kısımlarda belirtilmişti. Buna göre, iki noktalı yükleme ve basit mesnetli olarak gerçekleştirilen eğilme testleri için Denklem 5.1 kullanılarak açıklık ortası deformasyonları hesaplanmıştır. Bu ifade, hem elastik eğri yöntemi hem de moment-alan yöntemi kullanılarak elde edilmiştir.

$$\delta = \frac{P \cdot L_{ss}}{48 \cdot EI} (3L^2 - 4L_{ss}^2) \quad (5.1)$$

Bu denklemde tüm deney kirişlerinde sabit olan kesme açıklığı ve kiriş net açıklığı sırasıyla $L_{ss}=1150$ mm, $L=2800$ mm'dir.

Tezin bu bölümü, farklı yük değerleri altında ortaya çıkan deplasmanların hesabında kullanılan eğilme rijitliğinin (EI) bileşenleri olan atalet momenti (I) ile elastisite modülünün (E) araştırılması üzerinedir. Bu bağlamda, hibrit FRP-çelik donatılı ve salt FRP donatılı kirişlerin deplasman hesabında kullanılması gereken atalet momenti ve elastisite modülü ifadeleri incelenmiş ve yük-deplasman eğrileri tahmini için yeni yöntemler sunulmuştur. Farklı yöntemler yardımıyla yük-deplasman eğrileri oluşturulmuş ve bu analitik eğriler deneysel eğrilerle karşılaştırılarak en uygun yöntem ve parametreler belirtilmiştir.

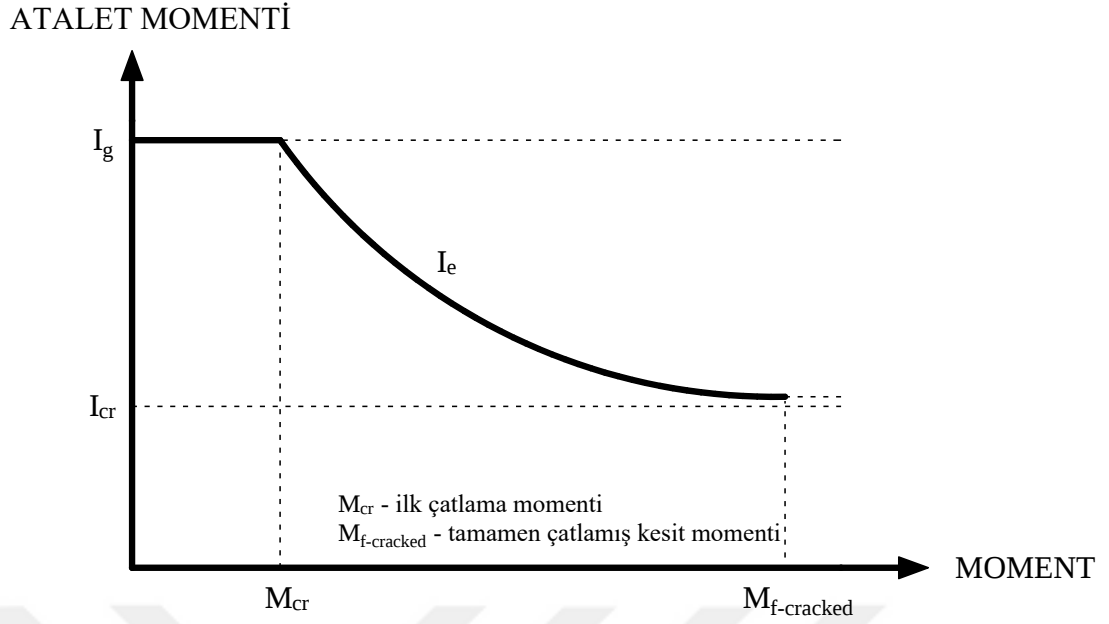
5.1. Atalet Momenti İfadesi

Betonarme kirişlerde çatlama sonrası deformasyonlardaki artışın ya da rijitlikteki azalışın temel sebebi çatlayan elemanın atalet momenti değişimidir. Yani betonarme kirişlerde ilk çatlama sonrası yük arttıkça atalet momenti azalmaktadır. Bu bölümde atalet momentinin hangi denklemlerle ifade edileceği ve artan yüklerle birlikte nasıl değişeceği konusu işlenmiştir.

Eğilmeye maruz kalan betonarme kirişlerde ilk çatlama meydana geldikten sonra yük seviyesi arttıkça kiriş boyunca birbirinden farklı ve ayırık olacak şekilde birçok çatlak meydana gelmektedir. Kiriş çekme yüzünde oluşan bu çatlaklar yük seviyesi arttıkça basınç bölgesine doğru ilerlemektedir. Çatlaklar, tarafsız eksene kadar ulaşmakta ve bu durumdaki kesit tamamen çatlamış olarak kabul edilmektedir. Kesitin tamamen çatladığı ana ait basınç derinliği c_{cr} ile ifade edilmekte ve alanların birinci momentlerinin eşitliği ilkesi (statik moment eşitliği ilkesi) kullanılarak hesaplanmaktadır. Ayrıca kesitin tamamen çatladığı anda sahip olduğu atalet momenti ise I_{cr} ile gösterilmektedir.

Çatlakların kiriş boyunca belli aralıklarla oluştuğu bilinmektedir. Bu durumda kiriş boyunca çatlaklar arasında kalan bölgeler çatlamamış durumdadır. Kiriş bu bölgelerde, beton ile donatı arasındaki aderans etkisiyle çekme gerilmelerine karşı direnç göstermektedir. Bu direnç, çekme rijitleşmesi (“tension-stiffening”) olarak adlandırılmaktadır. Yani çatlaklar arasında kalan çatlamamış bölgenin kiriş atalet momentine katkısı bulunmaktadır. Yük artmaya devam ettikçe kiriş boyunca çatlak sayısı artmakta, çatlaklar basınç bölgesine doğru ilerlemekte ve kirişteki çekme rijitleşmesi azalmaktadır. Bu sebeple yük seviyesi arttıkça atalet momenti de kademeli olarak azalmaktadır. Atalet momentinde meydana gelen bu kademeli düşüş, etkili atalet momenti terimi yardımı ile ifade edilmektedir. Branson [36] tarafından önerilmiş ve çekme rijitleşmesini göz önünde bulunduran ifade, Denklem 5.2’de verilmiştir. Yani bu ifadeye göre betonarme kirişlerde ilk çatlama sonrasında yüklerin artmasıyla kesit atalet momenti çatlamamış kesit atalet momentinden (I_g) tamamen çatlamış kesit atalet momentine (I_{cr}) doğru kademeli olarak azalmaktadır. Bu durum Şekil 5.1’de gösterilmektedir.

$$I_e = \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right)^m I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right)^m \right] I_{cr} \leq I_g \quad (5.2)$$



Şekil 5.1. Kesit atalet momentinin ilk çatlama anından tamamen çatlamış olduğu ana kadar kademeli değişimi gösteren etkili atalet momenti

Branson'un bu ifadesinde I_g brüt kesit atalet momentini, I_e etkili atalet momentini, M_a uygulanan momenti ve M_{cr} ise ilk çatlama momentini göstermektedir. ACI 318M-11 [35], TS500 [37] ve bazı yönetmelikler geleneksel çelik donatılı betonarme kirişler için Branson'un etkili atalet momenti ifadesinde $m = 3$ alınmasını önermektedirler. Bu öneri ile çelik donatılı betonarme kirişlerin deformasyon tahminleri çok iyi bir şekilde yapılabilmektedir. Ancak bu ifade ile salt FRP donatılı kirişlerin deformasyonları tahmin edilememektedir. Çünkü Branson ifadesi FRP donatılı kirişler için beton çekme rijitleşmesini olması gerekenden fazla tahmin etmektedir. Bu da deformasyonların olması gerekenden oldukça az olacak şekilde hesaplanmasına neden olmaktadır. Bischoff [15] bu durumun FRP donatılı kirişlerde çatlamamış atalet momentinin tamamen çatlamış atalet momentine oranının (I_g / I_{cr}) salt çelik donatılı kirişlere göre daha yüksek olmasından kaynaklandığı belirtmiştir. Ayrıca düşük donatı oranına sahip salt çelik donatılı kirişlerde de I_g / I_{cr} oranının artması neticesinde benzer bir durumun ortaya çıktığını belirtmiştir. Bunları göz önüne alarak Bischoff [15] gerçekleştirdiği çalışma ile hem çelik donatılı hem de FRP donatılı kirişler için kullanılabilen yeni bir etkili atalet momenti ifadesi önermiştir. Bu yeni ifadede çekme rijitleşmesi, I_g / I_{cr} ve donatı oranlarından bağımsız hale getirilmiştir (Denklem 5.3).

$$\frac{1}{I_e} = \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right)^2 \cdot \frac{1}{I_g} + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right)^2 \right] \cdot \frac{1}{I_{cr}} \quad (5.3)$$

Literatürde yer alan farklı çalışmalara göre [9-14-22-23], Bischoff [15] etkili atalet momenti ifadesi ile hibrit FRP-çelik donatılı kirişlerin deformasyonlarının iyi bir biçimde tahmin edilebilmektedir. Bu sebeple çalışmamızda etkili atalet momenti olarak Bischoff'un önermiş olduğu ifade kullanılmıştır. Bölüm 5.1.1-5.1.2'de yük deformasyon tahminleri yapılırken kullanılmış olan atalet momenti ifadeleri ile ilgili detaylara yer verilmiştir.

5.1.1. Çatlamamış Kesit Atalet Momenti

Kirişlerde ilk çatlama yükünün belirlenmesinde iki farklı atalet momenti ifadesi kullanılmaktadır. Bunlardan ilki, donatı katkısının ihmal edildiği brüt kesit atalet momenti (I_g) iken diğeri donatı katkısını göz önünde bulunduran çatlamamış dönüştürülmüş kesit atalet momenti (I_{ucr}) ifadesidir. Kirişlerde ilk çatlama meydana gelene kadar deformasyon tahminleri yapılırken atalet momenti olarak bu iki farklı ifade kullanılmıştır. Bu iki çatlamamış kesit atalet momenti ifadesi, 4. Bölümde detaylı olarak anlatılmıştır.

5.1.2. İlk Çatlama Sonrası

İlk çatlama meydana geldikten sonra kesit atalet momenti değişimi Bischoff'un önerdiği etkili atalet momenti ifadesi kullanılarak modellenmiştir. Bischoff ifadesinde atalet momenti, çatlamamış kesit atalet momentinden tamamen çatlamış kesit atalet momentine doğru kademeli azalış göstermektedir. Kesitin tamamen çatlamış olduğu andaki basınç derinliği (c_{cr}) ve o anda kesitin sahip olduğu atalet momenti (I_{cr}), basınç donatılı kirişler için Denklem 5.4 ile 5.5 ve basınç donatısız kirişler için Denklem 5.6 ile 5.7 ifadelerine göre hesaplanmaktadır. Ayrıca Şekil 5.2'de basınç donatılı ve

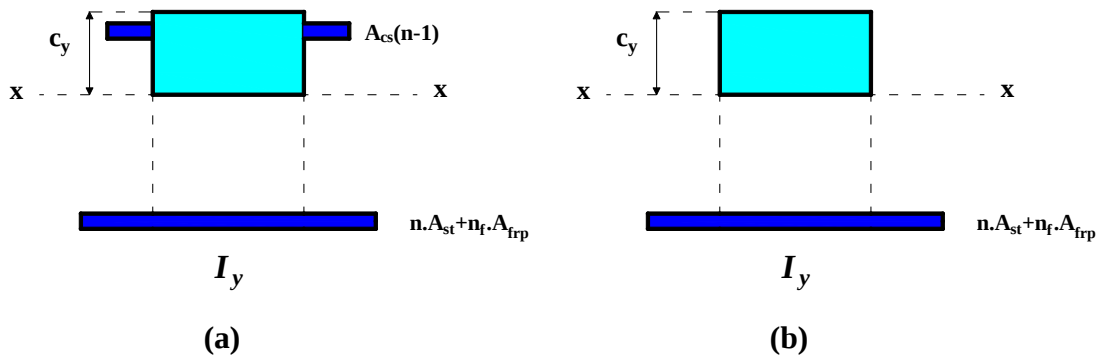
basınç donatısız kirişlerde akma anındaki atalet momenti, Denklem 5.10-5.11’de akma anındaki basınç derinliğine (c_y) bağlı olarak ifade edilmiştir. Denklem 5.10 ve 5.11 sırasıyla basınç donatılı ve basınç donatısız kirişlere ait akma atalet momentlerini ifade etmektedir. Şekil 5.3’te basınç donatılı ve donatısız kirişlerin akma anında sahip olduğu kesitlerine yer verilmiştir. Bu durumda Denklem 5.8-5.9 kullanılarak gerçekleştirilen deformasyon tahminlerinin, kirişlerde çelik donatıların akma noktası ile sınırlandırıldığına dikkate alınması gerekmektedir. Yani bu atalet momenti ifadeleri kirişin ilk çatlama anından çelik donatıların aktığı ana kadar kullanılabilir.

$$\frac{1}{I_e} = \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right)^2 \cdot \frac{1}{I_g} + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right)^2 \right] \cdot \frac{1}{I_y} \quad (5.8)$$

$$\frac{1}{I_e} = \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right)^2 \cdot \frac{1}{I_{ucr}} + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right)^2 \right] \cdot \frac{1}{I_y} \quad (5.9)$$

$$I_y = \left[\frac{bc_y^3}{12} + bc_y \left(\frac{c_y}{2} \right)^2 \right] + \left[(nA_{st} + n_f A_{frp}) (d - c_y)^2 \right] + \left[(n-1)A_{cs} (c_y - d_{cc})^2 \right] \quad (5.10)$$

$$I_y = \left[\frac{bc_y^3}{12} + bc_y \left(\frac{c_y}{2} \right)^2 \right] + \left[(nA_{st} + n_f A_{frp}) (d - c_y)^2 \right] \quad (5.11)$$



Şekil 5.3. (a) Basınç donatılı (Birinci grup), (b) basınç donatısız (İkinci ve üçüncü grup) kirişlerin akma anına ait dönüştürülmüş kesitleri

5.2. Elastisite Modülü

Kirişlerde deformasyon tahmini yapılırken kullanılan bir diğer parametre de elastisite modülüdür. Elastisite modülü malzemenin şekil değiştirmeye gösterdiği direnç olarak tanımlanmaktadır. Kiriş deformasyonları, kesitler tamamen betona dönüştürülerek hesaplandığı için bu bölümde betonun elastisite modülü ifadelerine yer verilmiştir. Bu bölümde, betonun elastisite modülü için iki farklı yaklaşım kullanılarak deformasyon tahminleri yapılmıştır.

5.2.1. ACI 318M-11 [35] Elastisite Modülü Tanımı

Bu yönetmelikte betonun elastisite modülü, beton basınç dayanımının %45'ine karşılık gelen sekant modülü olarak tanımlanmıştır. Elastisite modülü bu tanımda sabit bir değerdir ve betonun silindir numune basınç dayanımına bağlı olarak ifade edilmektedir (Denklem 5.12). Birçok çalışmada deformasyon hesaplarında bu tanım kullanılmaktadır.

$$E_c = 4700 \sqrt{f_c} \quad (5.12)$$

5.2.2. Sekant Modülü Tanımı

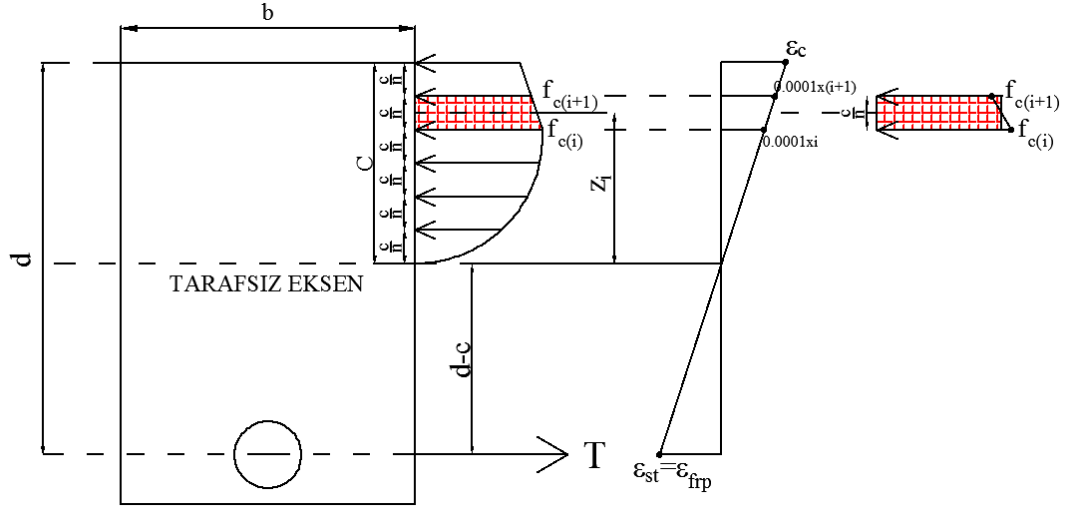
Sekant modülü, betonun gerilme birim deformasyon eğrisinin herhangi bir noktasını, orjine birleştiren doğrunun eğimi olarak tanımlanmıştır. Gerilmenin değişimi ile birlikte değişim göstermektedir (Denklem 5.13). Yani sabit bir değer değildir. Sekant modülü kirişin eğilme tesiri altında ortalama elastisite modülü değerini ifade etmektedir. Sekant modülü düşük yük seviyelerinde en büyük değerini almaktadır. Yük seviyesi arttıkça betonun birim deformasyonu ve buna bağlı olarak gerilme değeri artarken sekant modülü değeri azalmaktadır. Sekant modülü değeri beton basınç dayanımının en yüksek olduğu noktada en düşük değerini ($E_c = f'_c / \epsilon_o$) almaktadır. Bu noktadan sonra yük seviyesi artmaya devam etse dahi deformasyon tahminleri yapılırken sekant modülü değeri $E_c = f'_c / \epsilon_o$ olarak alınmıştır.

$$E_c = \frac{f_c(\epsilon_c)}{\epsilon_c} \quad (5.13)$$

Tüm kirişlerde teorik yük-deplasman eğrileri, yaklaşık 20-25 farklı yük değerine karşılık gelen deplasman değerlerinin hesaplanması ile oluşturulmuştur. Teorik yük deformasyon eğrisi üzerinde yer alan bu noktalara ait koordinatların sekant elastisite modülü kullanılarak belirlenebilmesi için her noktaya karşılık gelen en dış beton basınç lifi birim deformasyon değerinin bilinmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Analitik çalışma neticesinde, malzeme modelleri kullanılarak en dış beton basınç lifinin birim deformasyon değerleri ile sekant modülü değerleri belirlenmiş ve yük-deplasman tahminleri buna göre yapılmıştır. Ancak hesaplanan beton basınç birim deformasyon değerlerinin doğru bir biçimde tespit edilip edilmediğinin belirlenebilmesi amacıyla, rastgele seçilen bir kiriş (G3S3) için iki farklı beton modeli kullanılarak katman (layer) analizi yapılmıştır. İki beton modelinden ilki çalışmada kullanılan Todeschini ve diğ. [32] beton modeli iken, ikincisi ise Hognestad [38] beton modelidir.

5.2.2.1. Katman (Layer) Analizi

Bu analiz için G3S3 kirişi rastgele seçilmiştir. Analizler, en dış beton basınç lifinin sırasıyla 0.0005, 0.0010, 0.0015, 0.0020, 0.0025, 0.0030 ve 0.0038 birim deformasyon değerleri için ve iki farklı beton modeli kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Betonun birim deformasyon değerinin tarafsız ekseninde sıfır olduğu bilinmektedir. Her katmanın alt ve üst hizası arasında 0.0001'lik bir birim deformasyon farkı olacak şekilde katman sayısı (n) belirlenmiştir. Örneğin en dış beton basınç lifi 0.0038 birim deformasyon değerine sahip olduğu durumda 38 adet katman oluşturulmuş, en dış basınç lifinin 0.0010 birim deformasyon değeri için ise 10 adet katman oluşturularak hesaplamalar yapılmıştır. Şekil 5.4'te Hognestad beton modeli [38] ile gerçekleştirilmiş katman analiz çizimine yer verilmiştir. Ayrıca Hognestad beton modeli parametreleri Denklem 5.14-5.16'da sunulmuştur.



Şekil 5.4. Hognestad [38] beton modeli kullanılarak gerçekleştirilen layer analiz şeması

$$f_c(\epsilon_c) = f'_c \left[\frac{2\epsilon_c}{\epsilon_0} - \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_0} \right)^2 \right] \quad (5.14)$$

$$f'_c = 0.9 \cdot f_c \quad (5.15)$$

$$\epsilon_0 = 1.8 f'_c / E_c \quad (5.16)$$

Başlangıçta en dış beton basınç lifi birim deformasyon değeri ϵ_c bilindiğinden her katmanın alt ve üst seviyelerine karşılık gelen birim deformasyon değerleri elde edilmiştir. Buna bağlı olarak, her katmanın alt ve üst seviyelerindeki basınç gerilmeleri ilgili beton modeli kullanılarak hesaplanmıştır. Herhangi bir katmanın alt ve üst seviyesindeki beton basınç gerilmeleri sırasıyla $f_{c(i)}$ ve $f_{c(i+1)}$ ile ifade edilmiştir. Ayrıca beton basınç derinliği c bilinmediğinden her katmanın kalınlığı c/n ile gösterilmiştir.

Her bir katmandaki basınç kuvveti $\frac{f_{c(i)} + f_{c(i+1)}}{2} \cdot \frac{c}{n} \cdot b$ ifadesi kullanılarak

hesaplanmış ve tüm katmanlardaki basınç kuvvetleri toplanarak betonun toplam basınç kuvveti c cinsinden ifade edilmiştir. Birim deformasyon uyumluluk denklemi

$\epsilon_{st} = \epsilon_{frp} = \epsilon_c \frac{d-c}{c}$ kullanılarak çelik ve FRP donatılarının birim deformasyon

değerleri ile çekme kuvvetleri yine c cinsinden elde edilmiştir. İç kuvvetlerin eşitliği ilkesi kullanılarak c değeri elde edilmiştir. Daha sonra tarafsız eksene göre hem

donatıların hem de her katmanın ayrı ayrı moment kolu uzunlukları hesaplanarak kirişin moment ve yük kapasiteleri hesaplanmıştır.

Çizelge 5.1’de kontrol edilmesi istenen analitik değerler ve farklı iki beton modeli ile gerçekleştirilen katman analizine göre hesap edilmiş beton basınç derinliği ve taşıma gücü tahminlerine yer verilmiştir. Bu çizelgede verilen analitik çalışma sonuçları, Todeschini ve diğ. [32] tarafından önerilen bağıntılar yardımıyla hesaplanmış (katman analizi olmayan) tarafsız eksen derinliği ve yük kapasitesi değerlerini ifade etmektedir. Analitik çalışma ve Todeschini ve diğ. [32] beton modeli kullanılarak gerçekleştirilen tahminlerin birbiriyle doğrudan örtüştüğü sonucu gözlemlenirken Hognestad [38] beton modeli ile yapılan tahminlerin de çok yakın olduğu sonucu ortaya çıkmıştır.

Çizelge 5.1. Layer analiz sonuçları

Betonun En dış Basınç Birim Deformasyonu (ϵ)	Analitik Çalışma		Todeschini Katman Analizi		Hognestad Katman Analizi	
	c (mm)	P (kN)	c (mm)	P (kN)	c (mm)	P (kN)
0.0005	79.51	46.43	79.55	46.30	79.80	46.03
0.0010	81.18	87.00	81.35	86.84	83.20	86.25
0.0015	70.76	101.97	70.80	101.96	71.88	101.18
0.0020	68.32	114.83	68.35	114.65	68.95	114.09
0.0025	68.84	124.95	68.84	124.79	69.47	124.01
0.0030	70.62	132.80	70.62	132.73	71.30	131.76
0.0038	74.72	141.87	74.72	141.87	75.20	141.19

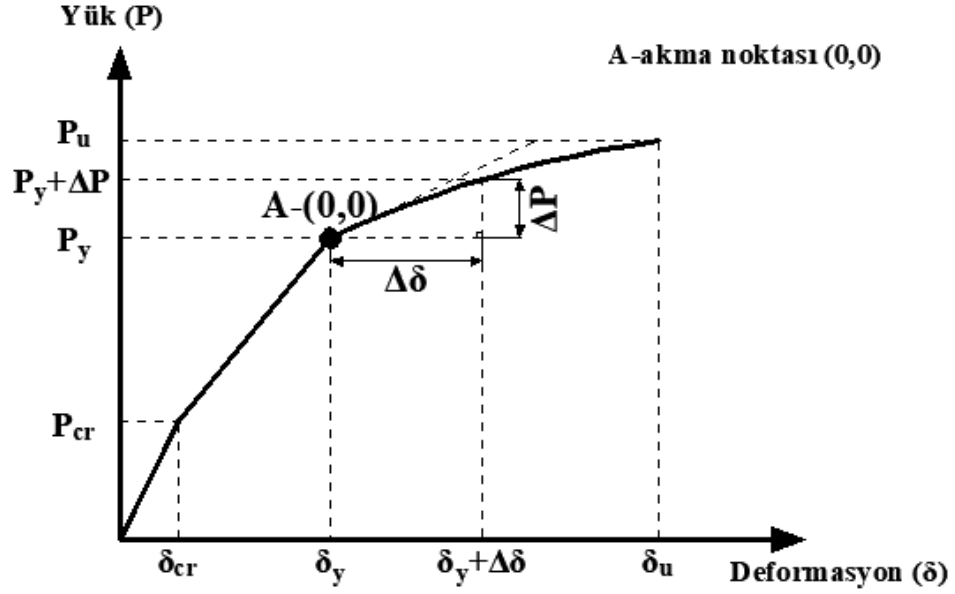
5.3. Salt Çelik Donatılı Kirişlerde Yük Deformasyon İlişkisi Tahmin Yöntemi

Salt çelik donatılı kirişlerde akma anına kadar deformasyonlar, elastik eğri denklemi (Denklem 5.1) kullanılarak tahmin edilmiştir. Bu tahminler, iki farklı elastisite modülü tanımı ve Bischoff etkili atalet momenti ifadesine göre yapılmıştır. Bischoff etkili atalet momentinin, çatlamamış kesit atalet momentinden (I_g ve I_{ucr}) akma anındaki atalet momentine (I_y) doğru kademeli olarak azaldığı (Denklem 5.8-5.9)

öngörülmüştür. Akma anından sonra ise kirişlerin elasto-plastik davrandığı varsayımına göre deformasyon hesabı yapılmamıştır.

5.4. Hibrit Donatılı Kirişlerde Yük Deformasyon İlişkisi Tahmin Yöntemi

Elastik eğri denklemleri, malzeme elastik sınırlar içindeyken deformasyon hesabı yapılmasına olanak sağlamaktadır. Bu sebeple geleneksel çelik donatılı betonarme kirişlerde deformasyonlar çelik donatıların akması anına kadar tahmin edilebilmektedir. Hibrit FRP-çelik donatılı kirişlerde ise kiriş taşıma gücüne ulaşmadan önce çelik donatılar akmaktadır. Bu kirişlerde FRP donatı oranı arttıkça akma daha düşük yük seviyelerinde meydana gelmektedir. Özellikle de çelik donatı oranı düşük olan hibrit donatılı kirişlerde akma daha düşük yük seviyelerinde gerçekleştiğinden ve klasik yöntemlerle yapılacak olan deformasyon tahminleri donatı akma anına kadar geçerli olduğundan, bu kirişlerde yük deformasyon tahminleri çok kısıtlı yük seviyelerine kadar doğru olarak yapılabilir. Bu duruma ek olarak, hibrit donatılı kirişlerde çelik donatılar akmış olsa dahi FRP donatısı, kiriş taşıma gücüne ulaşana kadar her zaman elastik davranış göstermektedir. Ayrıca literatürde yer alan hibrit donatılı kiriş çalışmalarından Yoon ve diğ. [16]'un çalışmasında da çelik donatılar aktıktan sonraki deformasyonlar tahmin edilmiştir. Bu durumlar göz önünde bulundurularak hibrit FRP-çelik donatılı kirişler için çelik donatıların akmasından sonra da geçerli olan yeni bir yük-deplasman tahmin metodu geliştirilmiştir. Bu metoda ait yük-deplasman eğrisi Şekil 5.5'te sunulmuştur.



Şekil 5.5. Hibrit donatılı kirişlerde akma sonrası yük-deplasman modeli

Bu çalışma kapsamında deneyleri gerçekleştirilen bütün hibrit donatılı kirişlerde çekme donatı akması kesitin tamamen çatlamasından önce gerçekleşmiştir. Yani çelik donatılar akmadan önce kullanılacak olan etkili atalet momenti ifadesi, çatlamamış kesit atalet momentinden akma atalet momentine kademeli azalışı öngören Bischoff [15] ifadesi olarak seçilmiştir. Ayrıca akma anına kadar deformasyonlar, farklı iki elastisite modülü ifadesi kullanılarak elastik eğri denklemi aracılığı ile doğrudan hesaplanmıştır. Akma anından sonra ise kullanılacak olan yeni yöntem; akma anında elastikliğini yitiren çelik donatının katkısını ihmal etmekte ve akma anından sonra kirişte yüklemenin yeniden başladığı varsayımı üzerine kurulu bir elastik deformasyon hesabına dayanmaktadır. Daha açık bir ifadeyle, bu yöntem akma noktasını başlangıç noktası (A noktası-Şekil 5.5) olarak kabul eden ve kirişin akma anından sonraki deformasyonlarının yeni bir elastik eğri denklemi aracılığı ile tahmin edilmesine olanak sağlayan bir yöntemdir. Yeni denklemde deformasyonlar ($\Delta\delta$), akma yükünden sonra kirişe ek olarak gelen yeni yüklere (ΔP) göre hesaplanmaktadır (Denklem 5.17). Kiriş toplam yük (P) ve deformasyonları (δ) ise Denklem 5.17'den elde edilen yük (ΔP) ve deformasyon ($\Delta\delta$) değerlerine akma anındaki yük (P_y) ve deformasyon (δ_y) değerlerinin eklenmesi neticesinde elde edilmektedir (Denklem 5.18-5.19).

$$\Delta\delta = \frac{\Delta P \cdot L_{ss}}{48 \cdot EI} (3L^2 - 4L_{ss}^2) \quad (5.17)$$

$$P = P_y + \Delta P \quad (5.18)$$

$$\delta = \delta_y + \Delta\delta \quad (5.19)$$

Hibrit donatılı kirişlerde çelik donatıların akmasından sonraki deformasyon hesaplarında kullanılacak olan atalet momenti değerleri, yine Bischoff [15] etkili atalet momenti ifadesinden elde edilmektedir. Bischoff [15] ifadesinin yazılabilmesi için bir başlangıç atalet momentine ve bu değerden kademeli bir şekilde azalarak ulaşılabilecek olan nihai bir atalet momentine ihtiyaç duyulur. Boyuna donatının akmaya başlamasından hemen önce, kirişin atalet momentinin akma atalet momentine (I_y) eşit olduğu daha önce ifade edilmişti. Ancak, akmadan hemen sonra yani yüklemenin yeniden başladığı varsayılan noktada çelik donatıların katkısı ihmal edilerek, kirişin başlangıç atalet momentinin kesit ikinci akma atalet momenti (I_{y2}) olduğu düşünülmüştür. Yani çelik çekme donatısının akmasından sonra, kiriş etkili atalet momenti ikinci akma atalet momentinden çatlamış kesit atalet momentine doğru yavaş yavaş azalmaktadır. Çatlamış kesit atalet momenti ifadesi, çelik çekme donatılarının katkısını ihmal etmektedir. Bunun sebebi, akmanın tamamen çatlamadan önce gerçekleşmesidir. Bu çalışma kapsamında, çeliğin akması sebebiyle çelik çekme donatısının katkısını ihmal eden çatlamış kesit atalet momenti, ikinci çatlamış kesit atalet momenti olarak isimlendirilmiştir (I_{cr2}). Bu durumda Bischoff denklemi ikinci akma atalet momentinden (I_{y2}) ikinci tamamen çatlamış kesit atalet momentine (I_{cr2}) kadar kademeli azalacak şekilde yeniden düzenlenmiştir (Denklem 5.20):

$$\frac{1}{I_e} = \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right)^2 \cdot \frac{1}{I_{y2}} + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right)^2 \right] \cdot \frac{1}{I_{cr2}} \quad (5.20)$$

Bu ifadelerde yer alan ikinci akma atalet momenti ve ikinci tamamen çatlamış kesit atalet momenti ifadeleri basınç donatılı kirişler için Denklem 5.21 ve 5.22’de ve basınç donatısız kirişler için Denklem 5.23 ve 5.24’te verilmiştir. Akmadan önceki deformasyonlara benzer olarak, akma sonrası deformasyonlar iki farklı elastisite

modülüne (ACI 318M-11 [35] ve sekant elastisite modülü) göre ayrı ayrı hesaplanmıştır.

$$I_{y2} = \left[\frac{bc_y^3}{12} + bc_y \left(\frac{c_y}{2} \right)^2 \right] + \left[(n_f A_{frp}) (d - c_y)^2 \right] + \left[(n-1) A_{cs} (c_y - d_{cc})^2 \right] \quad (5.21)$$

$$I_{cr2} = \left[\frac{bc_{cr}^3}{12} + bc_{cr} \left(\frac{c_{cr}}{2} \right)^2 \right] + \left[(n_f A_{frp}) (d - c_{cr})^2 \right] + \left[(n-1) A_{cs} (c_{cr} - d_{cc})^2 \right] \quad (5.22)$$

$$I_{y2} = \left[\frac{bc_y^3}{12} + bc_y \left(\frac{c_y}{2} \right)^2 \right] + \left[(n_f A_{frp}) (d - c_y)^2 \right] \quad (5.23)$$

$$I_{cr2} = \left[\frac{bc_{cr}^3}{12} + bc_{cr} \left(\frac{c_{cr}}{2} \right)^2 \right] + \left[(n_f A_{frp}) (d - c_{cr})^2 \right] \quad (5.24)$$

Çizelge 5.2, hibrit donatılı kirişlerin yük-deplasman ilişkisi tahmininde farklı yük aralıkları ($0-P_{cr}$, $P_{cr}-P_y$, $P_y-P_{max,pre}$) için kullanılması gereken atalet momenti sınır değerlerini, elastisite modülü ifadelerini (ACI 318M-11 [35] ve Sekant Modülü) ve elastik eğri denklemlerini sunmak üzere hazırlanmıştır.

Çizelge 5.2. Hibrit donatılı kirişlerde yük-deplasman ilişkisi tahmini için yük seviyesine göre parametrelerin kullanım özeti

Yük Seviyesi	$0-P_{cr}$	$P_{cr}-P_y$	$P_y-P_{max,pre}$
Atalet Momenti	I_g ve I_{ucr} (Sabit)	$I_g \rightarrow I_y$	$I_{y2} \rightarrow I_{cr2}$
		ve	
		$I_{ucr} \rightarrow I_y$ (Bischoff 2005)	(Bischoff 2005)
Elastisite Modülü	ACI 318M-11 Tanımı / Sekant Modülü	ACI 318M-11 Tanımı / Sekant Modülü	ACI 318M-11 Tanımı / Sekant Modülü
Elastik Eğri Denklemi	$\delta = \frac{P \cdot L_{ss}}{48 \cdot EI} (3L^2 - 4L_{ss}^2)$	$\delta = \frac{P \cdot L_{ss}}{48 \cdot EI} (3L^2 - 4L_{ss}^2)$	$\Delta\delta = \frac{\Delta P \cdot L_{ss}}{48 \cdot EI} (3L^2 - 4L_{ss}^2)$
Toplam Yük ve Deformasyon	$P-\delta$	$P-\delta$	$P = \Delta P + P_y$ $\delta = \Delta\delta + \delta_y$

5.5. Salt FRP Donatılı Kirişlerde Yük Deformasyon İlişkisi Tahmin Yöntemi

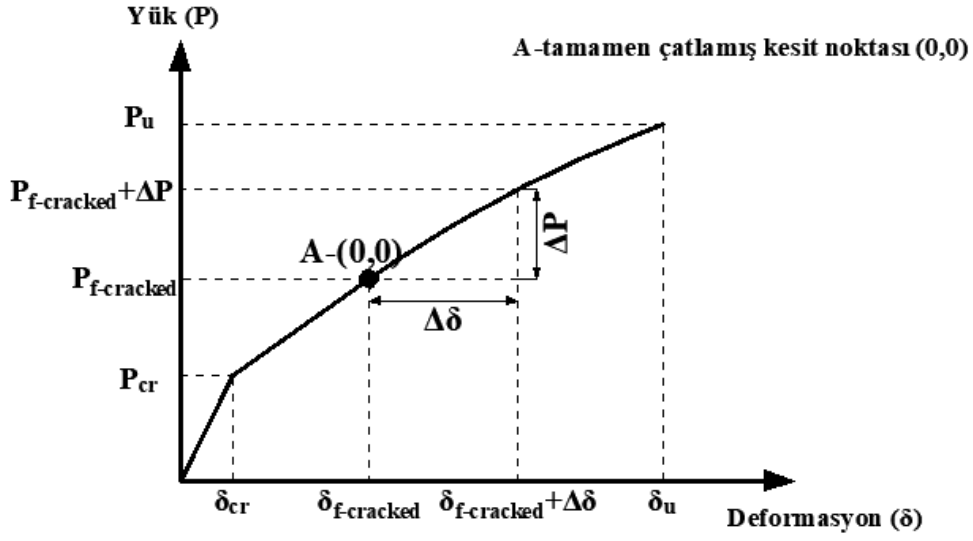
Salt FRP donatılı kirişlerde ilk çatlama yüküne değin deformasyon hesapları ve kullanılan parametreler (atalet momenti ve elastisite modülü) diğer kirişler ile benzerlik göstermektedir. Bu kirişlerde çelik donatı bulunmadığından, kirişler akma özelliği göstermemektedirler. İlk çatlama sonrasında ise Bischoff etkili atalet momenti ifadesi orijinalinde olduğu şekliyle çatlamamış kesit atalet momentinden (I_g veya I_{ucr}) tamamen çatlamış kesit atalet momentine (I_{cr}) doğru azalacak şekliyle kullanılmıştır (Denklem 5.3). Ayrıca, elastisite modülü ifadesi olarak da yine iki farklı yaklaşım göz önünde bulundurularak kiriş deplasmanları kesitin tamamen çatlamış olduğu noktaya kadar (fully cracked point) hesaplanmıştır. Bu noktadan sonra ise salt FRP donatılı kirişlerin yük-deplasman ilişkileri iki farklı yöntem kullanılarak elde edilmiştir:

5.5.1. A yöntemi

Bu yöntem, hibrit donatılı kirişlerde akma sonrası deformasyon tahminlerine benzer olarak kesitin tamamen çatlamış olduğu noktayı (fully cracked point) başlangıç noktası kabul eden ve kirişin bu noktadan itibaren yeniden elastik deformasyonlar yaptığı kabulüne dayalı olan yöntemdir. Şekil 5.6'da bu yöntemle ait uygulama şemasına yer verilmiştir. Yani bu yöntem, kesitin tamamen çatladığı noktanın başlangıç noktası (A noktası-Şekil 5.6) olarak kabul edilmesini ve kirişin bu noktadan sonraki deformasyonlarının yeni bir elastik eğri denklemi aracılığı ile tahmin edilmesini kapsamaktadır (Denklem 5.17). Yeni denklemde deformasyonlar ($\Delta\delta$), A noktasından sonra kirişe ek olarak gelen yeni yükler (ΔP) için tahmin edilmektedir. Kiriş toplam yük (P) ve deformasyonları (δ) ise Denklem 5.17'den elde edilen yük (ΔP) ve deformasyon ($\Delta\delta$) değerlerine A noktasındaki yük ($P_{f-cracked}$) ve deformasyon ($\delta_{f-cracked}$) değerlerinin eklenmesi neticesinde elde edilmiştir (Denklem 5.25 ve 5.26):

$$P = P_{f-cracked} + \Delta P \quad (5.25)$$

$$\delta = \delta_{f-cracked} + \Delta\delta \quad (5.26)$$



Şekil 5.6. Salt FRP donatılı kirişlerde kesit tamamen çatladıktan sonra yük-deplasman ilişkisi tahmin şeması

Çizelge 5.3 salt FRP donatılı kirişlerde yük deformasyon ilişkisi tahmininde, farklı yük aralıkları ($0-P_{cr}$, $P_{cr}-P_{f-cracked}$, $P_{f-cracked}-P_{max,pre}$) için atalet momenti sınır değerlerinin ne olacağı, kullanılan elastisite modülü ifadeleri (ACI 318M-11 [35] ve Sekant Modülü) ve elastik eğri denklemlerinin verildiği özet şablon olarak hazırlanmıştır.

Çizelge 5.3. Salt FRP donatılı kirişlerde yük deformasyon ilişkisi tahmini için yük seviyesine göre parametrelerin kullanım özeti (A yöntemi)

Yük Seviyesi	$0-P_{cr}$	$P_{cr}-P_{f-cracked}$	$P_{f-cracked}-P_{max,pre}$
Atalet Momenti	I_g ve I_{ucr}	$I_g \rightarrow I_{cr}$ ve $I_{ucr} \rightarrow I_{cr}$	
Elastisite Modülü	ACI 318M-11 / Sekant Modülü		
Elastik Eğri Denklemi	$\delta = \frac{P \cdot L_{ss}}{48 \cdot EI} \left(3L^2 - 4L_{ss}^2 \right)$	$\delta = \frac{P \cdot L_{ss}}{48 \cdot EI} \left(3L^2 - 4L_{ss}^2 \right)$	$\Delta\delta = \frac{\Delta P \cdot L_{ss}}{48 \cdot EI} \left(3L^2 - 4L_{ss}^2 \right)$
Toplam Yük ve Deformasyon	$P-\delta$	$P-\delta$	$P = P_{f-cracked} + \Delta P$ $\delta = \delta_{f-cracked} + \Delta\delta$

5.5.2. B yöntemi

Bu yöntemde kiriş yükleme başlangıcından maksimum yük seviyesine ulaşana kadar, yük deformasyon eğrisinin tek elastik eğri denklemi (Denlem 5.1) aracılığı ile tahmin edildiği yöntemdir. Bu yönteme ait parametre ve detayların verildiği şablon Çizelge 5.4'te sunulmuştur.

Çizelge 5.4. Salt FRP donatılı kirişlerde yük deformasyon ilişkisi tahmini için yük seviyesine göre parametrelerin kullanım özeti (B yöntemi)

Yük Seviyesi	$0-P_{cr}$	$P_{cr}-P_{max,pre}$
Atalet Momenti	I_g ve I_{ucr}	$I_g \rightarrow I_{cr}$ ve $I_{ucr} \rightarrow I_{cr}$
Elastisite Modülü	ACI 318M-11 / Sekant Modülü	
Elastik Eğri Denklemi	$\delta = \frac{P \cdot L_{ss}}{48 \cdot EI} (3L^2 - 4L_{ss}^2)$	
Toplam Yük ve Deformasyon	$P-\delta$	

5.6. Salt Çelik ve Hibrit FRP-Çelik Donatılı Kirişlerin Yük Deformasyon Tahminleri ve Deneysel Eğrilerle Karşılaştırılması

Bu bölümde, farklı atalet momenti, elastisite modülü ve elastik eğri denklemleri kullanılarak elde edilen analitik yük-deplasman eğrileri deneysel eğrilerle karşılaştırılmıştır (Şekil 5.7-5.26). Her kiriş için yük-deplasman eğrileri üçer grafik halinde sunulmuştur. Her grafikte biri deneysel, diğer ikisi iki farklı elastisite modülünün kullanılmasına dayalı analitik eğriler olmak üzere toplam üç adet yük-deplasman eğrisine yer verilmiştir. Bu üç grafikte tahminler arasındaki farklar Çizelge 5.5'te özetlenmiştir. Kiriş, ilk grafikte çatlamadan önce brüt kesit atalet momentine, ikinci grafikte ise çatlamamış dönüştürülmüş kesit atalet momenti sahip olduğu düşünülerek deformasyon hesapları gerçekleştirilmiştir. Bu durumda etkili atalet momenti ifadesinin başlangıç değeri ve ilk çatlama yükleri de her iki grafikte ayrı ayrı hesaplanmış ve bu değerler yük-deplasman eğrileri oluşturmada göz önünde bulundurulmuştur. Kirişlerin ilk çatlama yüklerinin doğru bir biçimde tahmin

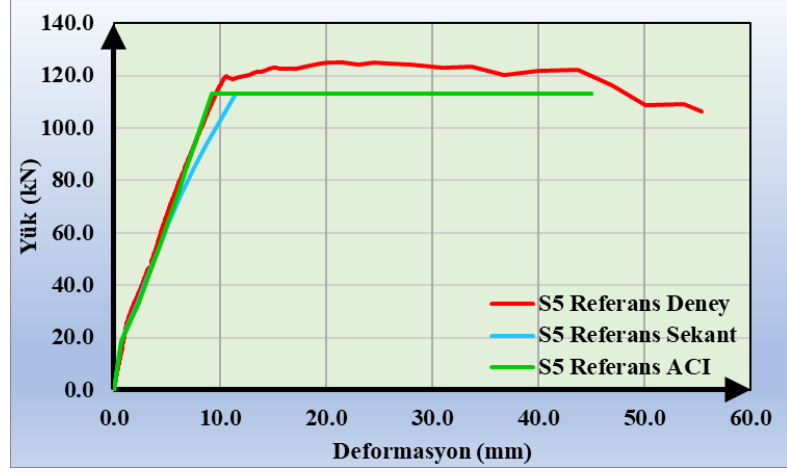
edilmesinin deplasman tahminleri üzerindeki etkisinin anlaşılabilmesi bakımından, her kiriş için bir de üçüncü bir grafik oluşturulmuştur. İşte bu üçüncü grafikte (ilk grafikten farklı olarak), ilk çatlama yükü tahmin edilmemiş yani doğrudan deneysel çatlama yükü kullanılarak analitik yük-deplasman eğrileri çizilmiştir. Ayrıca etkili atalet momenti ifadesinde yer alan ilk çatlama momenti (M_{cr}) de yine deneysel çatlama momenti olacak şekilde revize edilmiştir. Tüm salt çelik ve hibrit donatılı kirişlerin deformasyon tahminleri bu şekilde gerçekleştirilmiş ve deneysel veriler ile karşılaştırılmıştır.

Çizelge 5.5. Salt çelik ve hibrit donatılı kirişlerin deformasyon tahmin değişkenleri

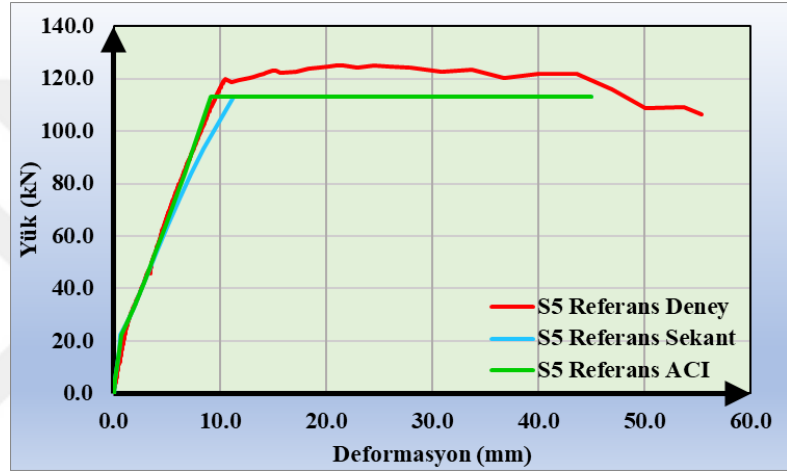
Grafik	İlk Çatlama Yükü	Etkili Atalet Momenti Sınırları (Bischoff)			Elastisite Modülü
		$0-P_{cr}$	$P_{cr}-P_y$	$P_y - P_{max,pre} *$	
1.	P_{cr2}	I_g	I_g-I_y	$I_{y2}-I_{cr2}$	ACI 318M-11/ Sekant Modülü
2.	P_{cr1}	I_{ucr}	$I_{ucr}-I_y$	$I_{y2}-I_{cr2}$	ACI 318M-11/ Sekant Modülü
3.	$P_{cr,exp}$	I_g	I_g-I_y	$I_{y2}-I_{cr2}$	ACI 318M-11/ Sekant Modülü

*** Hibrit FRP-çelik donatılı kirişlerde**

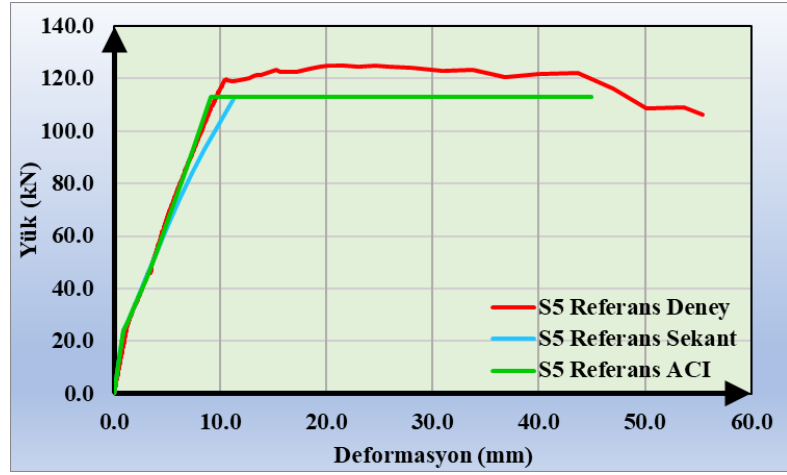
Bu bölümde hibrit FRP-çelik donatılı kirişlerde sekant elastisite modülü kullanılarak elde edilen analitik eğrileri, büyük ölçüde deneysel eğrilerle çok daha uyumlu (özellikle çelik donatıların akmasından sonra) olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca sekant elastisite modülünün kullanılmasıyla deformasyonlar daha güvenli olacak şekilde (conservative) hesaplanmıştır. Bu sebeplerle, hibrit donatılı kirişler için ACI 318M-11 [35] elastisite modülü yerine eğilme tesiri altında ortalama bir elastisite değeri öngören sekant elastisite modülünün kullanılması önerilmiştir. Ayrıca yük-deplasman eğrisi tahminlerinde ilk çatlama yükü tahmininin deneysel çatlama yüküne yakınlığının eğriler arasındaki uyumu doğrudan etkilediği gözlemlenmiştir. Bu sebeplerle, salt çelik ve hibrit FRP-çelik donatılı kirişlerde çatlama dönüşürmüş kesit atalet momenti ifadesinin kullanılması durumunda yük deformasyon eğrilerinin daha uyumlu olduğu ifade edilmiştir. Bu durumda hibrit ve salt çelik donatılı kirişlerde, Çizelge 5.5 2. grafik sütununda yer alan başlangıç (I_{ucr}) ve etkili atalet momenti sınır değerlerinin kullanılması önerilmiştir.



(a)

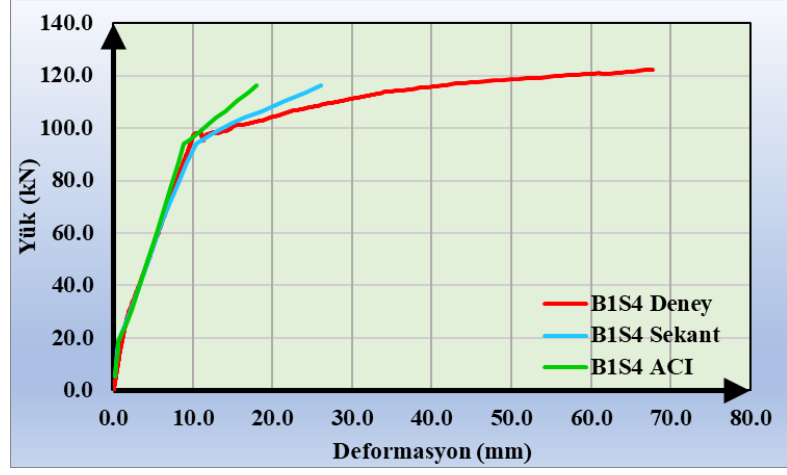


(b)

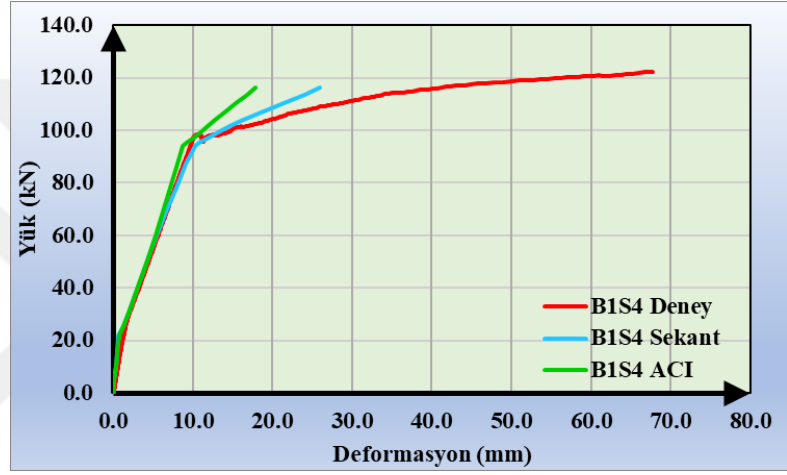


(c)

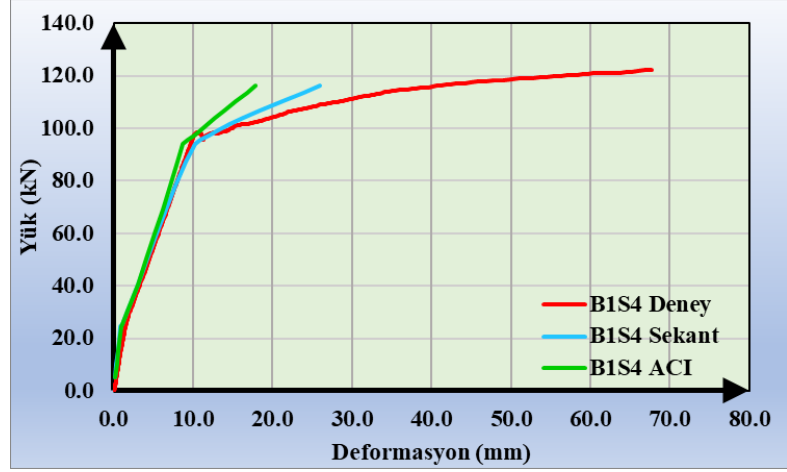
Şekil 5.7. S5 Referans kirişi deneysel ve analitik yük-deplasman eğrileri (a) 1. Grafik, (b) 2. Grafik (c) 3. Grafik yöntemi kullanılarak



(a)

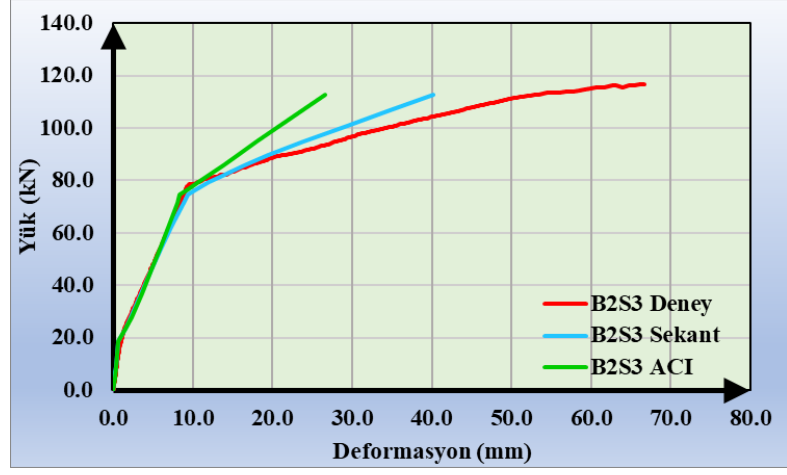


(b)

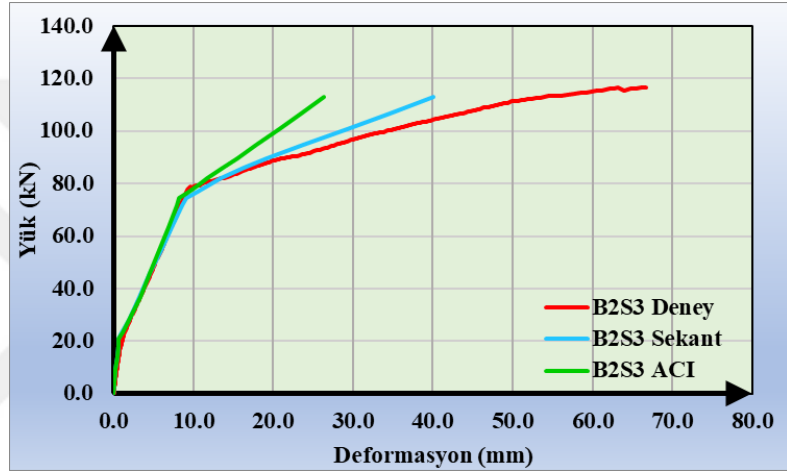


(c)

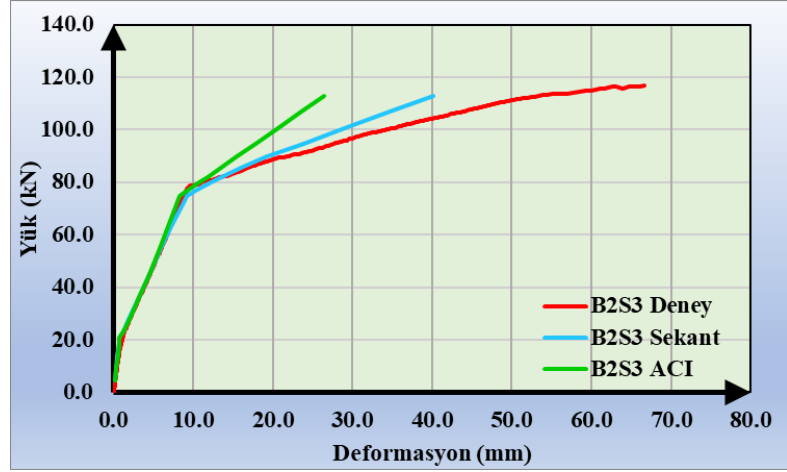
Şekil 5.8. B1S4 kirişi deneysel ve analitik yük-deplasman eğrileri (a) 1. Grafik, (b) 2. Grafik (c) 3. Grafik yöntemi kullanılarak



(a)

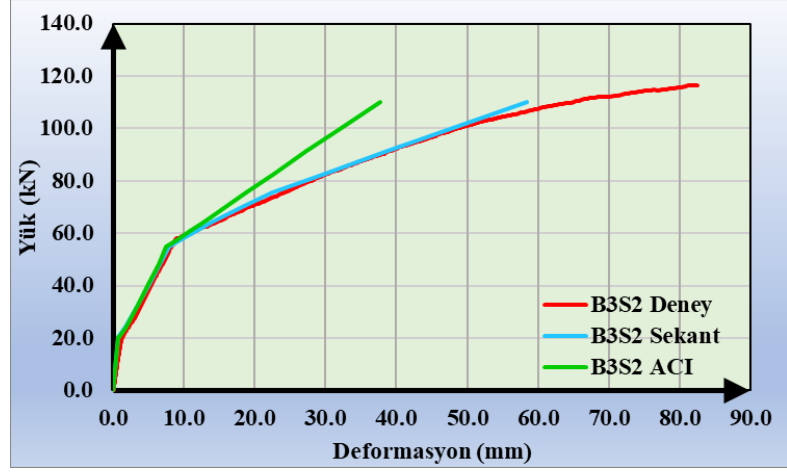


(b)

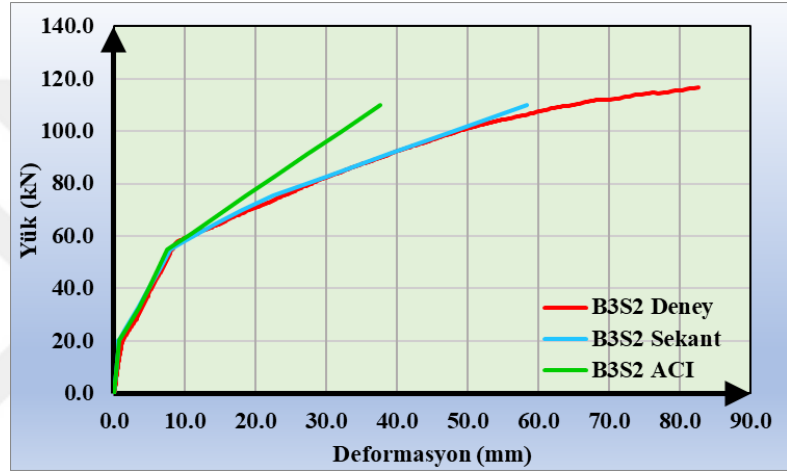


(c)

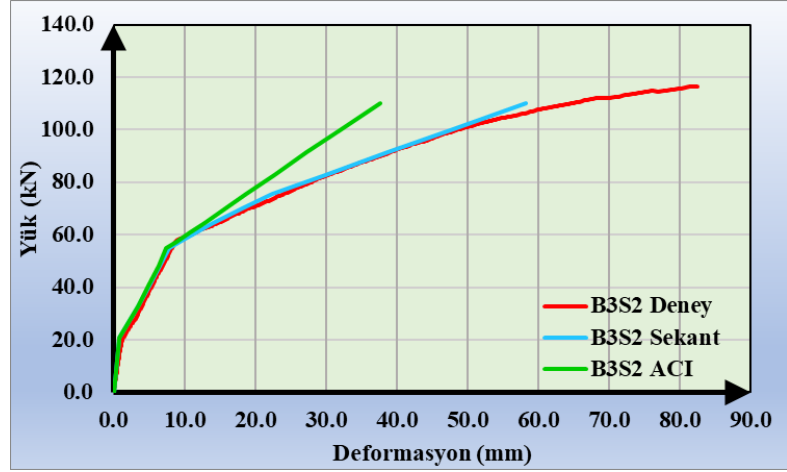
Şekil 5.9. B2S3 kirişi deneysel ve analitik yük-deplasman eğrileri (a) 1. Grafik, (b) 2. Grafik (c) 3. Grafik yöntemi kullanılarak



(a)

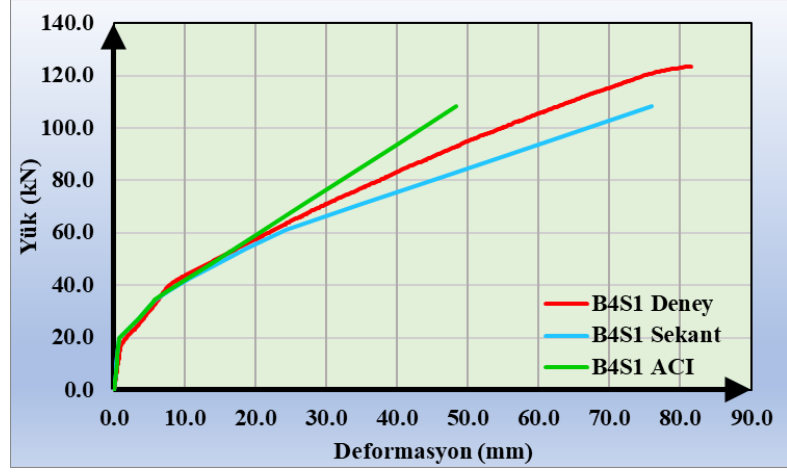


(b)

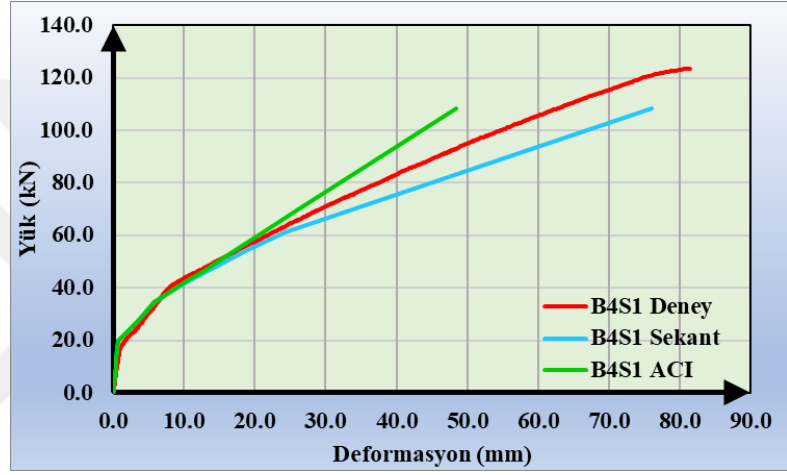


(c)

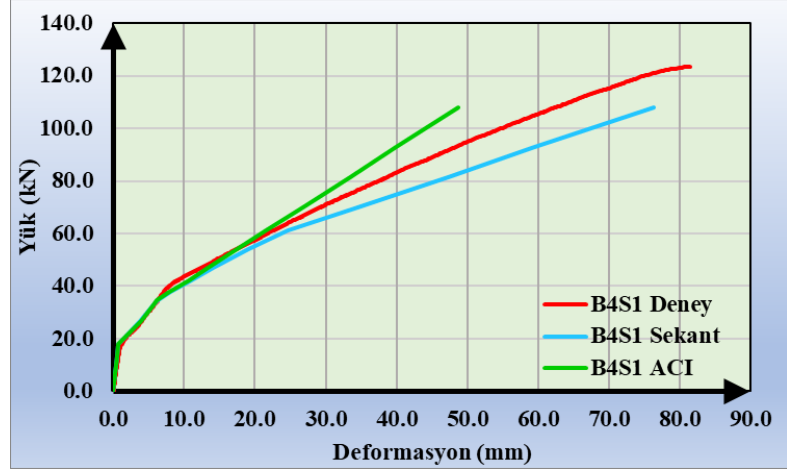
Şekil 5.10. B3S2 kirişi deneysel ve analitik yük-deplasman eğrileri (a) 1. Grafik, (b) 2. Grafik (c) 3. Grafik yöntemi kullanılarak



(a)

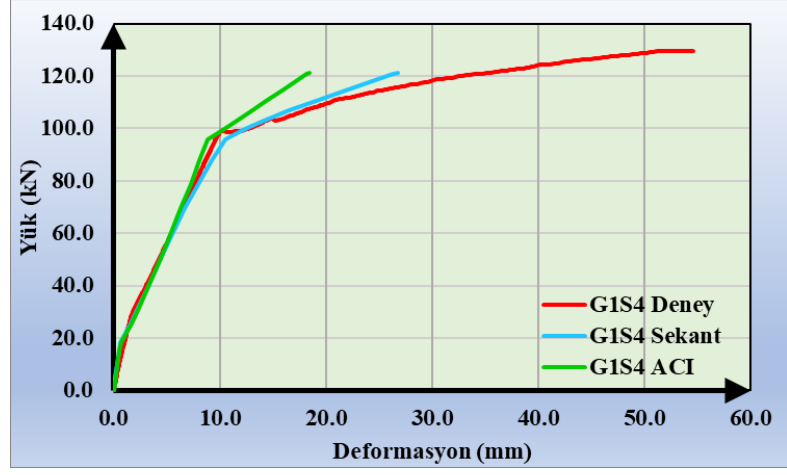


(b)

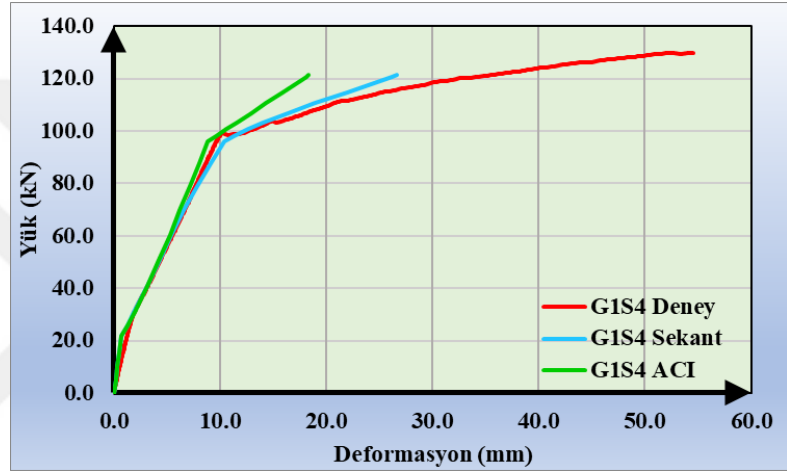


(c)

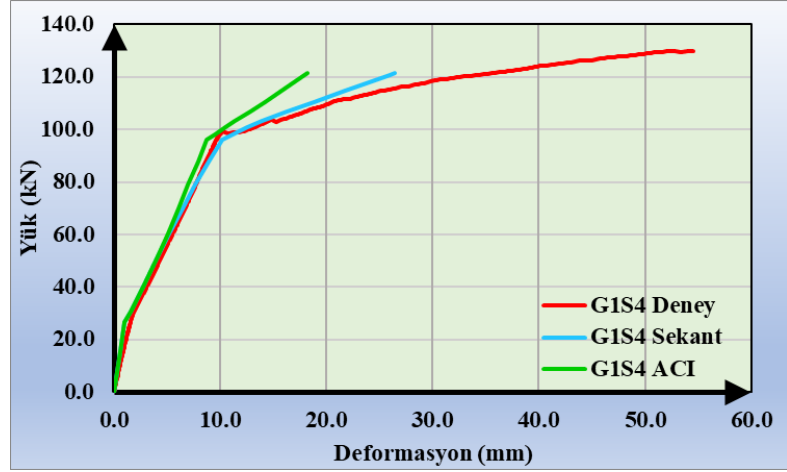
Şekil 5.11. B4S1 kirişi deneysel ve analitik yük-deplasman eğrileri (a) 1. Grafik, (b) 2. Grafik (c) 3. Grafik yöntemi kullanılarak



(a)

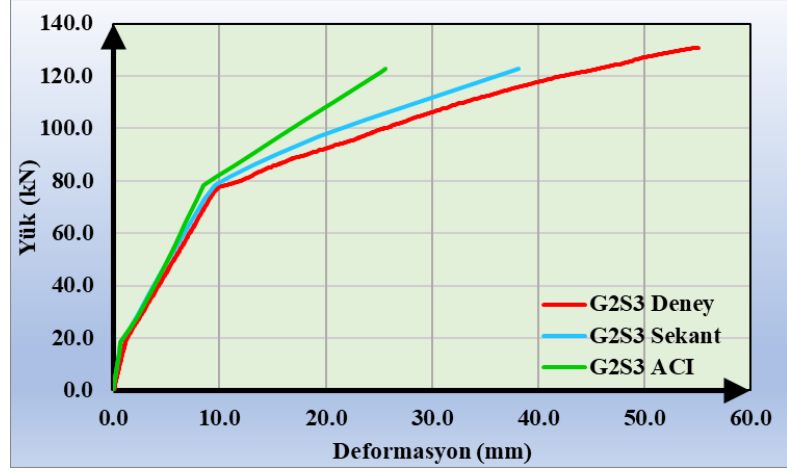


(b)

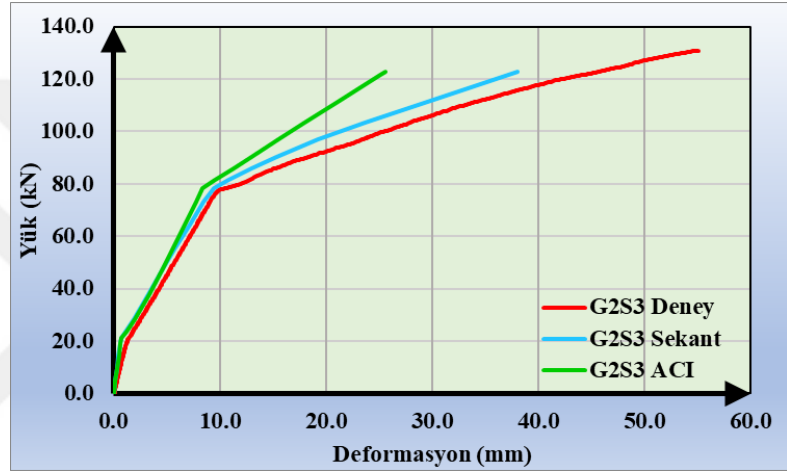


(c)

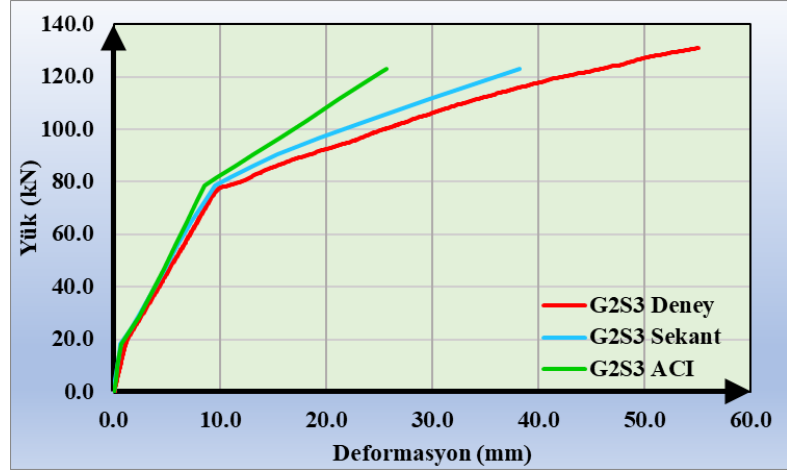
Şekil 5.12. G1S4 kirişi deneysel ve analitik yük-deplasman eğrileri (a) 1. Grafik, (b) 2. Grafik (c) 3. Grafik yöntemi kullanılarak



(a)

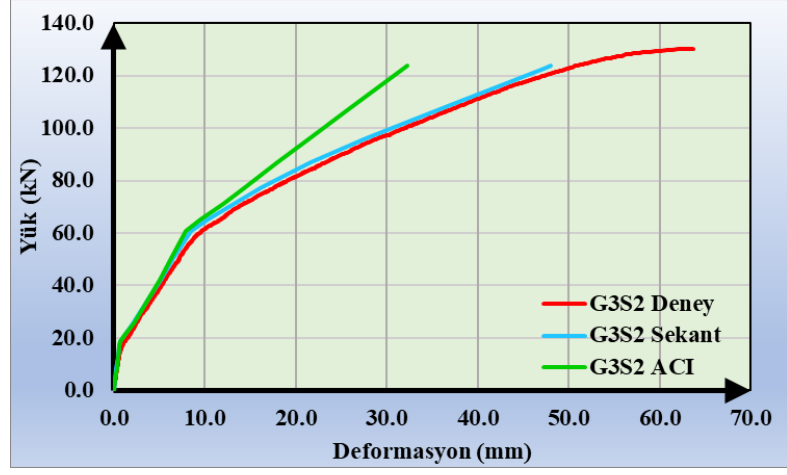


(b)

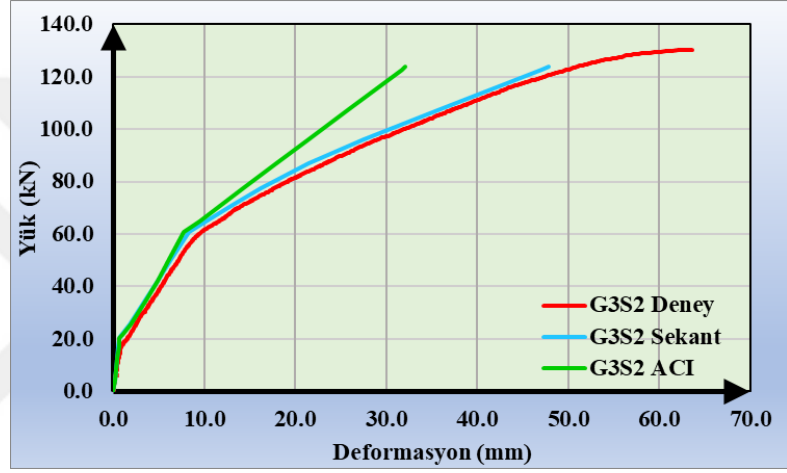


(c)

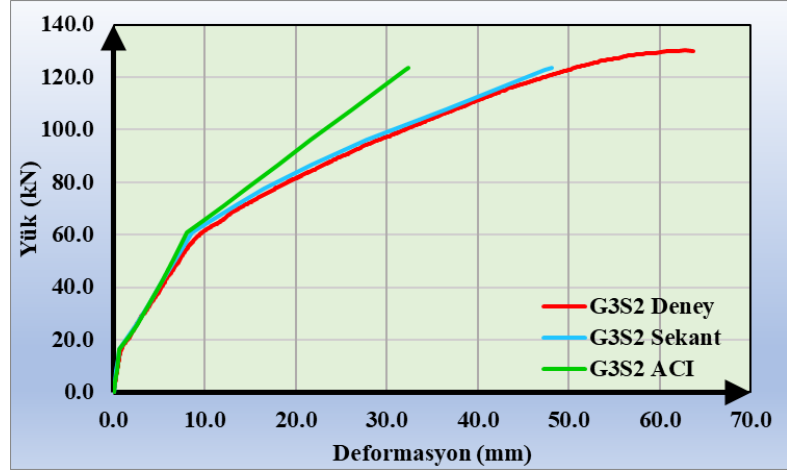
Şekil 5.13. G2S3 kirişi deneysel ve analitik yük-deplasman eğrileri (a) 1. Grafik, (b) 2. Grafik (c) 3. Grafik yöntemi kullanılarak



(a)

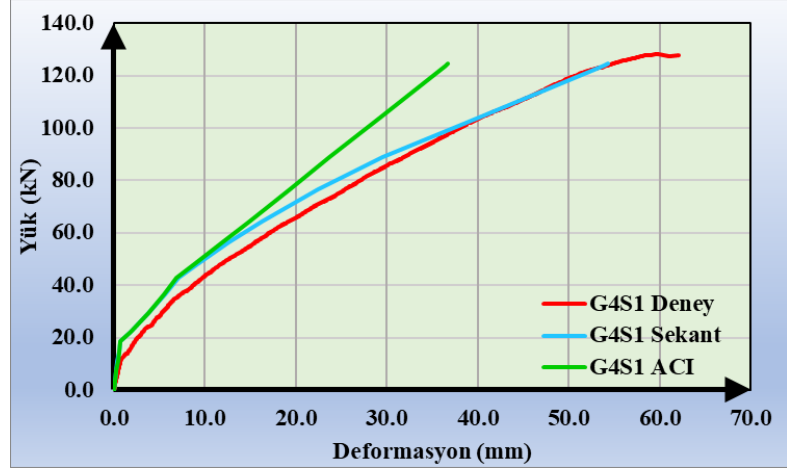


(b)

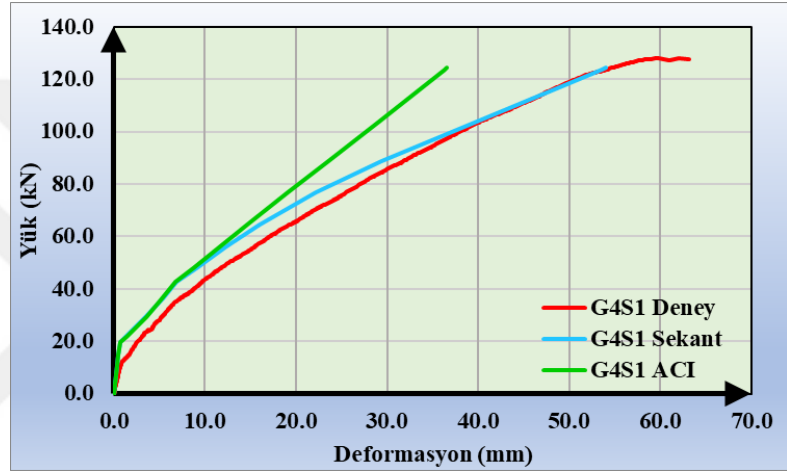


(c)

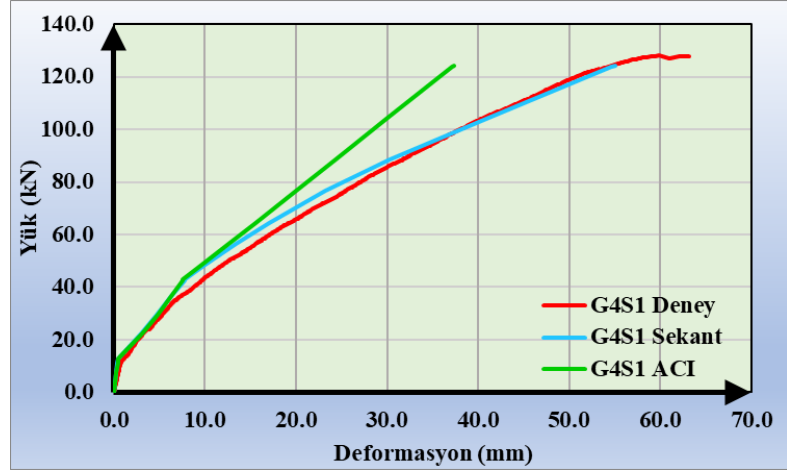
Şekil 5.14. G3S2 kirişi deneysel ve analitik yük-deplasman eğrileri (a) 1. Grafik, (b) 2. Grafik (c) 3. Grafik yöntemi kullanılarak



(a)

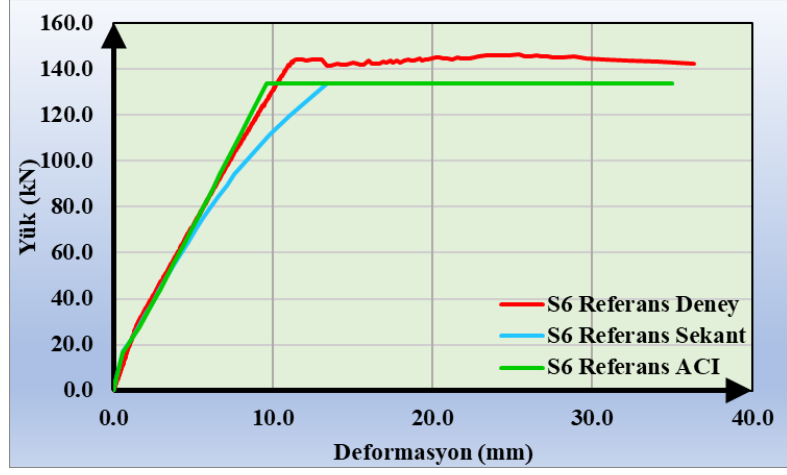


(b)

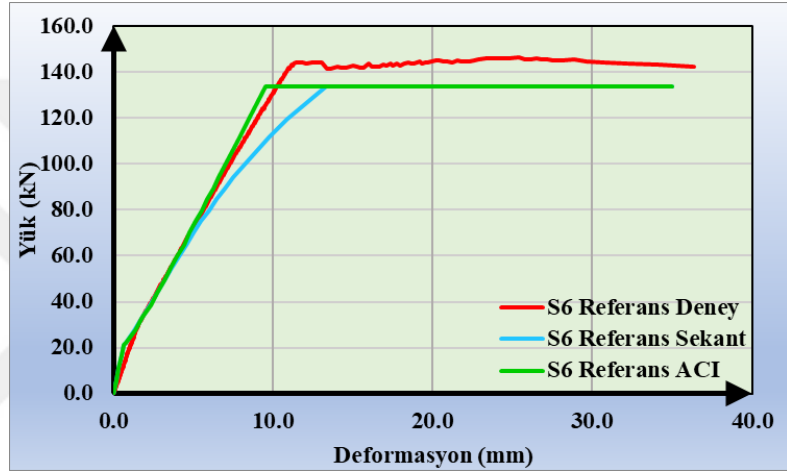


(c)

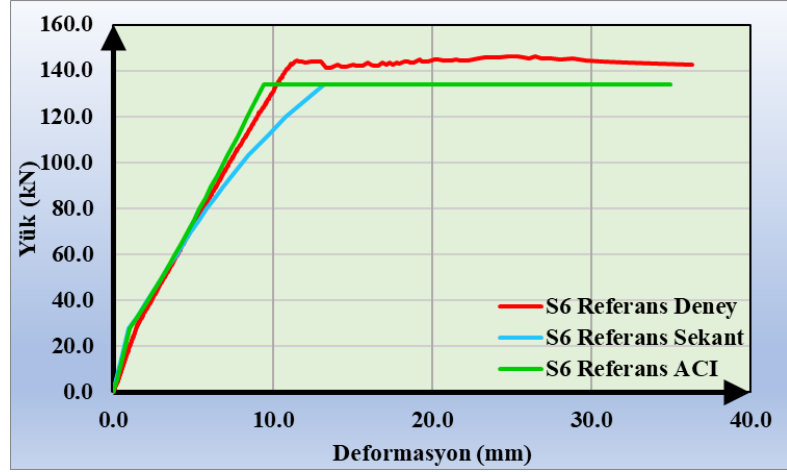
Şekil 5.15. G4S1 kirişi deneysel ve analitik yük-deplasman eğrileri (a) 1. Grafik, (b) 2. Grafik (c) 3. Grafik yöntemi kullanılarak



(a)



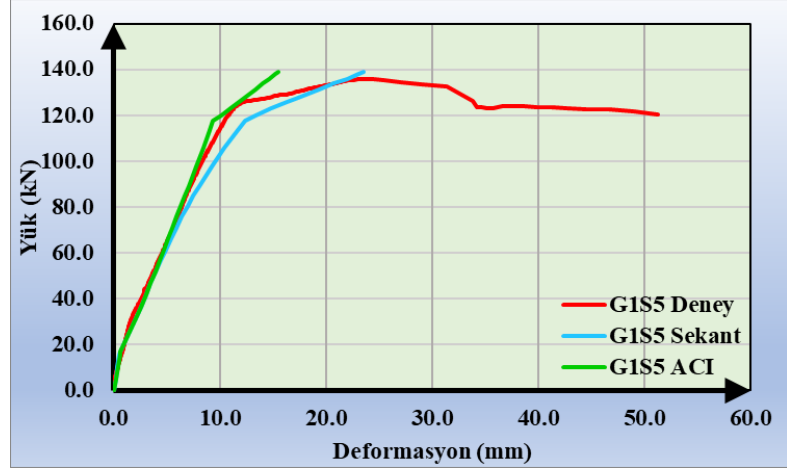
(b)



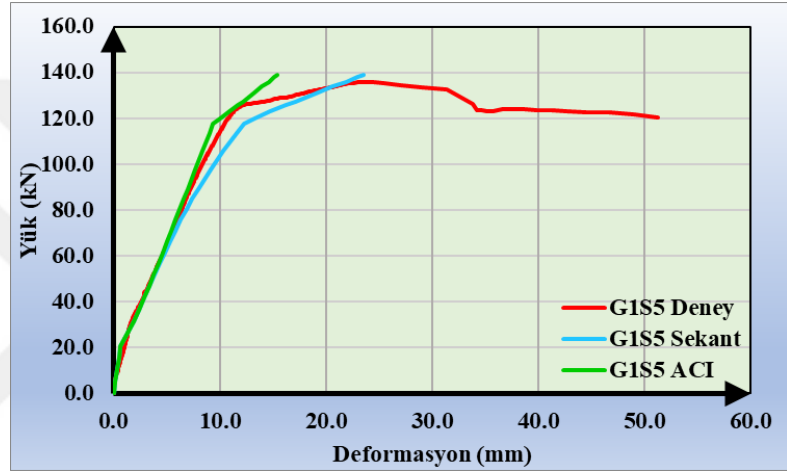
(c)

Şekil 5.16. S6 Referans kirişi deneysel ve analitik yük-deplasman eğrileri eğrileri (a)

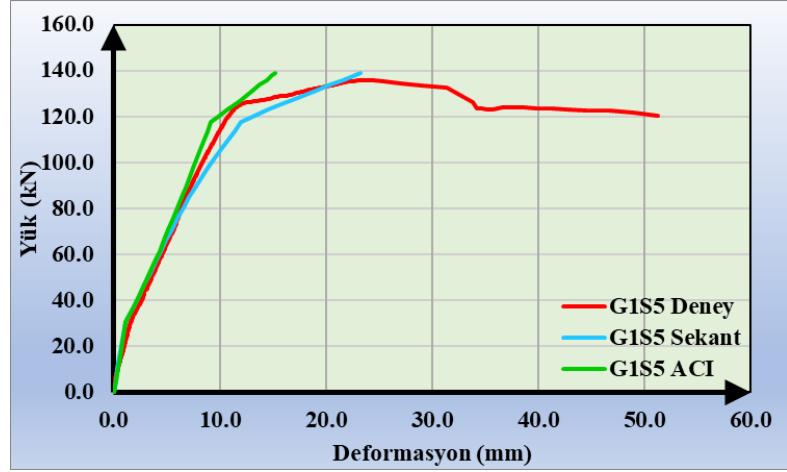
1. Grafik, (b) 2. Grafik (c) 3. Grafik yöntemi kullanılarak



(a)

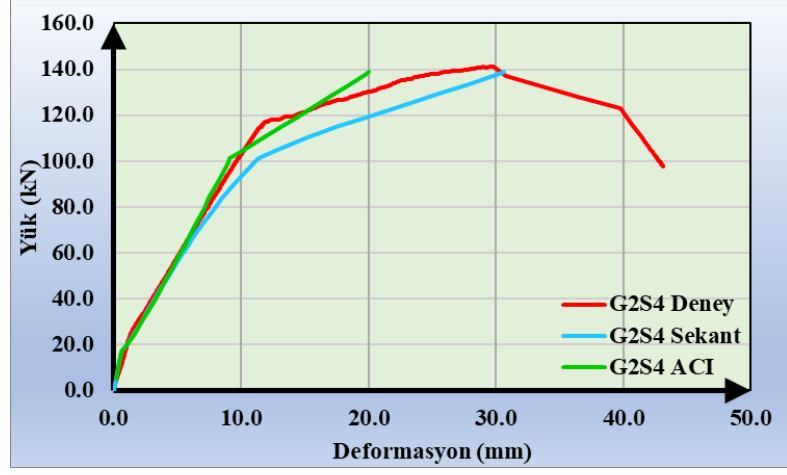


(b)

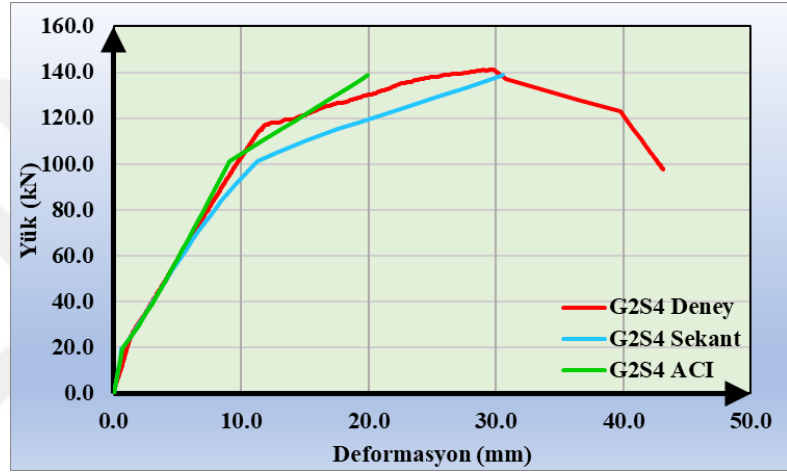


(c)

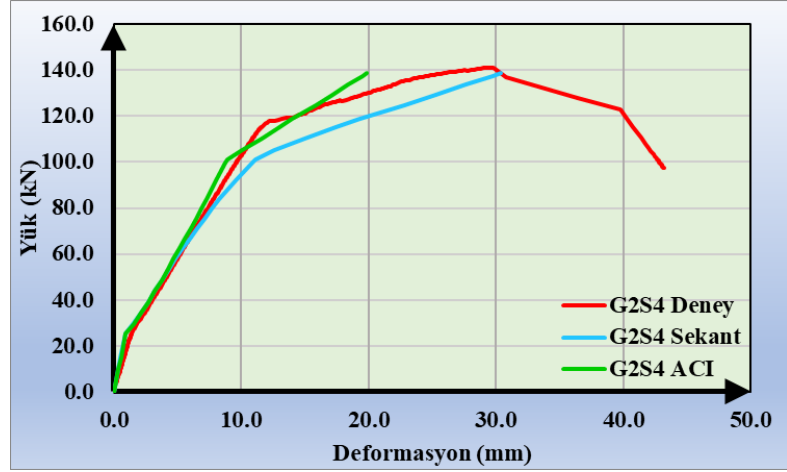
Şekil 5.17. G1S5 kirişi deneysel ve analitik yük-deplasman eğrileri (a) 1. Grafik, (b) 2. Grafik (c) 3. Grafik yöntemi kullanılarak



(a)

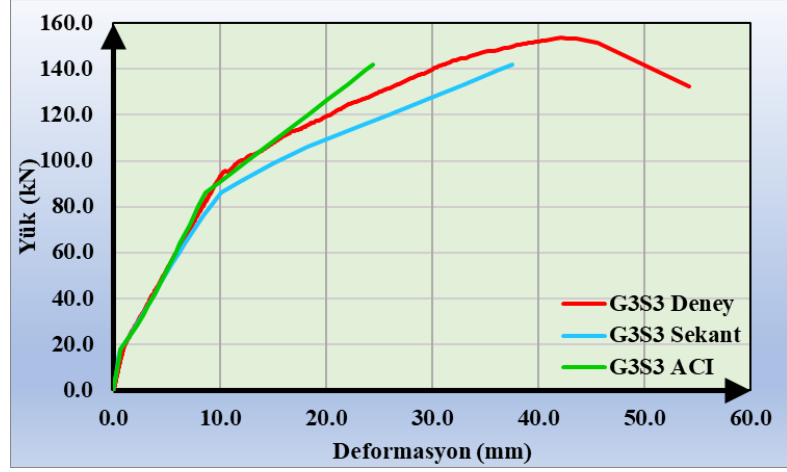


(b)

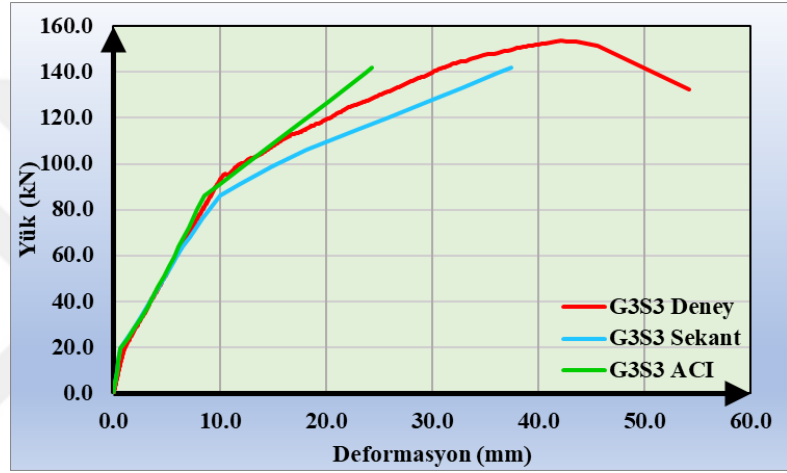


(c)

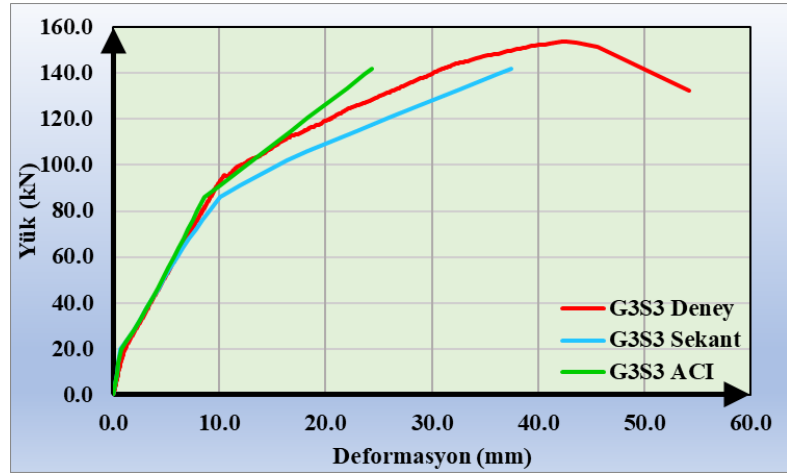
Şekil 5.18. G2S4 kirişi deneysel ve analitik yük-deplasman eğrileri (a) 1. Grafik, (b) 2. Grafik (c) 3. Grafik yöntemi kullanılarak



(a)

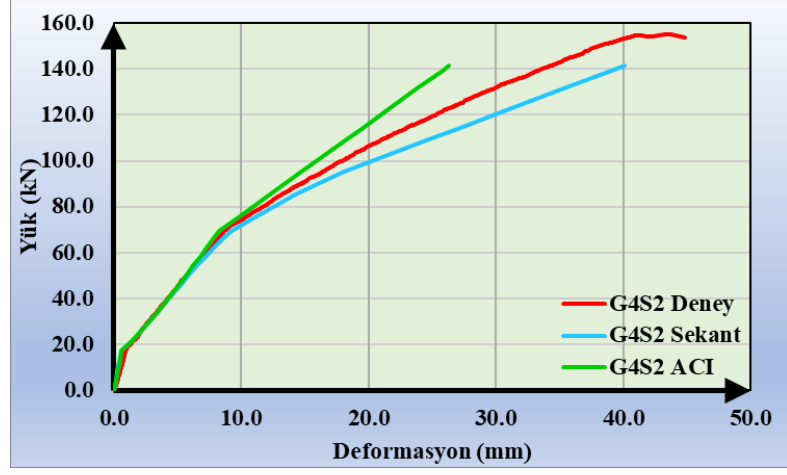


(b)

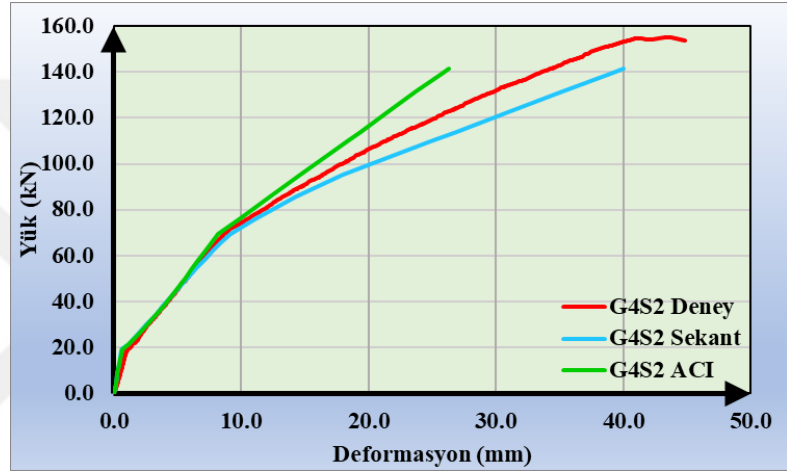


(c)

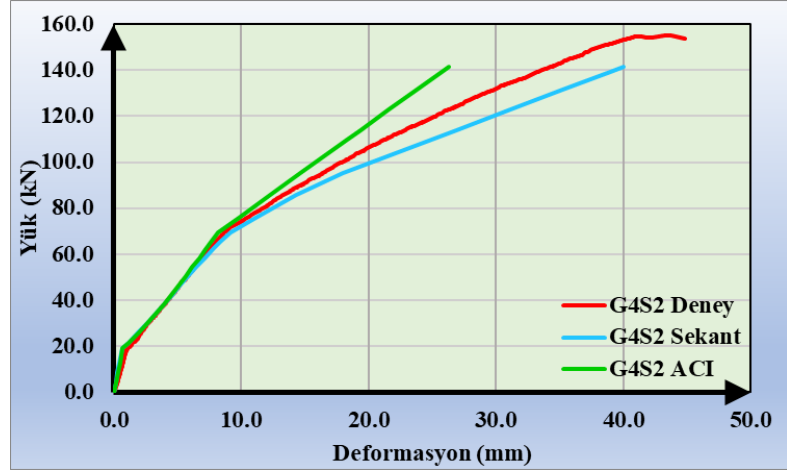
Şekil 5.19. G3S3 kirişi deneysel ve analitik yük-deplasman eğrileri (a) 1. Grafik, (b) 2. Grafik (c) 3. Grafik yöntemi kullanılarak



(a)

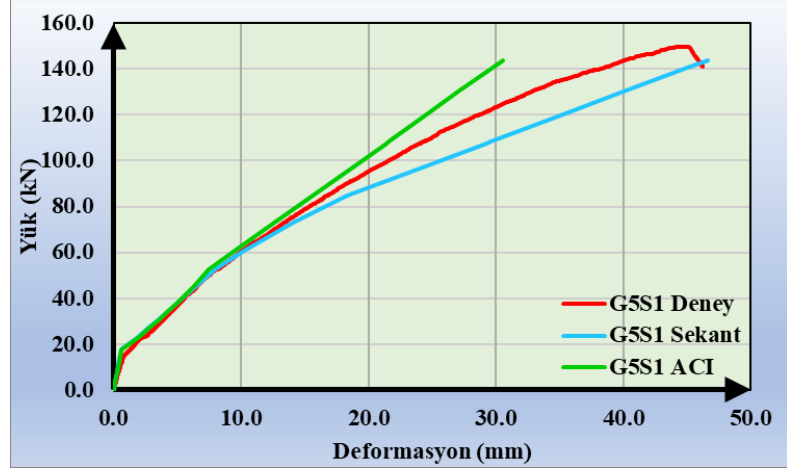


(b)

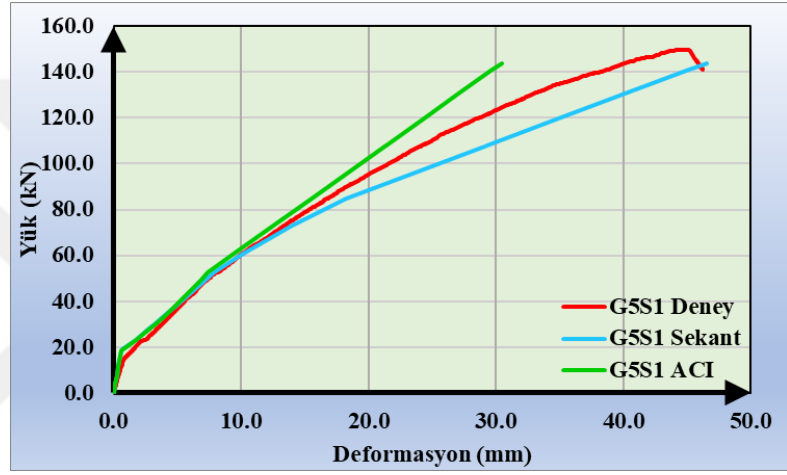


(c)

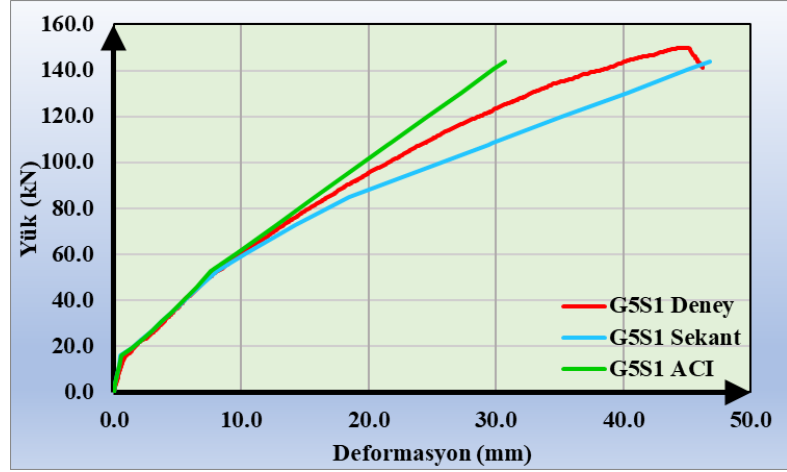
Şekil 5.20. G4S2 kirişi deneysel ve analitik yük-deplasman eğrileri (a) 1. Grafik, (b) 2. Grafik (c) 3. Grafik yöntemi kullanılarak



(a)

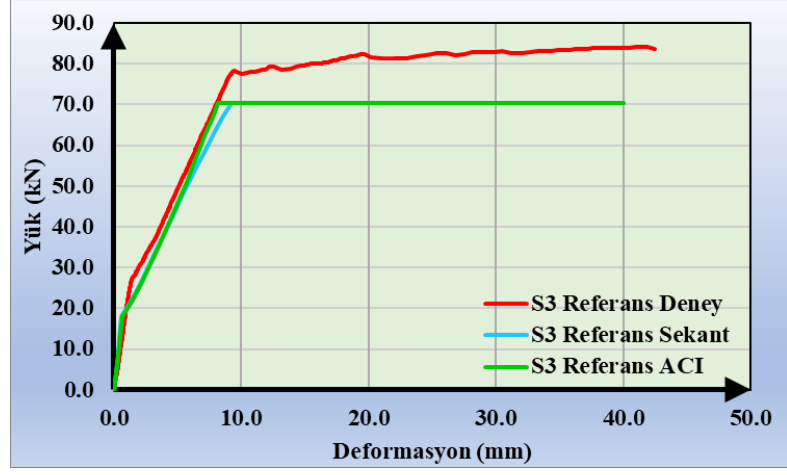


(b)

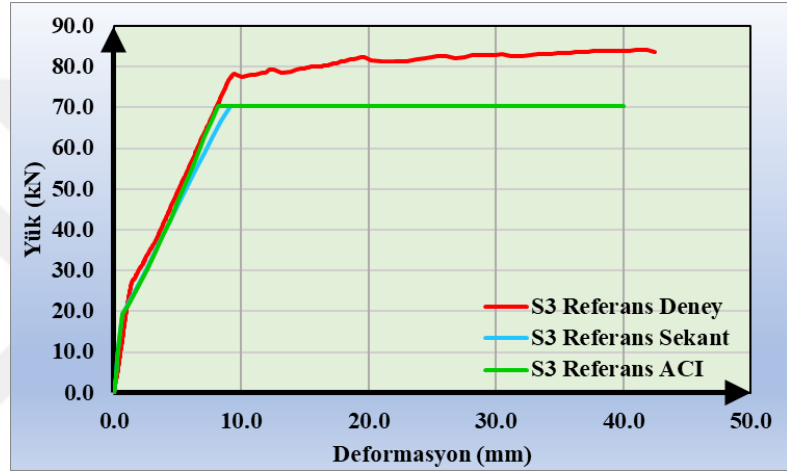


(c)

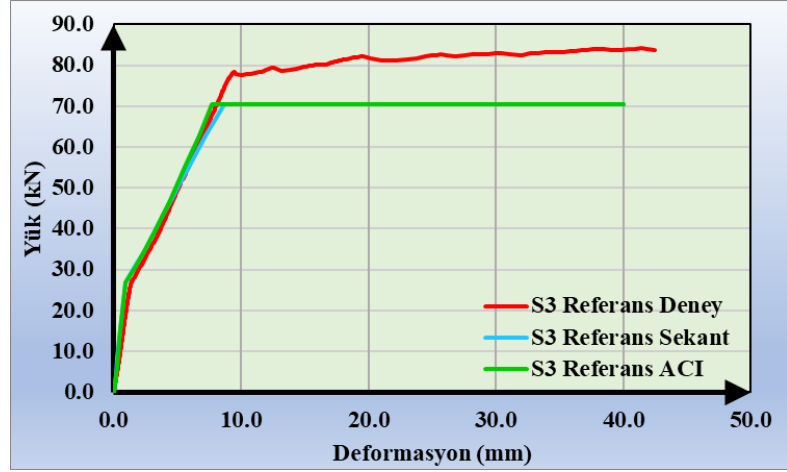
Şekil 5.21. G5S1 kirişi deneysel ve analitik yük-deplasman eğrileri (a) 1. Grafik, (b) 2. Grafik (c) 3. Grafik yöntemi kullanılarak



(a)

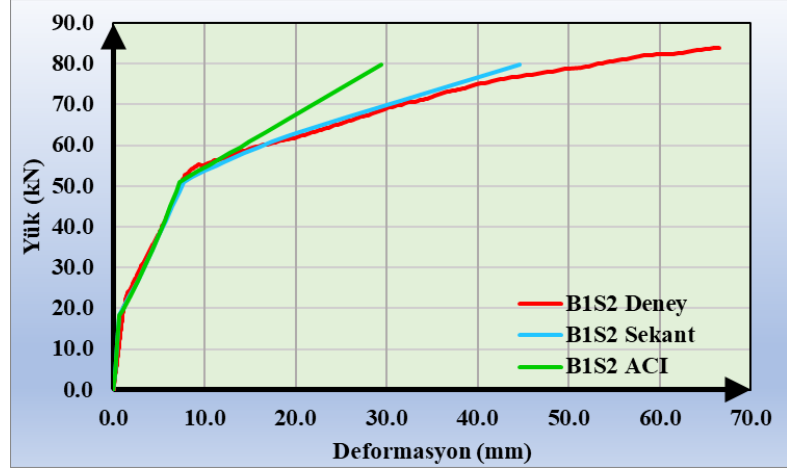


(b)

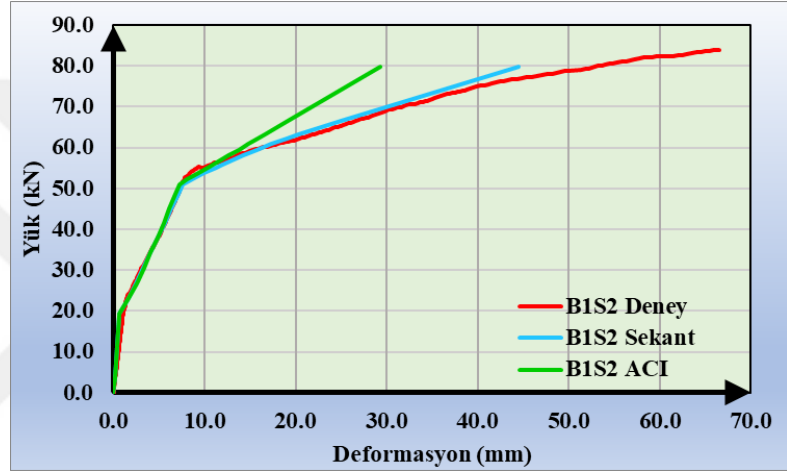


(c)

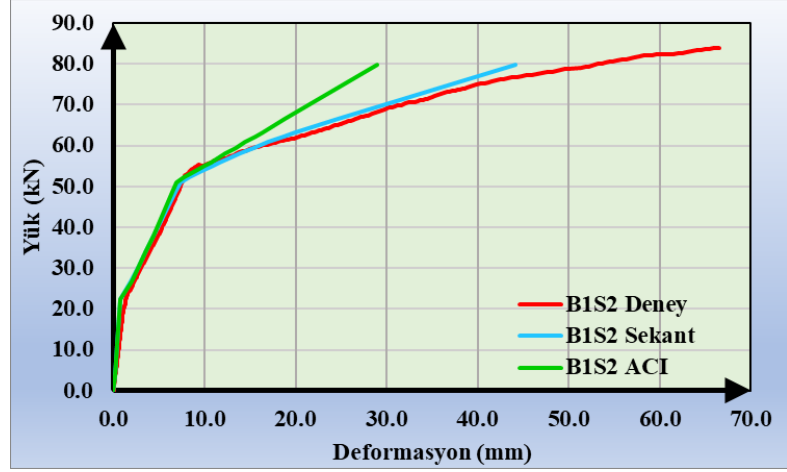
Şekil 5.22. S3 Referans kirişi deneysel ve analitik yük-deplasman eğrileri (a) 1. Grafik, (b) 2. Grafik (c) 3. Grafik yöntemi kullanılarak



(a)

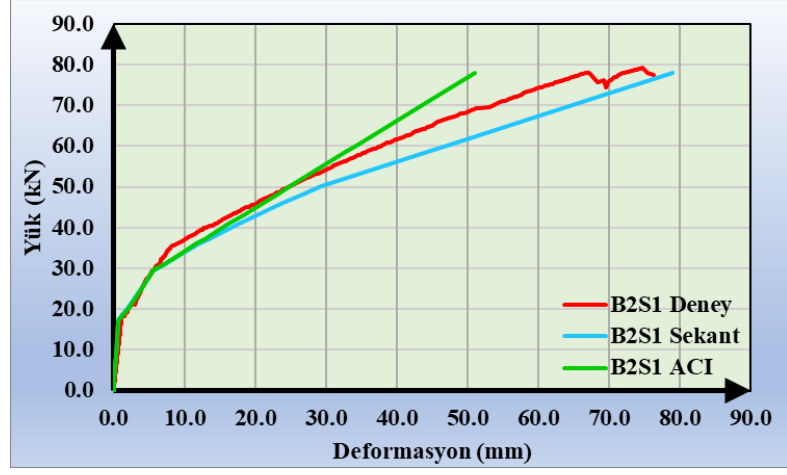


(b)

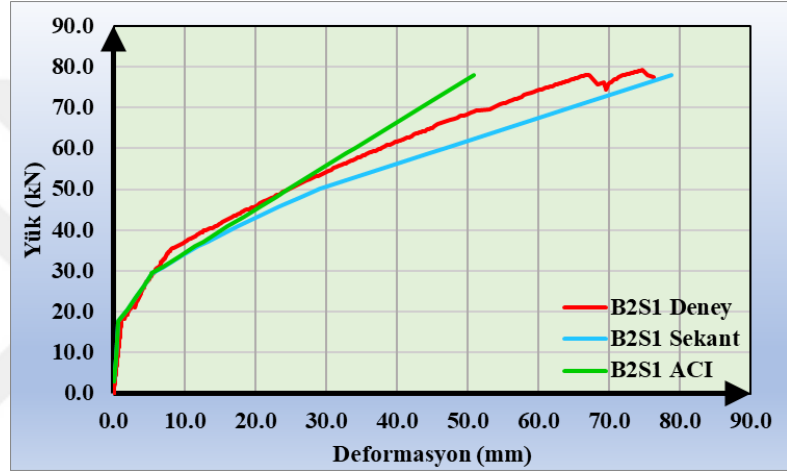


(c)

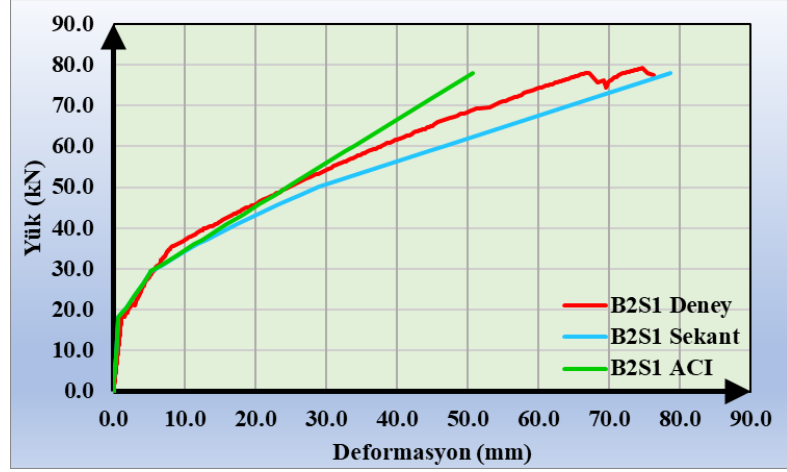
Şekil 5.23. B1S2 kirişi deneysel ve analitik yük-deplasman eğrileri (a) 1. Grafik, (b) 2. Grafik (c) 3. Grafik yöntemi kullanılarak



(a)

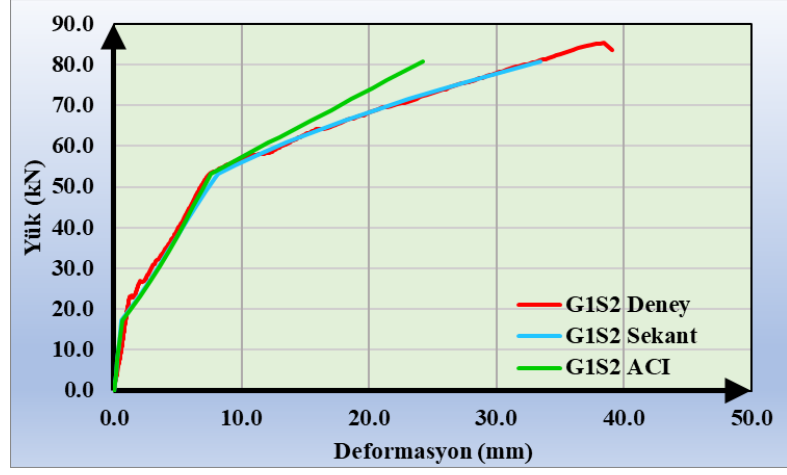


(b)

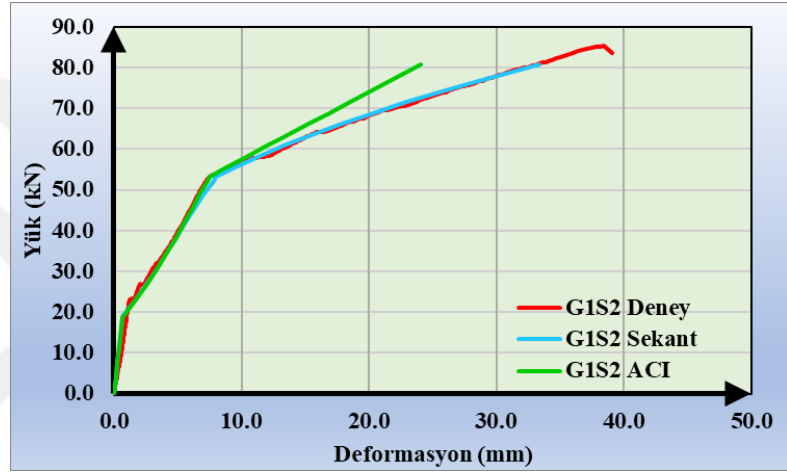


(c)

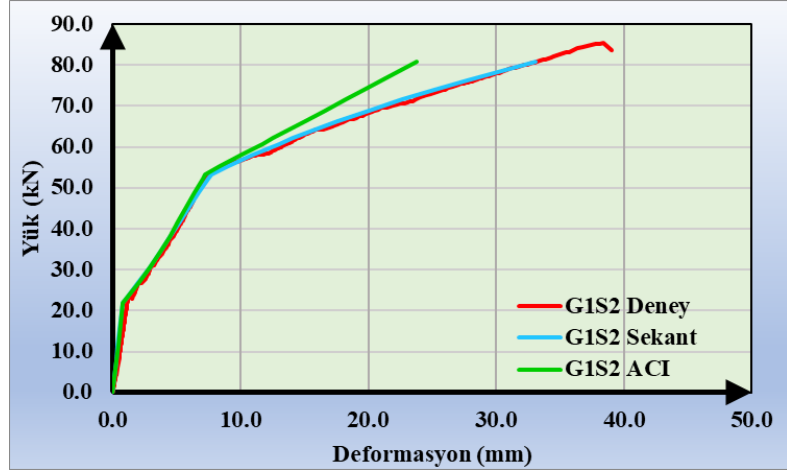
Şekil 5.24. B2S1 kirişi deneysel ve analitik yük-deplasman eğrileri (a) 1. Grafik, (b) 2. Grafik (c) 3. Grafik yöntemi kullanılarak



(a)

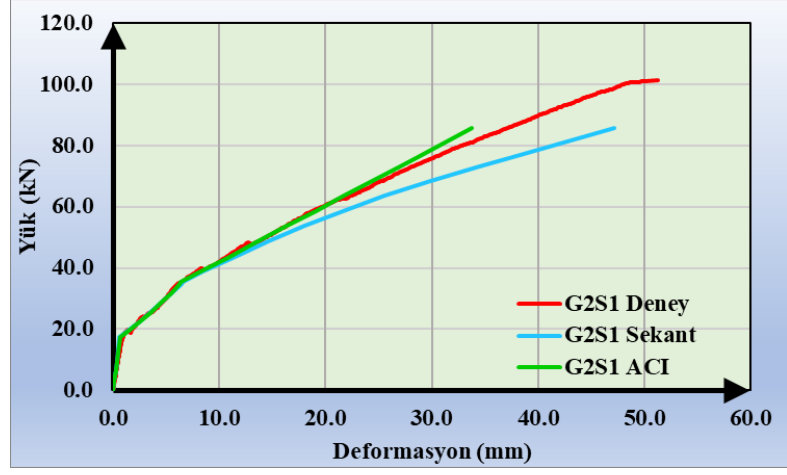


(b)

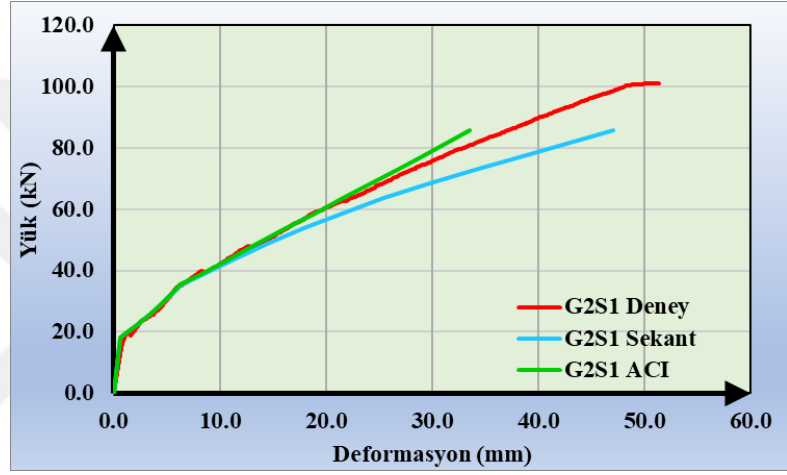


(c)

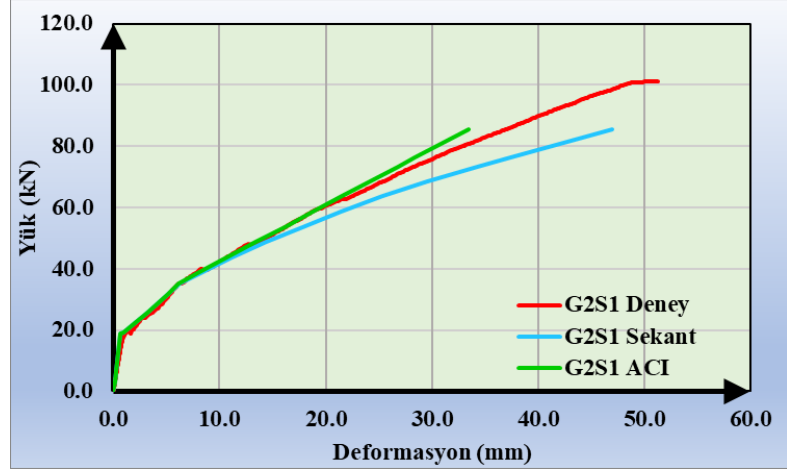
Şekil 5.25. G1S2 kirişi deneysel ve analitik yük-deplasman eğrileri (a) 1. Grafik, (b) 2. Grafik (c) 3. Grafik yöntemi kullanılarak



(a)



(b)



(c)

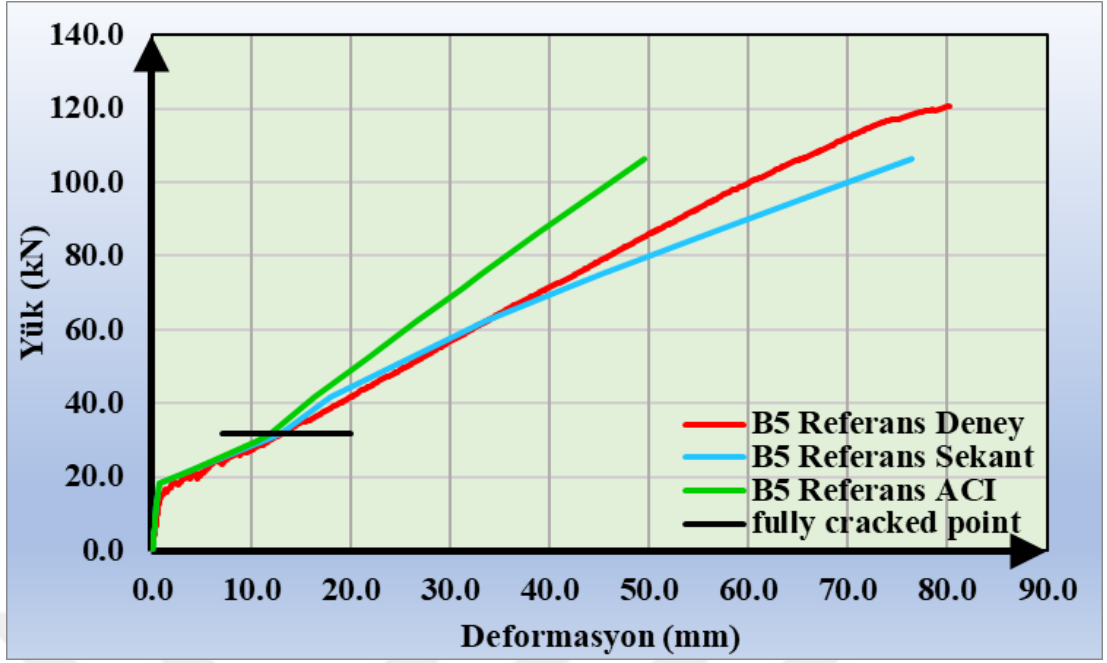
Şekil 5.26. G2S1 kirişi deneysel ve analitik yük-deplasman eğrileri (a) 1. Grafik, (b) 2. Grafik (c) 3. Grafik yöntemi kullanılarak

5.7. Salt FRP Donatılı Kirişlerde Yük Deformasyon Tahminleri (A ve B Yöntemi) ve Deneysel Eğrilerle Karşılaştırılması

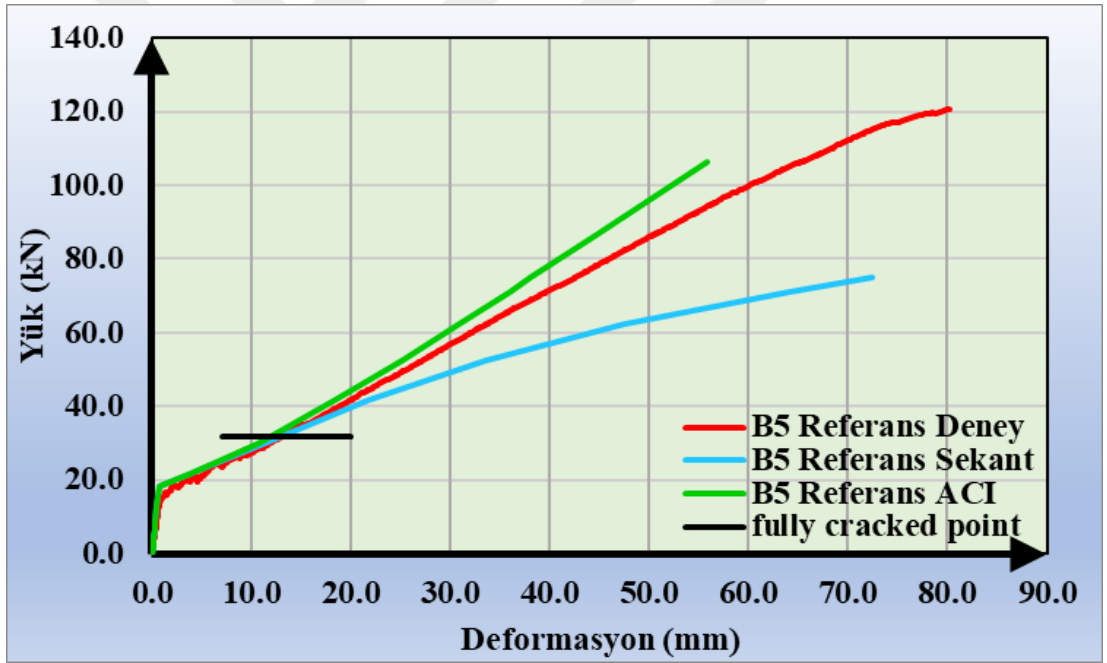
Bu bölümde salt FRP donatılı kirişlerin deformasyon tahminleri iki farklı yöntem (A ve B yöntemi) göre yapılmış ve deneysel veriler ile en yakın uyum içinde olan yöntem önerilmiştir. Her kiriş için her iki yöntemin ve her iki başlangıç atalet momentinin kullanıldığı 2'şer adet grafik oluşturulmuş ve deneysel eğrilerle karşılaştırılmıştır. Hibrit donatılı kirişlerin eğrilerine benzer olarak, her grafikte biri deneysel, diğer ikisi iki farklı elastisite modülünün kullanılmasına dayalı tahminler olmak üzere toplam üçer adet yük-deplasman eğrisine yer verilmiştir. Kirişler için bu grafiklerde yer alan tahminler arasındaki farklar, Çizelge 5.6'da özetlenmiştir. Bu kapsamda, tüm salt FRP donatılı kirişlerin deplasman hesapları gerçekleştirilmiş ve bu analitik değerler deneysel veriler ile karşılaştırılmıştır (Şekil 5.27-5.31). Ancak salt FRP donatılı kirişlerin yük-deplasman hesabında kullanılacak olan iki yöntemden (A ve B yöntemi) hangisinin daha uygun olduğunun belirlenebilmesi için öncelikle kirişin çatlamadan önce sahip olduğu atalet momenti ifadesi sabitlenmiştir. Daha açık bir ifade ile kirişin başlangıçta yalnızca brüt kesit atalet momentine sahip olduğu durum için tahminler yapılarak tahmin yöntemleri arasında karşılaştırma yapılmıştır. Uygun yöntem belirlendikten sonra kesitin başlangıçta çatlamamış dönüştürülmüş kesit atalet momentine sahip olduğu durum için tahminlere de yer verilmiştir.

Çizelge 5.6. Salt FRP donatılı kirişlerin deformasyon tahminini için kullanılan yöntemler

Grafik	İlk Çatlama Yükü	Etkili Atalet Momenti Sınırları (Bischoff)		Elastisite Modülü	Yöntem
		$0-P_{cr}$	$P_{cr}-P_{max,pre}$		
1.	P_{cr2}	I_g	I_g-I_{cr}	ACI 318M-11/ Sekant Modülü	A
2.	P_{cr2}	I_g	I_g-I_{cr}	ACI 318M-11/ Sekant Modülü	B

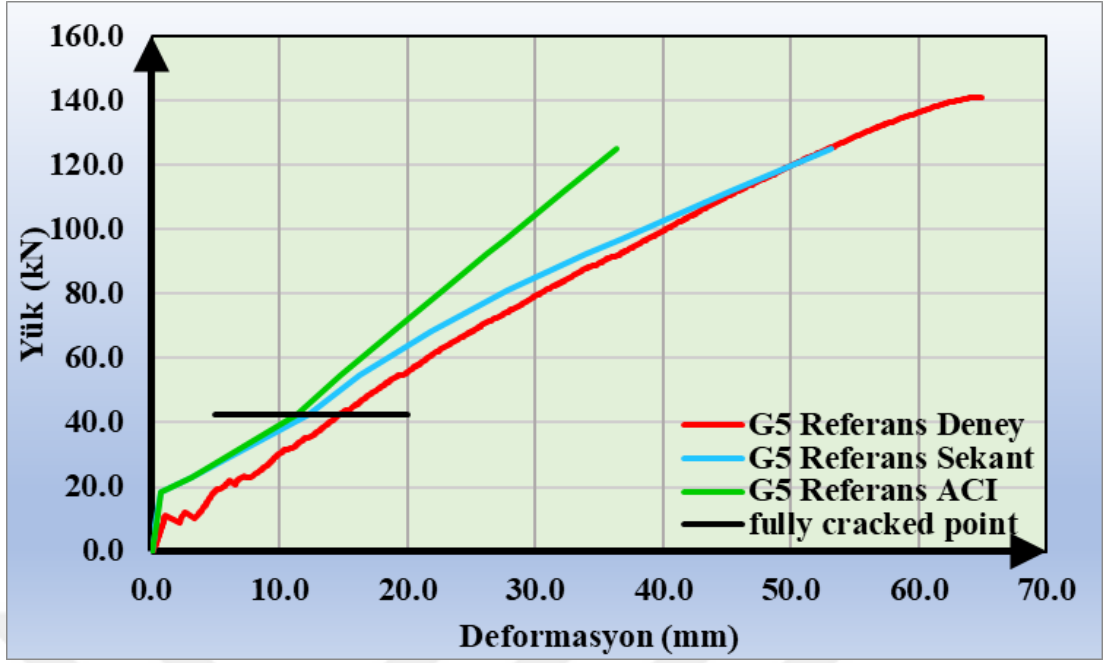


(a)

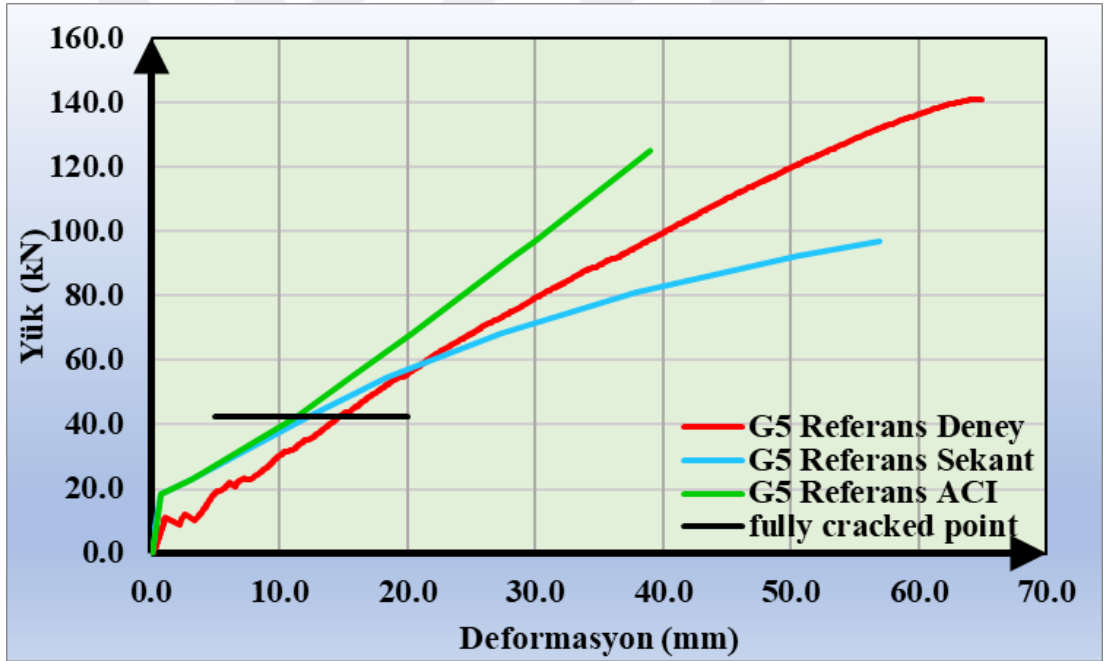


(b)

Şekil 5.27. B5 Referans kirişi (a) 1. Grafik (b) 2. Grafik yöntemine göre çizilen analitik ve deneysel yük-deplasman eğrileri

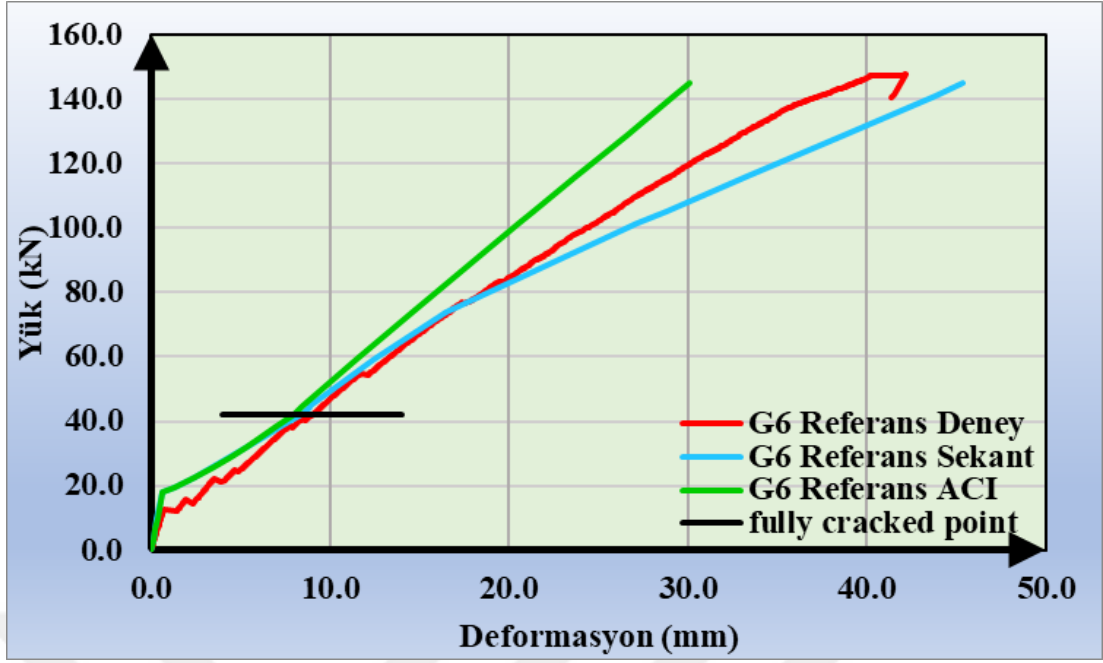


(a)

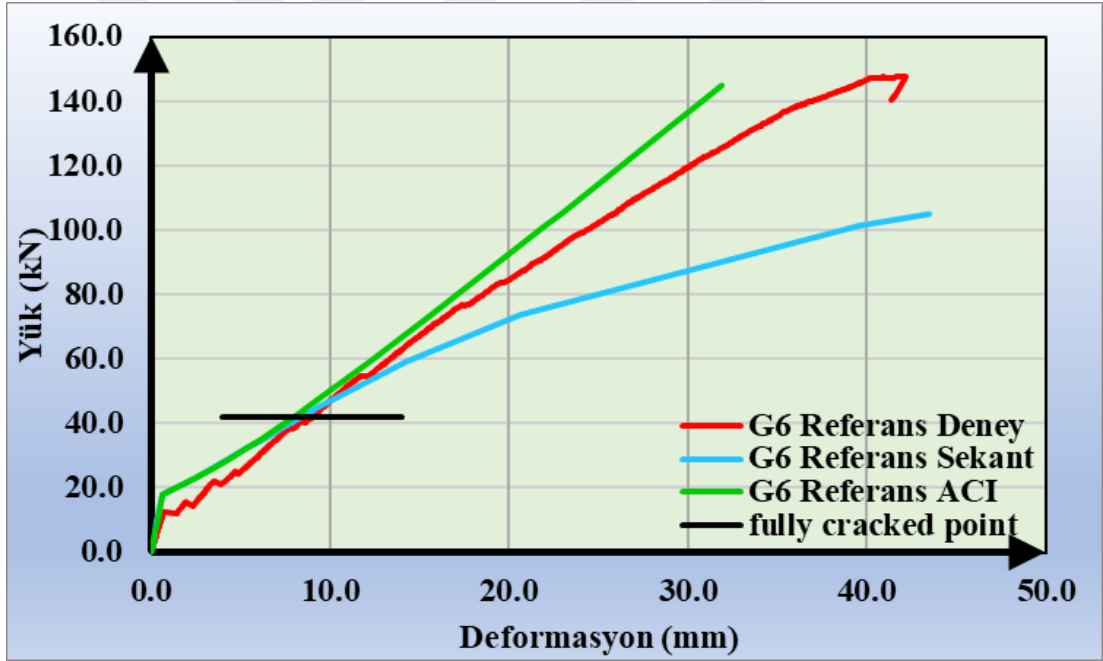


(b)

Şekil 5.28. G5 Referans kirişi (a) A yöntemi (b) B yöntemine göre çizilen analitik ve deneysel yük-deplasman eğrileri

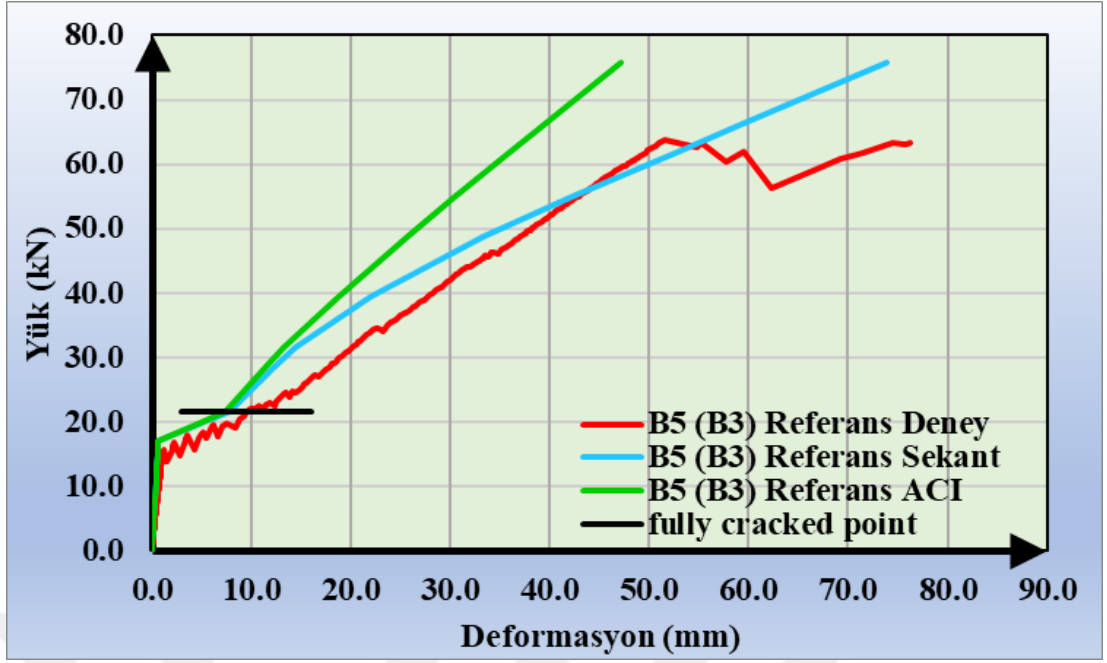


(a)

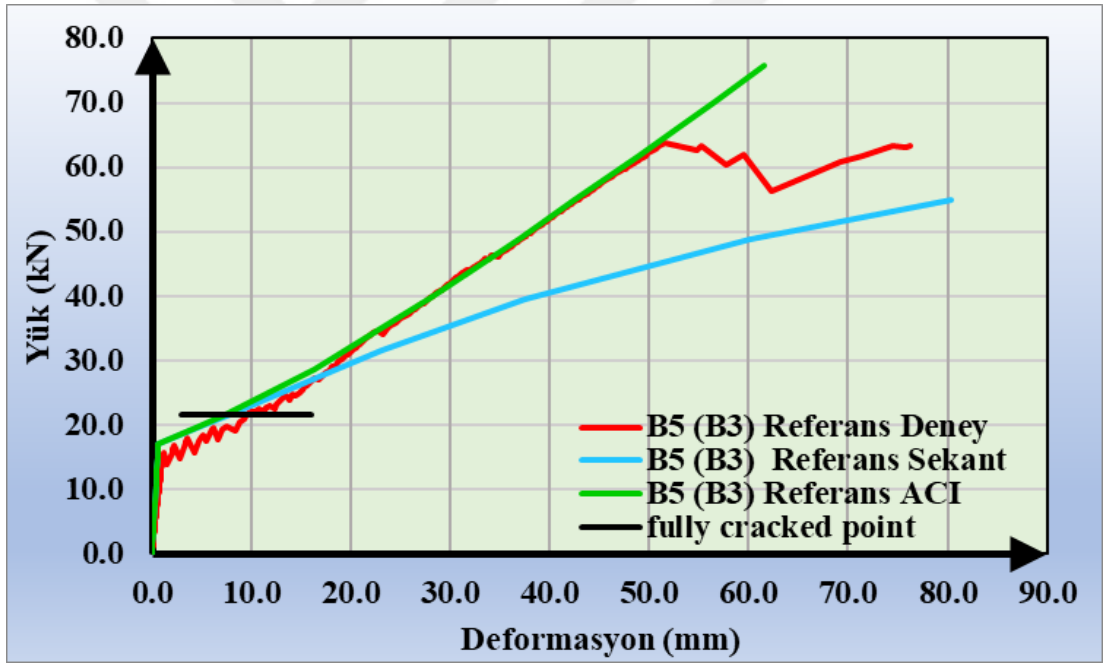


(b)

Şekil 5.29. G6 Referans kirişi (a) A yöntemi (b) B yöntemine göre çizilen analitik ve deneysel yük-deplasman eğrileri

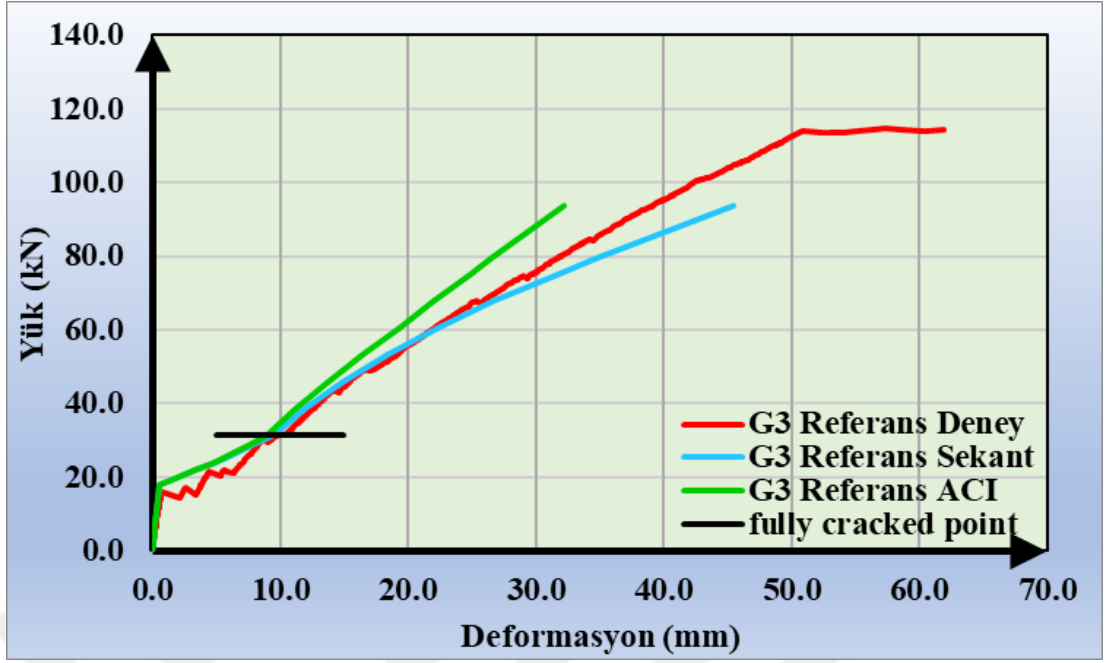


(a)

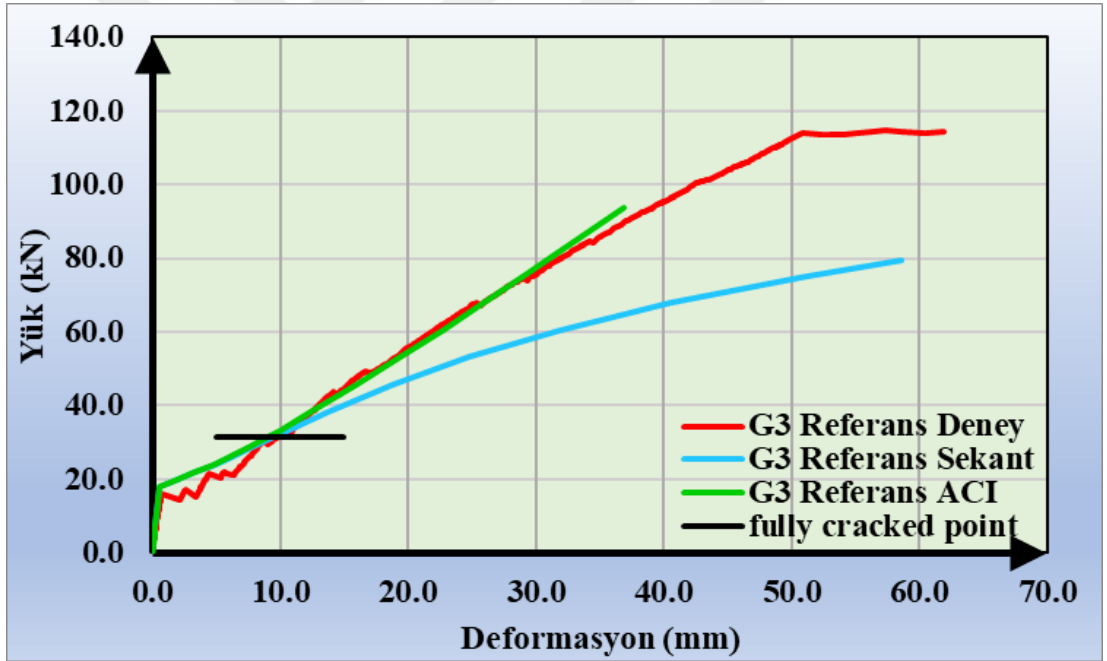


(b)

Şekil 5.30. B5 (B3) Referans kirişi (a) A yöntemi (b) B yöntemine göre çizilen analitik ve deneysel yük-deplasman eğrileri



(a)



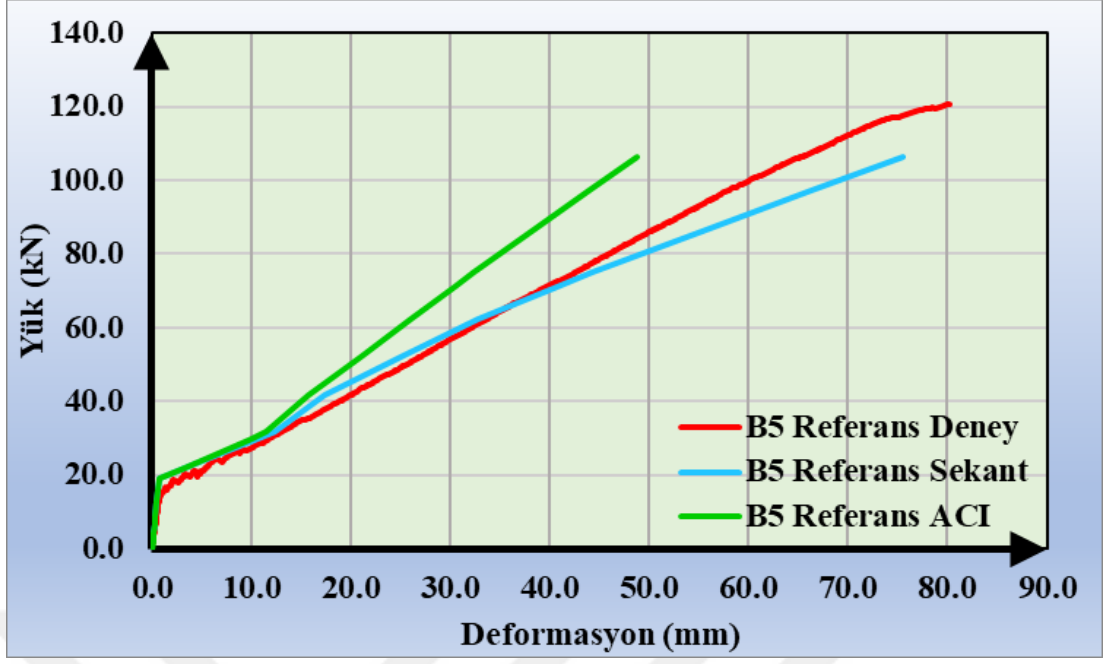
(b)

Şekil 5.31. G3 Referans kirişi (a) A yöntemi (b) B yöntemine göre çizilen analitik ve deneysel yük-deplasman eğrileri

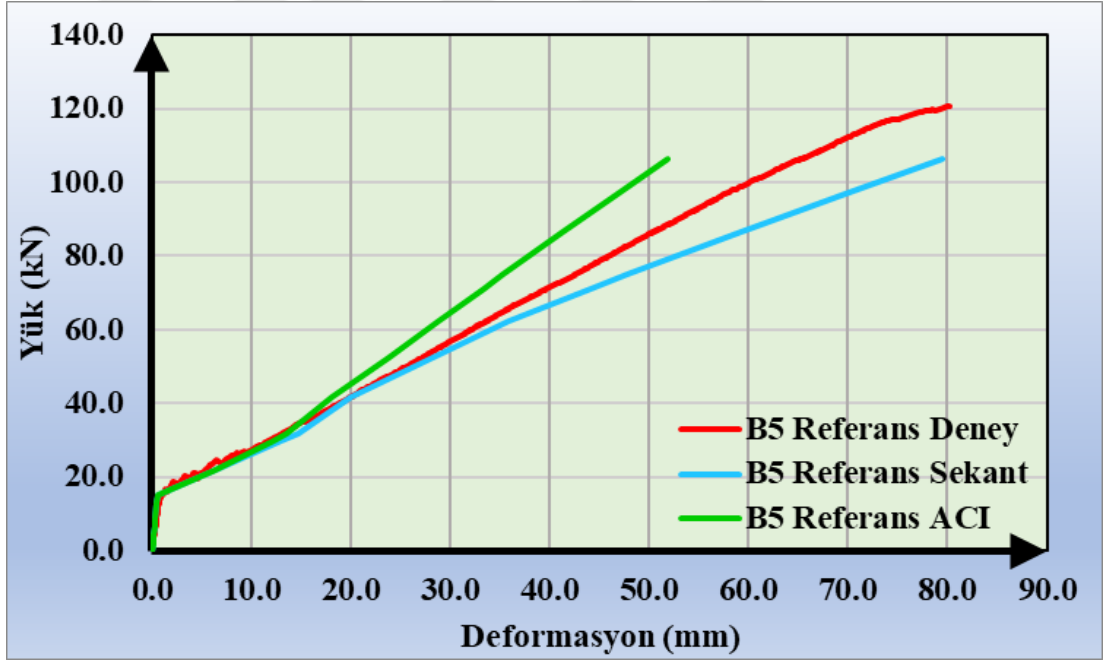
Tahminler neticesinde, salt FRP donatılı kirişlerde A yöntemi ve sekant elastisite modülü kullanılarak gerçekleştirilen tahminlerin daha güvenli ve deneysel eğrilere daha yakın olduğu belirlenmiştir. Bu sebeple çalışmada, salt FRP donatılı kirişler için A yöntemi ve sekant elastisite modülü kullanılarak deplasman tahminlerinin gerçekleştirilmesi önerilmiştir. Ancak şu ana kadar gerçekleştirilen tahminlerde kirişin çatlamadan önce sahip olduğu atalet momenti için brüt kesit atalet momenti ifadesi kullanılmıştı. Bundan sonra ise çatlamamış kesit atalet momenti ve deneysel çatlama yükü kullanılarak analitik eğriler oluşturulmuştur. Salt FRP donatılı kirişlerde A yönteminin kullanılması tavsiye edilmesinden dolayı sadece bu yöntem ile gerçekleştirilen tahminlere yer verilmiştir (Şekil 5.32-5.36).

Grafiklerden, salt FRP donatılı kirişlerde brüt kesit atalet momenti veya çatlamamış dönüştürülmüş kesit atalet momenti kullanılmasının, yük-deplasman eğrisi veya çatlama yükünü önemli derecede etkilemediği görülmüştür. Çünkü FRP donatıların elastisite modülü değerleri (çelik donatılara nispeten) betonun elastisite modülü değerine oldukça yakındır. Ancak eğrilerin deneysel veriler ile uyumunun kiriş ilk çatlama yükü tahminleri ile ilişkisi göz önünde bulundurulduğunda salt FRP donatılı kirişlerde brüt kesit atalet momentinin kullanılması önerilmiştir. (Buna bağlı olarak Çizelge 5.6 1. grafik sütununda yer alan etkili atalet momenti sınır değerlerinin kullanılması önerilmektedir)

Çalışmada ayrıca deneysel çatlama yüklerinin doğru bir biçimde tahmin edilebilmiş olması durumu da irdelenmiştir. Bu amaçla deneysel çatlama yükü doğrudan kullanılarak her kirişe ait yük deformasyon tahminleri (I_g -A yöntemi) de oluşturulmuştur. Özellikle salt GFRP donatılı kirişlerde deneysel eğriler ile tahminler arasındaki uyumsuzluğun kaynağı olarak ilk çatlama yüklerinin deneysel çatlama yükünden oldukça farklı tahmin edilmesi gösterilmiştir.

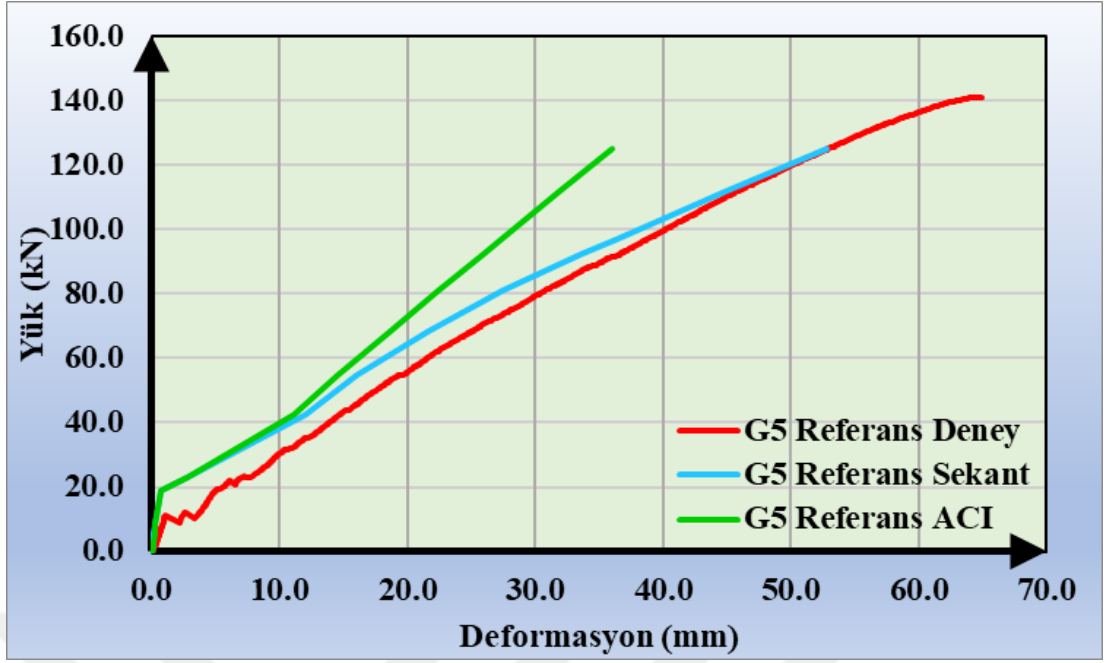


(a)

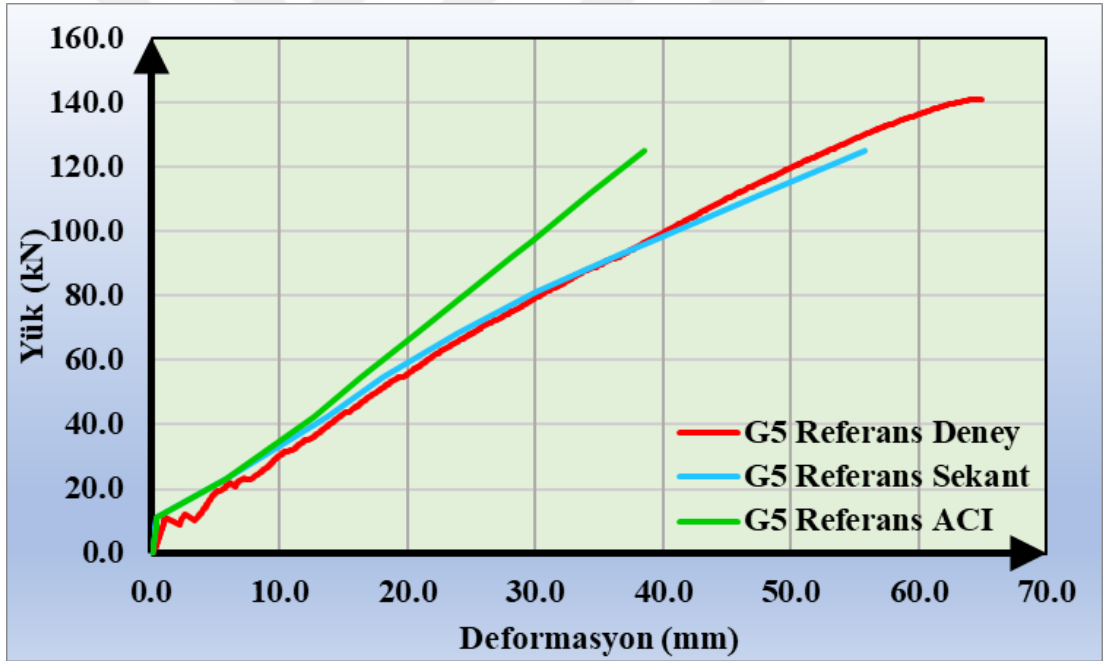


(b)

Şekil 5.32. B5 Referans kirişi analitik ve deneysel yük-deplasman eğrileri (a) (I_{ucr-A} Yöntemi) (b) (I_g-A Yöntemi) (deneysel çatlama yükü)

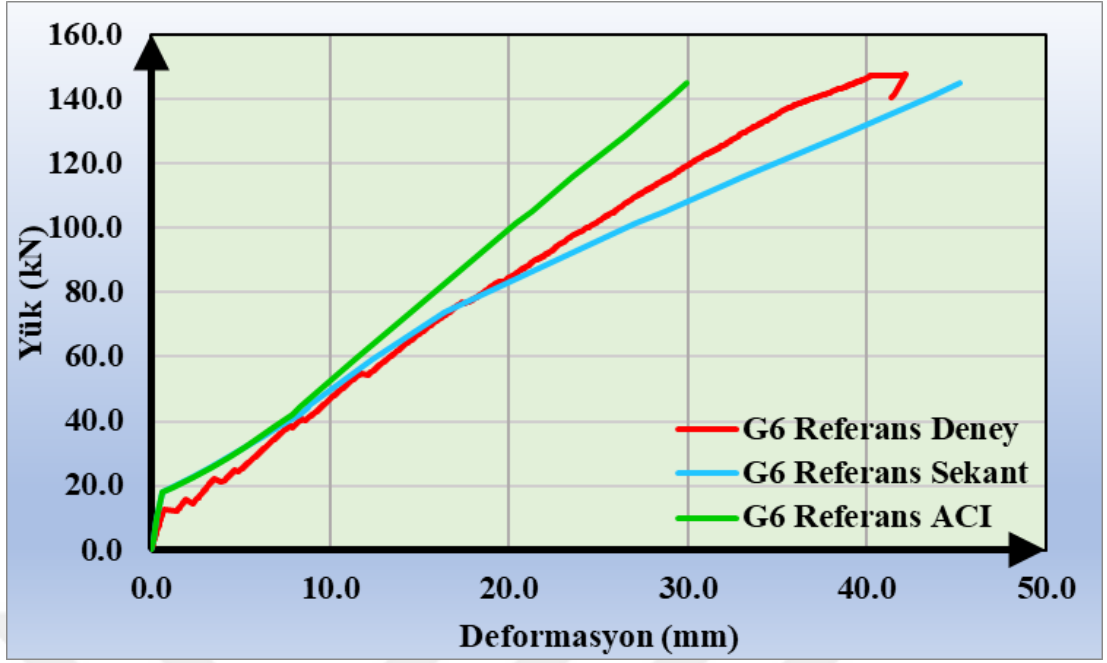


(a)

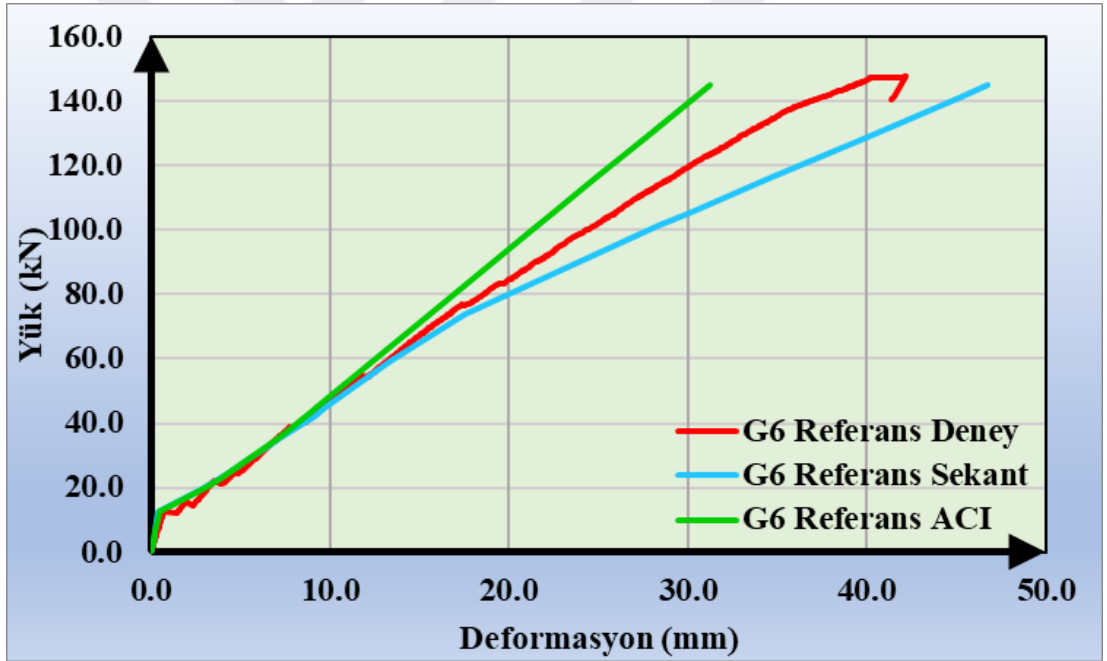


(b)

Şekil 5.33. G5 Referans kirişi analitik ve deneysel yük-deplasman eğrileri (a) (I_{ucr} -A Yöntemi) (b) (I_g -A Yöntemi) (deneysel çatlama yükü)

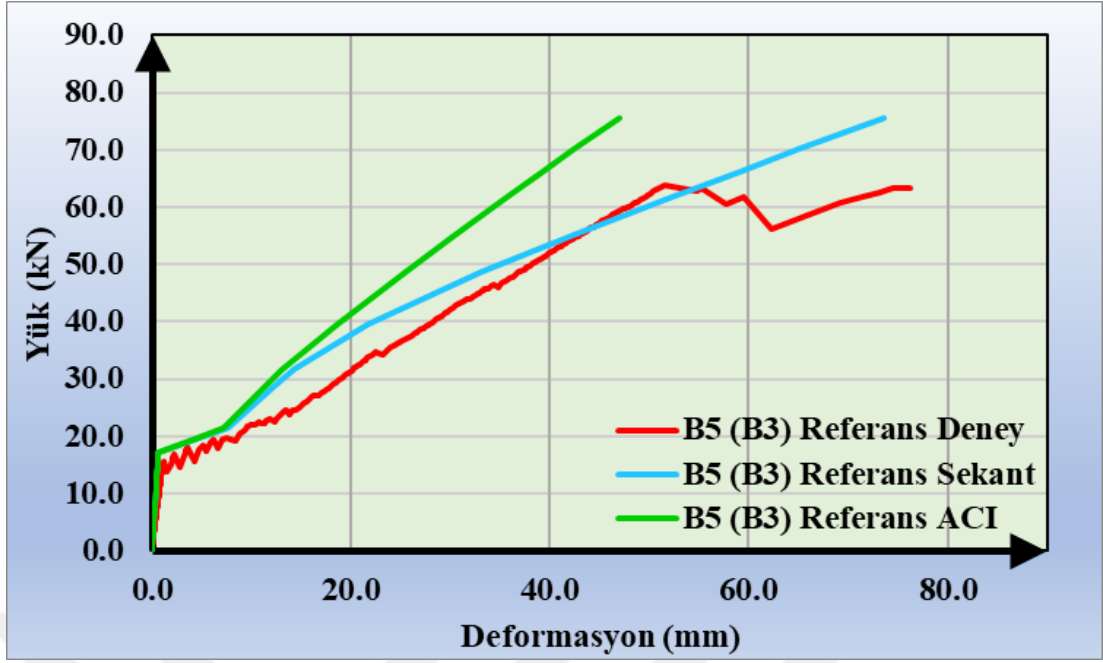


(a)

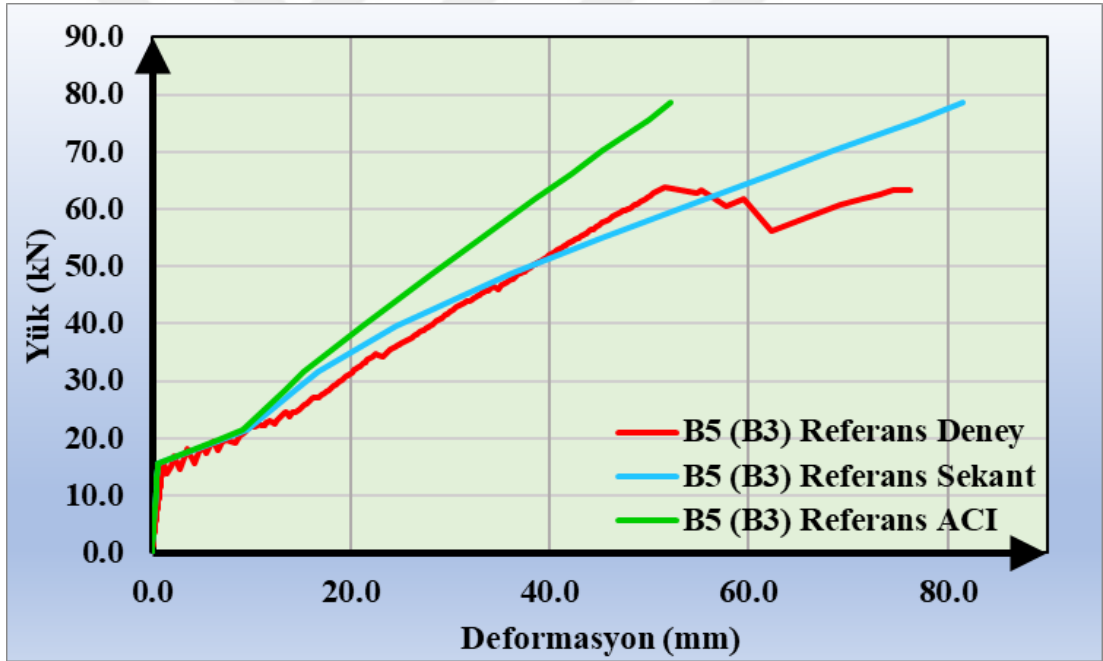


(b)

Şekil 5.34. G6 Referans kirişi analitik ve deneysel yük-deplasman eğrileri (a) (I_{ucr} -A Yöntemi) (b) (I_g -A Yöntemi) (deneysel çatlama yükü)

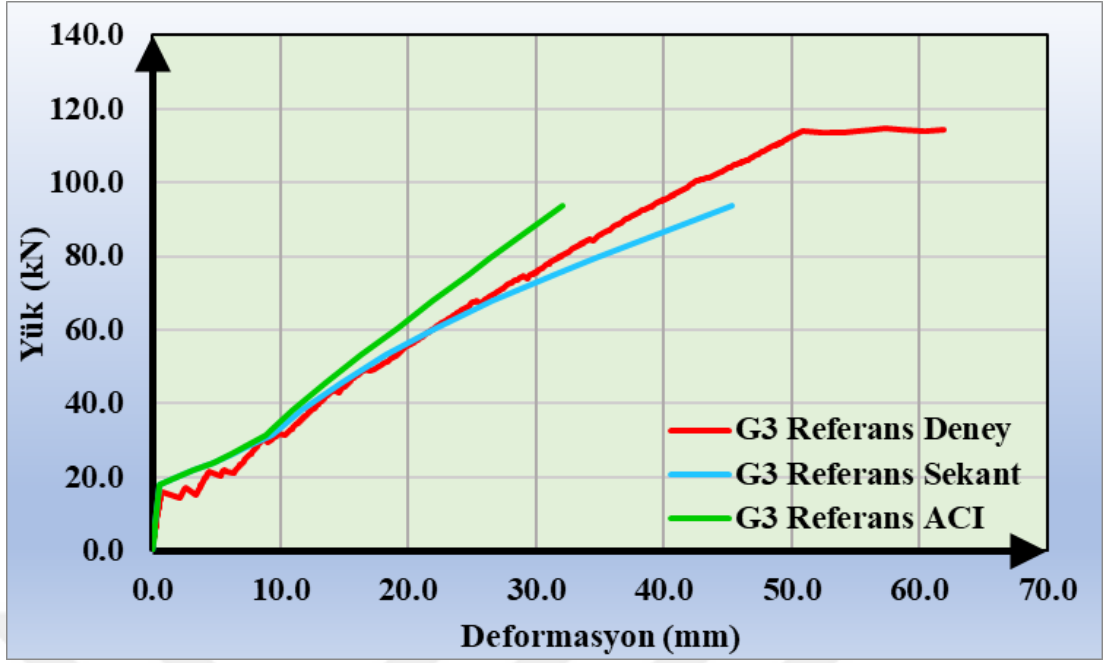


(a)

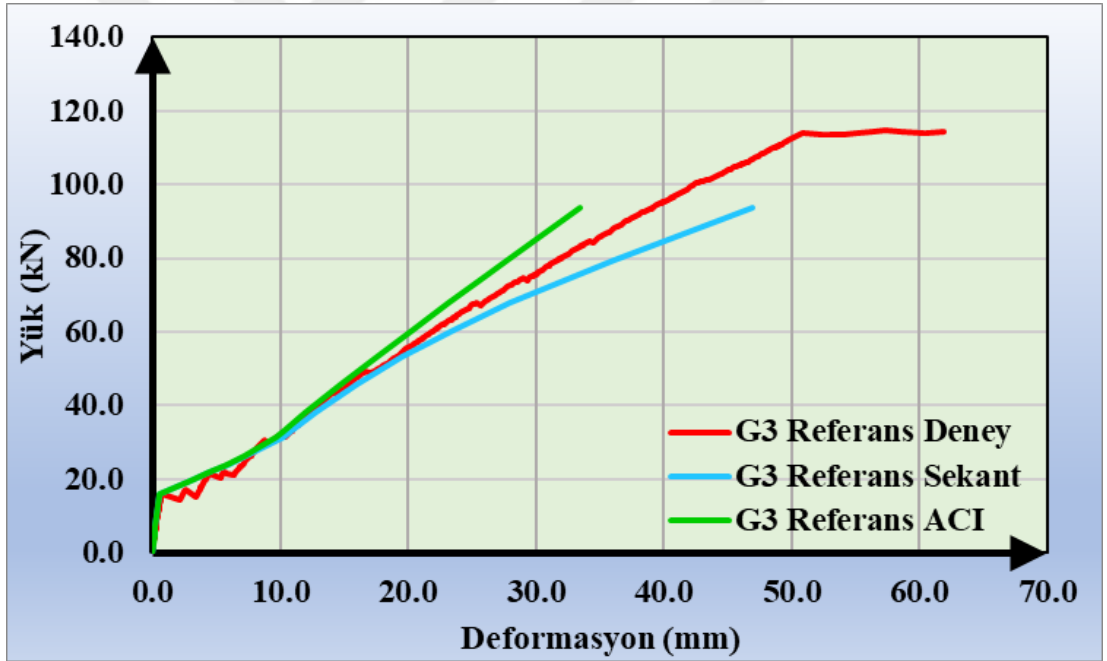


(b)

Şekil 5.35. B5 (B3) Referans kirişi analitik ve deneysel yük-deplasman eğrileri (a) (I_{ucr} -A Yöntemi) (b) (I_g -A Yöntemi) (deneysel çatlama yükü)



(a)



(b)

Şekil 5.36. G3 Referans kirişi analitik ve deneysel yük-deplasman eğrileri (a) (I_{ucr} -A Yöntemi) (b) (I_g -A Yöntemi) (deneysel çatlama yükü)

6. SÜNEKLİK

FRP donatısının akma özelliği göstermeksizin doğrusal gerilme birim deformasyon eğrisine sahip olması ve gevrek bir biçimde kopması sebepleriyle salt FRP donatılı kirişlerde sünekliğin en önemli problem olduğu birçok çalışmanın ortak görüşüdür. FRP donatıların akma özelliği göstermemesi nedeniyle, klasik deformasyon ve eğrilik süneklik tanımları bu kirişlerde uygulanamamaktadır. Hibrit donatılı kirişlerde ise çelik donatılar kiriş taşıma gücüne ulaşmadan önce akmaktadır. Akma anındaki yük ve deformasyon değerleri ise kirişte bulunan çelik/FRP donatı oranına bağlı olarak değişim göstermektedir. Hibrit donatılı kirişlerde toplam donatı içerisindeki FRP donatı oranı arttıkça çelik donatılarda akma daha düşük yük seviyelerinde meydana gelmekte ve kirişlerin şekil değiştirme kapasitesi (deformabilite) artmaktadır. Şekil değiştirme kapasitesindeki bu artış, FRP donatısının elastisite modülü değerlerinin çelik donatılara göre nispeten düşük olmasından kaynaklanmaktadır. Akmanın düşük yük ve deplasman seviyelerinde gerçekleşmesi ve yük-deplasman eğrisinin kuyruk kısmında kirişin maksimum yük seviyesinin %85'ine karşılık gelen noktadaki nihai deplasman değerinin [39] geleneksel çelik kirişlere göre oldukça büyük olması, klasik deformasyon tanımının (Denklemler 6.1) hibrit donatılı betonarme kirişlerde gerçek dışı sonuçlar vermesine sebep olmaktadır. Yani kirişlerde FRP donatı oranı arttıkça deformasyon süneklik değerleri de artış eğilimindedir. Ancak, klasik süneklik tanımı oldukça gevrek bir malzeme olan FRP donatısının oranca fazla bulunduğu kirişlerin daha sünek olduğu sonucunu verdiği için klasik deformasyon süneklik tanımının hibrit FRP/çelik donatılı kirişler için uygun olmadığı düşünülmektedir. Bu tanımın süneklik değil de bir deformabilite tanımı olabileceği düşünülmektedir.

$$\mu = \frac{\delta_u}{\delta_y} \quad (6.1)$$

μ klasik deformasyon süneklik tanımını, δ_y akma deformasyonunu ve δ_u ise maksimum yükün %85'ine düştüğü andaki deformasyonu simgelemektedir. Klasik süneklik tanımına göre üç deney grubunun süneklik değerleri ile kendi deney grubunda yer alan

referans salt çelik donatılı kirişe göre süneklik oranları Çizelge 6.1-6.3 ve Şekil 6.1-6.3'te sunulmuştur.

Çizelge 6.1. Birinci grup kirişler klasik süneklik tanımına göre süneklik oranları

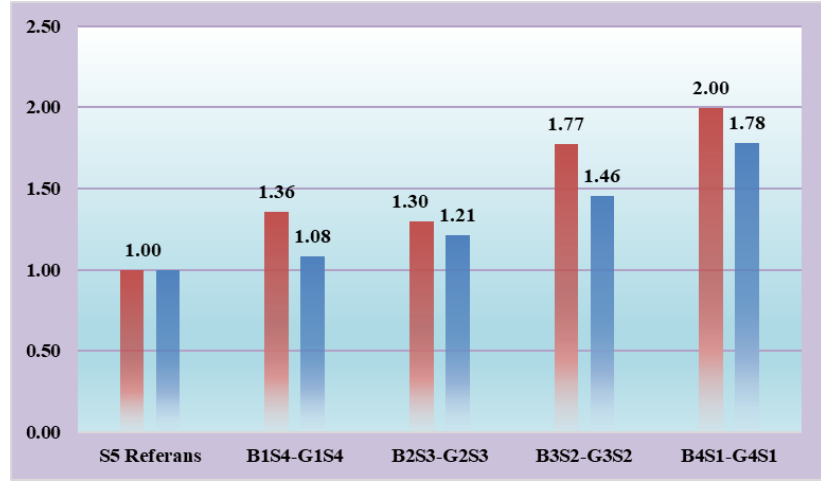
Eleman	δ_y (mm)	δ_u (mm)	μ	μ/μ_{S5} Referans
S5 Referans	10.09	55.40	5.49	1.00
B1S4	10.08	75.11	7.45	1.36
B2S3	9.93	70.67	7.12	1.30
B3S2	8.94	87.01	9.73	1.77
B4S1	7.91	86.72	10.96	2.00
B5 Referans	-	-	-	-
G1S4	9.87	58.73	5.95	1.08
G2S3	9.63	64.00	6.64	1.21
G3S2	8.69	69.46	8.00	1.46
G4S1	7.00	68.28	9.76	1.78
G5 Referans	-	-	-	-

Çizelge 6.2. İkinci grup kirişler klasik süneklik tanımına göre süneklik oranları

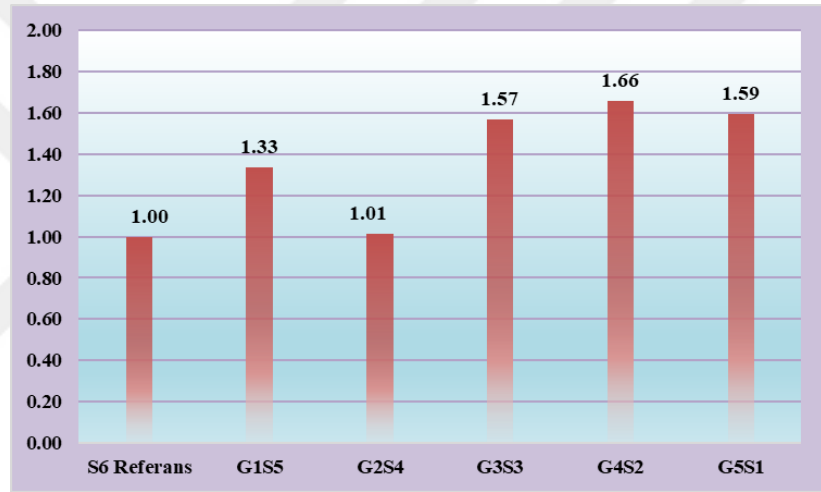
Eleman	δ_y (mm)	δ_u (mm)	μ	μ/μ_{S6} Referans
S6 Referans	10.54	39.51	3.75	1.00
G1S5	10.26	51.30	5.00	1.33
G2S4	10.60	40.17	3.79	1.01
G3S3	9.93	58.45	5.88	1.57
G4S2	7.91	49.23	6.22	1.66
G5S1	8.04	48.02	5.98	1.59
G6 Referans	-	-	-	-

Çizelge 6.3. Üçüncü grup kirişler klasik süneklik tanımına göre süneklik oranları

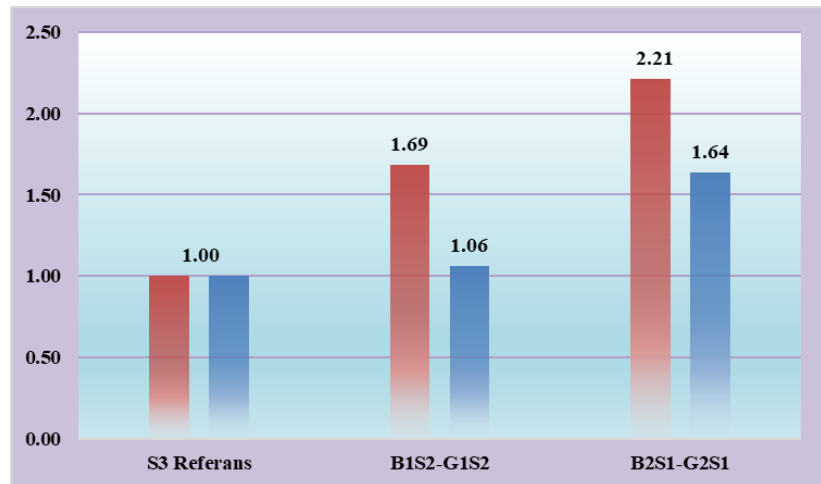
Eleman	δ_y (mm)	δ_u (mm)	μ	μ/μ_{S3} Referans
S3 Referans	9.25	46.66	5.04	1.00
B1S2	8.24	70.11	8.50	1.69
B2S1	6.95	77.45	11.15	2.21
B5 (B3) Referans	-	-	-	-
G1S2	7.67	41.07	5.35	1.06
G2S1	6.73	55.57	8.26	1.64
G3 Referans	-	-	-	-



Şekil 6.1. Birinci grup kirişlerin S5 referans kirişine göre klasik süneklik oranları



Şekil 6.2. İkinci grup kirişlerin S6 referans kirişine göre klasik süneklik oranları



Şekil 6.3. Üçüncü grup kirişlerin S3 referans kirişine göre klasik süneklik oranları

Kirişlere ait klasik deformasyon süneklik değerleri, kendi deney grubunda yer alan her salt çelik donatılı kirişin en düşük süneklik değerine sahip olduğunu ve genel olarak FRP donatı oranının artmasıyla süneklik değerlerinin arttığını göstermektedir. Daha önce belirtildiği gibi bu durum, FRP donatılarının çelik donatılara göre rijitliklerinin daha düşük olması ile açıklanabilmektedir. Salt FRP donatılı kirişlerde ise akma gözlenmemesi nedeniyle bu kirişlerin süneklik değerleri bu tanım ile değerlendirilememiştir.

Çalışmanın bu bölümünde literatürde yer alan farklı süneklik tanımları irdelenerek hibrit FRP-çelik donatılı kirişler için hangi süneklik tanımının kullanılabileceği araştırılmıştır. Bu süneklik tanımlarından başka birçok süneklik tanımı bulunsa da, incelenen tanımlardan bir tanesinin [40] hibrit donatılı betonarme kirişler için uygun olduğunun görülmesi sebebiyle sadece belli başlı tanımlara yer verilmiştir.

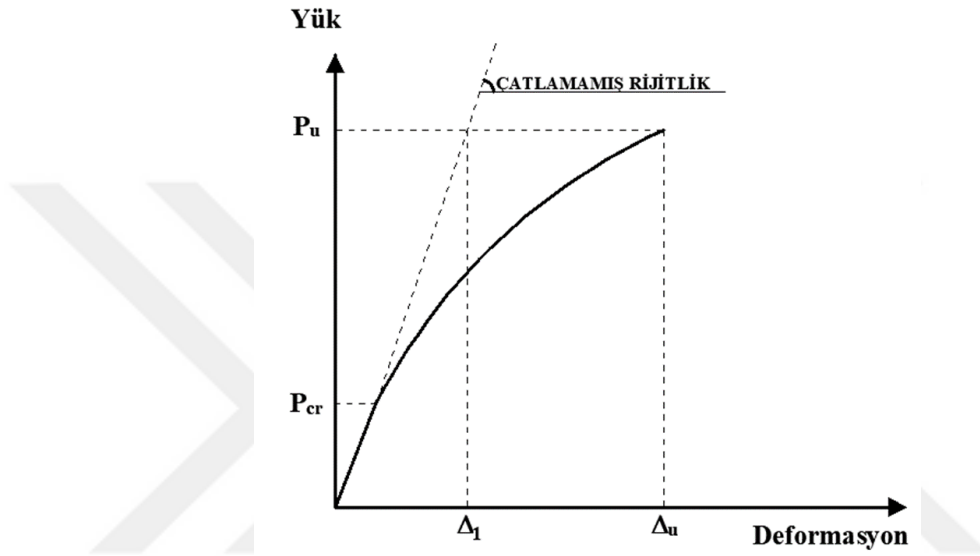
6.1. Abdelrahman ve diğ. [41] Süneklik Tanımı

Abdelrahman ve diğ. [41] FRP tendonlu öngerilmeli T-kesitli köprü kirişleri için yeni bir süneklik tanımı önermiştir. FRP tendonlu kirişlerin akma özelliği göstermemesi ve kopmaya ulaşana dek elastik kaldığı bilindiğinden, FRP tendonlu kirişlerde doğrusal olmayan davranışın betonun çatlaması ile başladığı düşüncesini benimsemişlerdir. Bu doğrultuda sünekliği, nihai yük değerine karşılık gelen çatlamamış kesitin deformasyonuna bağlı olarak Denklem 6.2'deki gibi ifade etmişlerdir. Şekil 6.4'te ise önerilen süneklik yönteminin bir elemana nasıl uygulanacağı gösterilmiştir.

$$A_b = \frac{\Delta_u}{\Delta_1} \quad (6.2)$$

A_b süneklik değerini, Δ_u kirişin nihai deformasyon değerini ve Δ_1 ise kesitin çatlamamış olması durumunda nihai yük değerine karşılık gelecek olan deformasyon değerini ifade etmektedir. Bu tanımda süneklik, bir kiriş çatlamadan taşıma gücüne ulaşması durumu referans alınarak ifade edilmektedir. Bu tanıma göre süneklik elde edilirken, hibrit FRP-çelik ile salt FRP donatılı kirişlerde maksimum yük noktasına karşılık gelen

deformasyon değeri; salt çelik donatılı kirişlerde ise yükün %85'ine düştüğü andaki deformasyon değeri kullanılmaktadır. Bu durum hibrit ve salt FRP donatılı kirişlerin sünekliklerinin, sünek salt çelik donatılı referans elemanlar ile karşılaştırılabilmesine olanak sağlamıştır. Abdelrahman ve diğ. [41] süneklik tanımına göre üç deney grubunun süneklik değerleri ile kendi deney grubunda yer alan referans salt çelik donatılı kirişe göre süneklik oranları Çizelge 6.4-6.6 ve Şekil 6.5-6.7'de sunulmuştur.



Şekil 6.4. Abdelrahman süneklik tanımı

Çizelge 6.4. Birinci grup kirişler için Abdelrahman ve diğ. [41] süneklik oranları

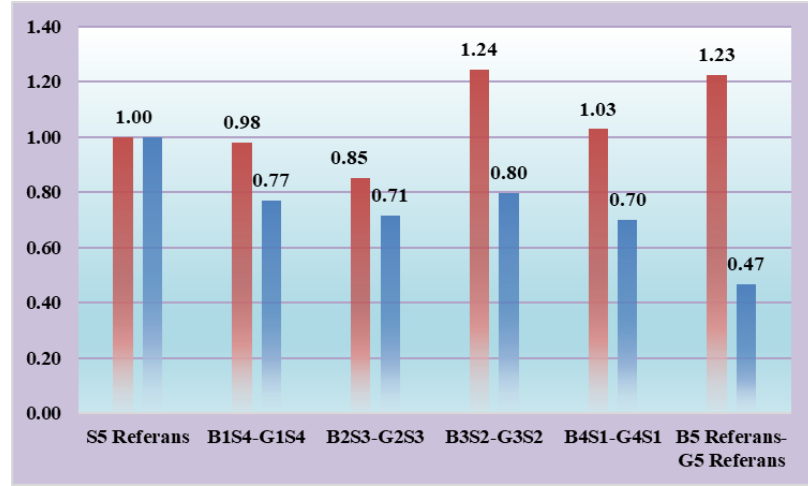
Kiriş	Δ_u (mm)	Δ_l (mm)	A_b	$A_b/A_{b,S5}$ Referans
S5 Referans	55.40	5.50	10.08	1.00
B1S4	67.73	6.85	9.89	0.98
B2S3	66.72	7.78	8.58	0.85
B3S2	82.57	6.59	12.53	1.24
B4S1	81.48	7.86	10.37	1.03
B5 Referans	80.25	6.49	12.36	1.23
G1S4	54.58	7.03	7.76	0.77
G2S3	55.12	7.66	7.20	0.71
G3S2	62.76	7.80	8.05	0.80
G4S1	59.89	8.49	7.05	0.70
G5 Referans	64.89	13.79	4.70	0.47

Çizelge 6.5. İkinci grup kirişler için Abdelrahman ve diğ. [41] süneklik oranları

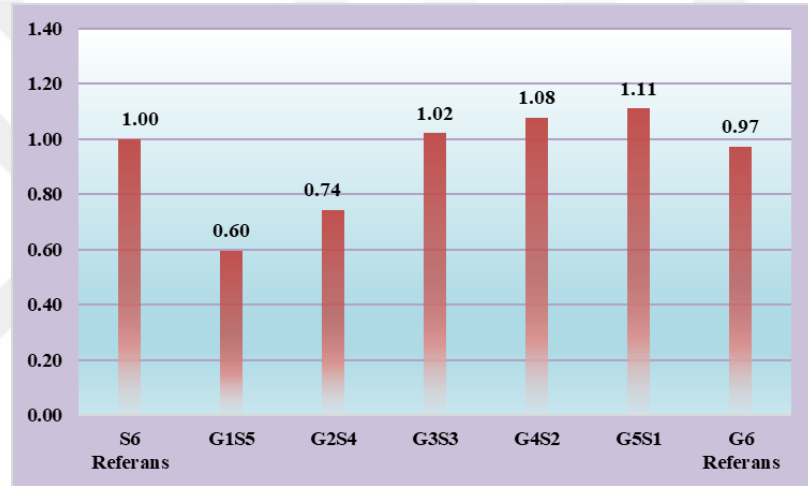
Kiriş	Δ_u (mm)	Δ_l (mm)	A_b	$A_b/A_{b,S6}$ Referans
S6 Referans	39.57	7.39	5.36	1.00
G1S5	23.851	7.47	3.19	0.60
G2S4	29.52	7.42	3.98	0.74
G3S3	42.17	7.71	5.47	1.02
G4S2	43.77	7.59	5.77	1.08
G5S1	45.10	7.58	5.95	1.11
G6 Referans	42.20	8.11	5.20	0.97

Çizelge 6.6. Üçüncü grup kirişler için Abdelrahman ve diğ. [41] süneklik oranları

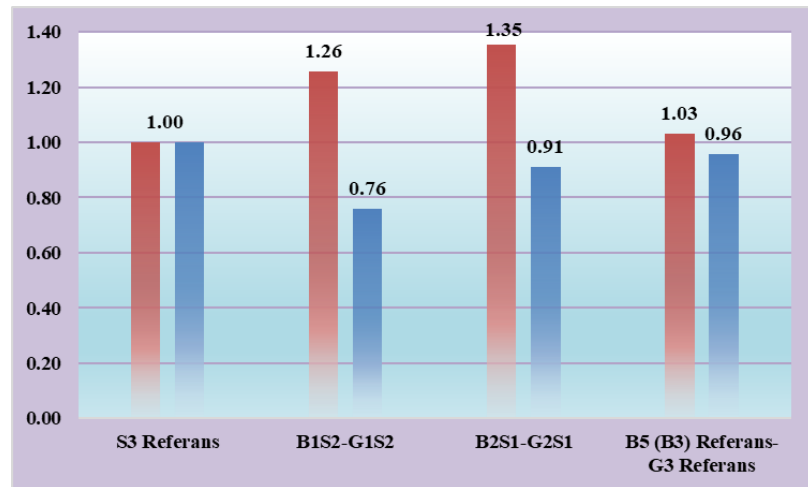
Kiriş	Δ_u (mm)	Δ_l (mm)	A_b	$A_b/A_{b,S3}$ Referans
S3 Referans	46.66	4.11	11.37	1.00
B1S2	65.92	4.62	14.28	1.26
B2S1	74.62	4.86	15.37	1.35
B5 (B3) Referans	51.53	4.39	11.73	1.03
G1S2	38.43	4.44	8.65	0.76
G2S1	51.32	4.96	10.34	0.91
G3 Referans	57.36	5.27	10.88	0.96



Şekil 6.5. Birinci grup kirişlerin S5 Referans kirişine göre Abdelrahman ve diğ. [41] süneklilik oranları



Şekil 6.6. İkinci grup kirişlerin S6 Referans kirişine göre Abdelrahman ve diğ. [41] süneklilik oranları



Şekil 6.7. Üçüncü grup kirişlerin S3 Referans kirişine göre Abdelrahman ve diğ. [41] süneklilik oranları

Abdelrahman ve diğ. [41] süneklik tanımı kullanılarak hibrit FRP-çelik donatılı kirişlerin süneklik değerleri ile toplam donatı içerisinde yer alan FRP donatı oranı ile ilişki kurulamamıştır. Bu sebeple bu süneklik tanımının hibrit donatılı kirişler için uygun olmadığı düşünülmektedir. Ayrıca, bu tanıma göre salt FRP donatılı kirişlerin süneklikleri salt çelik donatılı ilgili referans kirişlere yakın çıkmaktadır. FRP donatının aşırı gevrek malzeme davranışı düşünüldüğünde, böyle bir durumun mümkün olmadığı ve dolayısıyla bu tanımın hibrit donatılı ve salt FRP donatılı elemanlara uygulanamayacağı açıktır.

6.2. Spadea ve diğ. [42] Süneklik Tanımı

Spadea ve diğ. [42] tarafından gerçekleştirilen çalışmada CFRP plakalarla dıştan güçlendirilmiş geleneksel betonarme kirişler, dayanım, deformasyon, eğrilik ve tüketilen enerji ölçütlerine göre incelenmiştir. Bu kirişlerin süneklikleri, klasik deformasyon ve eğrilik süneklik tanımlarına (toplam deformasyon ya da eğriliğin akma anındaki deformasyon ve eğrilığe oranı) göre değerlendirilmesinin yanı sıra klasik süneklik tanımı enerji cinsinden ifade edilerek de kiriş süneklikleri değerlendirilmiştir. Bu tanıma göre süneklik, kirişin toplam tükettiği enerjinin akma anında tükettiği enerjiye oranıdır (Denklem 6.3):

$$S_p = \frac{E_{tot}}{E_y} \quad (6.3)$$

Bu denklemde S_p , E_{tot} , E_y sırasıyla süneklik değerini, kirişin toplam ve akma anına kadar tükettiği enerjiyi ifade etmektedir. Çalışmamızda toplam enerjiler; hibrit donatılı kirişlerde maksimum yük seviyesine kadar tüketilen enerji, salt çelik donatılı kirişlerde ise maksimum yükün %85'ine düşene kadar tüketilen enerji temel alınarak hesaplanmıştır. Bunun nedeni hibrit donatılı kirişlerin, sünek salt çelik donatılı kirişler ile karşılaştırılabilmesini sağlamaktır.

Spadea ve diğ. [42] süneklik tanımına göre, tüm kirişlerin süneklik değerleri ile bu kirişlerin kendi deney grubunda yer alan referans salt çelik donatılı kirişe göre süneklikleri Çizelge 6.7-6.8-6.9 ve Şekil 6.8-6.9-6.10’da sunulmuştur.

Çizelge 6.7. Birinci grup kirişlerin Spadea ve diğ. [42] tanımına göre süneklik değerleri

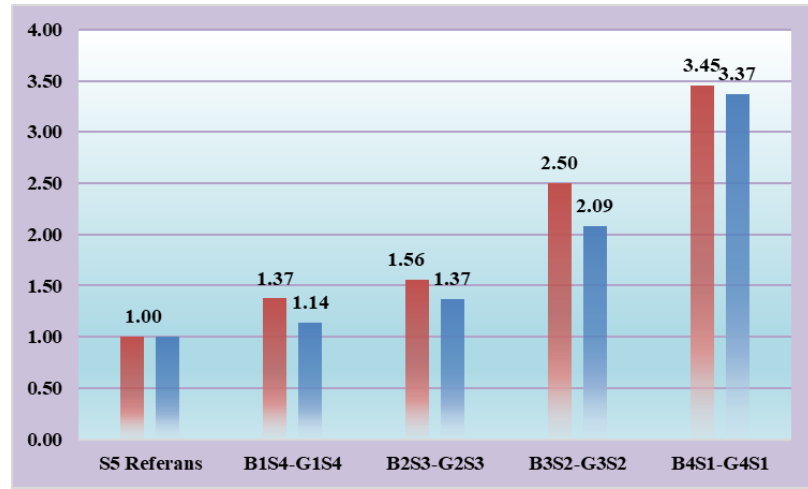
Kiriş	E_{tot} (kJ)	E_y (kJ)	S_p	$S_p/S_{p,S5}$ Referans
S5 Referans	6.10	0.66	9.22	1.00
B1S4	7.07	0.56	12.67	1.37
B2S3	6.23	0.43	14.36	1.56
B3S2	7.22	0.31	23.07	2.50
B4S1	6.59	0.21	31.85	3.45
B5 Referans	5.67	-	-	-
G1S4	5.80	0.55	10.52	1.14
G2S3	5.30	0.42	12.59	1.37
G3S2	5.84	0.30	19.24	2.09
G4S1	4.87	0.16	31.13	3.37
G5 Referans	5.25	-	-	-

Çizelge 6.8. İkinci grup kirişlerin Spadea ve diğ. [42] tanımına göre süneklik değerleri

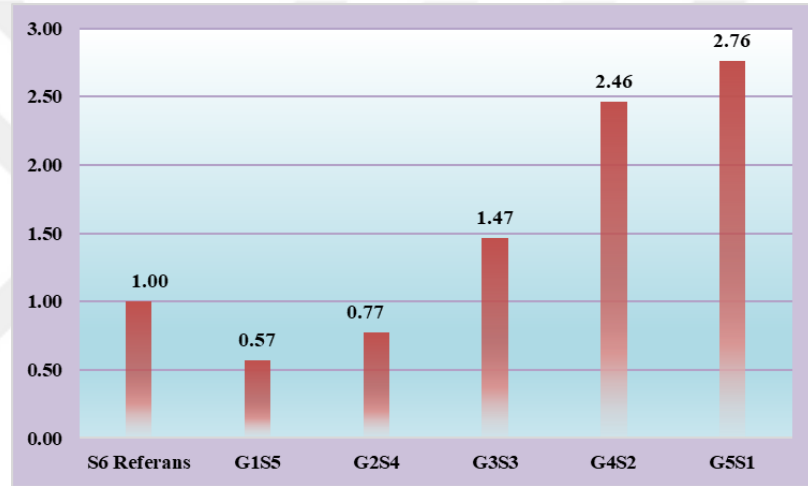
Kiriş	E_{tot} (kJ)	E_y (kJ)	S_p	$S_p/S_{p,S6}$ Referans
S6 Referans	4.92	0.79	6.26	1.00
G1S5	2.46	0.69	3.55	0.57
G2S4	3.07	0.64	4.83	0.77
G3S3	4.69	0.51	9.18	1.47
G4S2	4.56	0.30	15.41	2.46
G5S1	4.34	0.25	17.29	2.76
G6 Referans	3.62	-	-	-

Çizelge 6.9. Üçüncü grup kirişlerin Spadea ve diğ. [42] tanımına göre süneklik değerleri

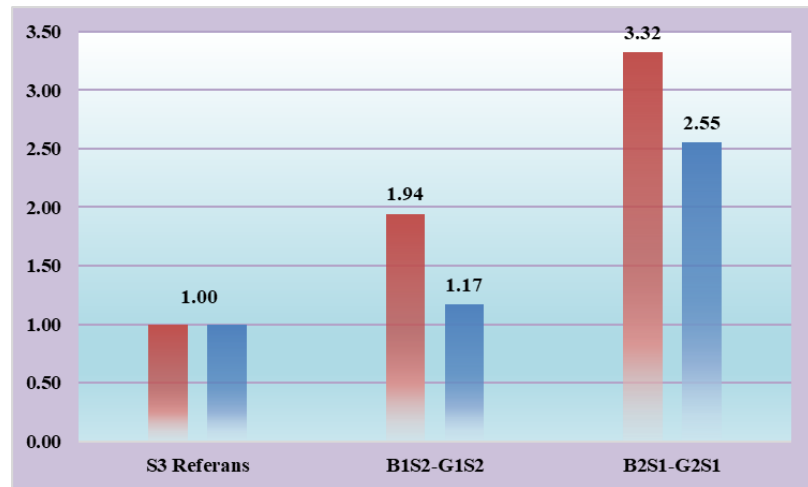
Kiriş	E_{tot} (kJ)	E_y (kJ)	S_p	$S_p/S_{p,S3}$ Referans
S3 Referans	3.47	0.43	8.14	1.00
B1S2	4.41	0.28	15.83	1.94
B2S1	4.25	0.16	27.03	3.32
B5 (B3) Referans	2.17	-	-	-
G1S2	2.43	0.26	9.49	1.17
G2S1	3.41	0.16	20.77	2.55
G3 Referans	3.33	-	-	-



Şekil 6.8. Birinci grup kirişlerin S5 Referans kirişine göre Spadea ve diğ. [42] süneklilik oranları



Şekil 6.9. İkinci grup kirişlerin S6 Referans kirişine göre Spadea ve diğ. [42] süneklilik oranları



Şekil 6.10. Üçüncü grup kirişlerin S3 Referans kirişine göre Spadea ve diğ. [42] süneklilik oranları

Bu yöntemde, hibrit donatılı kirişlerde FRP donatı oranı arttıkça akma daha düşük yük seviyelerinde gerçekleşmekte ve akma anında tüketilen enerji de buna bağlı olarak düşüş eğilimi göstermektedir. Dolayısıyla bu tanımda da FRP donatı oranı arttıkça süneklik değerleri artış göstermektedir. Bu durum, FRP donatı oranı arttıkça kirişlerin süneklik değerlerinin artışının deformabilitenin artışından kaynaklandığını göstermektedir. Bu nedenle, Spadea ve diğ. [42] tanımının hibrit donatılı kirişler için süneklik tanımı olarak değil de deformabilite tanımı olarak daha uygun olacağı düşünülmektedir.

6.3. Tomlinson [43]-Jaeger [44] Süneklik Tanımı

Jaeger [44] FRP donatılı kirişlerin sünekliklerinin (deformabilitesini) aşağıda verilen üç faktör aracılığı ile belirlenmesini önermiştir.

1. *Deformabilite Faktörü = Moment Faktörü x Eğrilik Faktörü*
2. *Moment Faktörü = Nihai Moment / Servis Momenti ($\epsilon_c=0.001$)*
3. *Eğrilik Faktörü = Nihai Eğrilik / Servis Eğriliği ($\epsilon_c=0.001$)*

Bu tanımda, betonun en dış basınç lifi birim deformasyon değerinin 0.001 olduğu an servis durumu olarak kabul edilmiştir. Ayrıca bu tanıma göre sünekliğin değerlendirilebilmesi için deneyler esnasında eğriliğin ölçülmesi gerekmektedir. Ancak, bu çalışmada eğrilik ölçümleri alınmadığı için Jaeger [44] tanımının kullanımı mümkün olmamıştır. Tomlinson [43], Jaeger'in [44] önerdiği tanımı enerji formatına dönüştürerek, BFRP donatılı kirişlerin sünekliklerini Denklem 6.4'e göre hesaplanmıştır:

$$J_e = \frac{E_{tot}}{E_{0.001}} \quad (6.4)$$

Bu denklemde J_e süneklik değerini, E_{tot} ve $E_{0.001}$ sırasıyla toplam ve servis durumunda kirişlerin tükettikleri enerjiyi göstermektedir. Tomlinson'un [43] geliştirdiği süneklik tanımına göre, tüm kirişlerin süneklik değerleri ile bu kirişlerin kendi deney grubunda

yer alan referans salt çelik donatılı kirişe göre süneklik oranları Çizelge 6.10-6.12 ve Şekil 6.11-6.13'te sunulmuştur.

Çizelge 6.10. Birinci grup kirişlerin Tomlinson-Jaeger tanımına göre süneklik değerleri

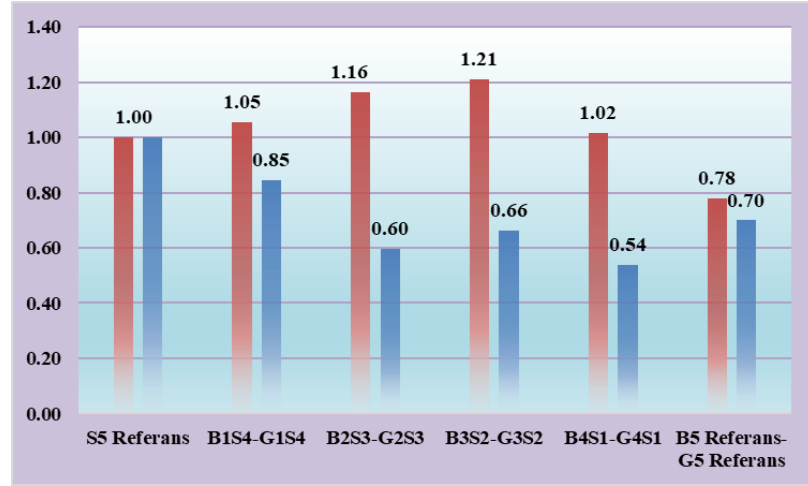
Kiriş	E_{tot} (kJ)	$E_{0.001}$ (kJ)	J_e	J_e/J_{e-S5} Referans
S5 Referans	6.10	0.46	13.18	1.00
B1S4	7.07	0.51	13.89	1.05
B2S3	6.23	0.41	15.34	1.16
B3S2	7.22	0.45	15.97	1.21
B4S1	6.59	0.49	13.40	1.02
B5 Referans	5.67	0.55	10.27	0.78
G1S4	5.80	0.52	11.16	0.85
G2S3	5.30	0.67	7.86	0.60
G3S2	5.84	0.67	8.75	0.66
G4S1	4.87	0.69	7.09	0.54
G5 Referans	5.25	0.57	9.22	0.70

Çizelge 6.11. İkinci grup kirişlerin Tomlinson-Jaeger tanımına göre süneklik değerleri

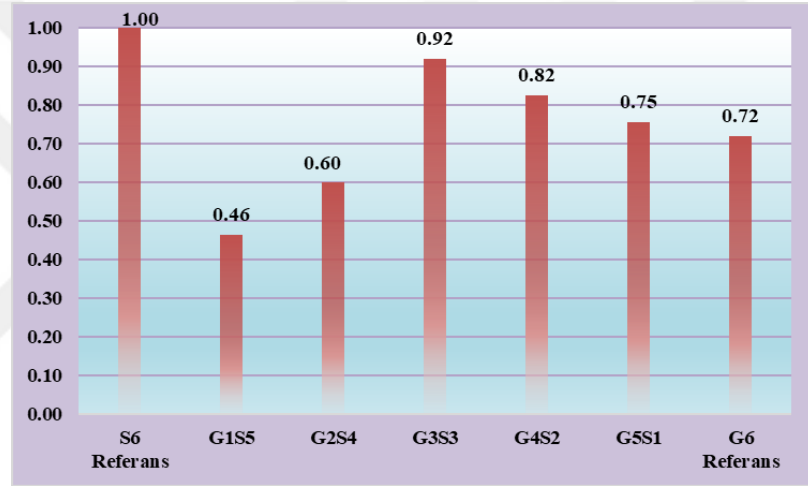
Kiriş	E_{tot} (kJ)	$E_{0.001}$ (kJ)	J_e	J_e/J_{e-S6} Referans
S6 Referans	4.92	0.43	11.54	1.00
G1S5	2.46	0.46	5.34	0.46
G2S4	3.09	0.45	6.91	0.60
G3S3	4.69	0.44	10.61	0.92
G4S2	4.56	0.48	9.52	0.82
G5S1	4.34	0.50	8.71	0.75
G6 Referans	3.62	0.44	8.29	0.72

Çizelge 6.12. Üçüncü grup kirişlerin Tomlinson-Jaeger tanımına göre süneklik değerleri

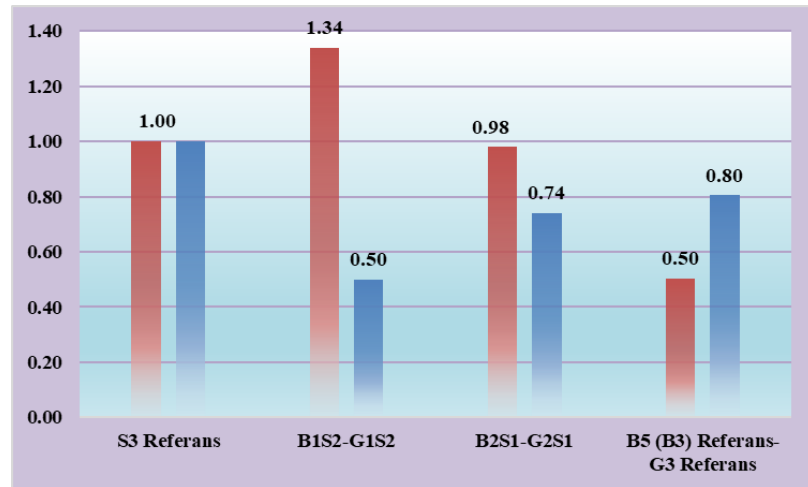
Kiriş	E_{tot} (kJ)	$E_{0.001}$ (kJ)	J_e	J_e/J_{e-S3} Referans
S3 Referans	3.47	0.35	10.00	1.00
B1S2	4.41	0.33	13.39	1.34
B2S1	4.25	0.43	9.79	0.98
B5 (B3) Referans	2.17	0.43	5.03	0.50
G1S2	2.43	0.49	4.99	0.50
G2S1	3.41	0.46	7.38	0.74
G3 Referans	3.33	0.41	8.04	0.80



Şekil 6.11. Birinci grup kirişlerin S5 Referans kirişine göre Jaeger (Tomlinson) süneklilik oranları



Şekil 6.12. İkinci grup kirişlerin S6 Referans kirişine göre Jaeger (Tomlinson) süneklilik oranları



Şekil 6.13. Üçüncü grup kirişlerin S3 Referans kirişine göre Jaeger (Tomlinson) süneklilik oranları

Toplam donatı içerisindeki FRP donatı oranları ile süneklik değerleri arasında doğrudan bir ilişki kurulamaması nedeni ile bu süneklik tanımının da hibrit donatılı kirişler için uygun olmadığı görülmüştür. Bir diğer değişle, artan FRP donatı oranı ile hibrit donatılı kiriş sünekliğinin azalması beklenirken, birçok deney elemanı grubunda tersi bir eğilim görülmüştür.

6.4. Vijay ve GangaRao [45] Süneklik Tanımı

Vijay and GangaRao [45] GFRP donatılı elemanların eğilme davranışları üzerine gerçekleştirdikleri çalışmada kiriş sünekliklerini farklı bir tanıma göre değerlendirmiştir. Bu tanıma göre süneklik, kirişlerin toplam tükettikleri enerjinin kullanım sınır durumuna kadar tüketilen enerjiye oranıdır. Servis sınır durumu için ise, net kiriş açıklığının 180’de 1’ine ($L/180$) karşılık gelen deformasyon değeri kullanılmıştır. Bu tanıma göre, Denklem 6.5 kullanılarak süneklik değerleri elde edilmiştir.

$$VG = \frac{E_{tot}}{E_{s-(L/180)}} \quad (6.5)$$

Denklem 6.5’te yer alan VG ve $E_{s-(L/180)}$ sırasıyla süneklik değerini ve kullanım sınırları içinde kirişin tükettiği enerjiyi göstermektedir. Vijay ve GangaRao’nun [45] geliştirdiği süneklik tanımına göre, tüm kirişlerin süneklik değerleri ile bu kirişlerin kendi deney grubunda yer alan referans salt çelik donatılı kirişe göre süneklik oranları Çizelge 6.13-6.15 ve Şekil 6.14-6.16’da sunulmuştur.

Çizelge 6.13. Birinci grup kirişlerin Vijay-GangaRao [45] tanımına göre süneklikleri

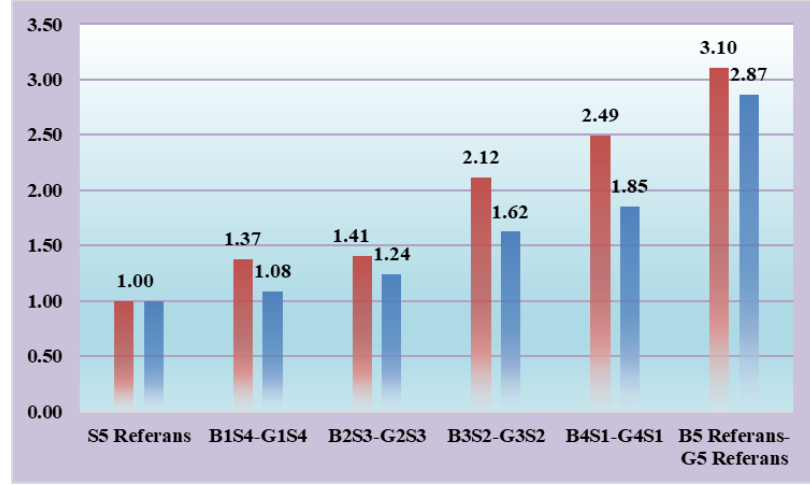
Kiriş	E_{tot} (kJ)	$E_{s-(L/180)}$ (kJ)	VG	VG/VG _{S5 Referans}
S5 Referans	6.10	1.29	4.74	1.00
B1S4	7.07	1.09	6.51	1.37
B2S3	6.23	0.93	6.68	1.41
B3S2	7.22	0.72	10.05	2.12
B4S1	6.59	0.56	11.83	2.49
B5 Referans	5.67	0.38	14.72	3.10
G1S4	5.80	1.13	5.14	1.08
G2S3	5.30	0.90	5.87	1.24
G3S2	5.84	0.76	7.70	1.62
G4S1	4.87	0.56	8.77	1.85
G5 Referans	5.25	0.39	13.60	2.87

Çizelge 6.14. İkinci grup kirişlerin Vijay-GangaRao [45] tanımına göre süneklikleri

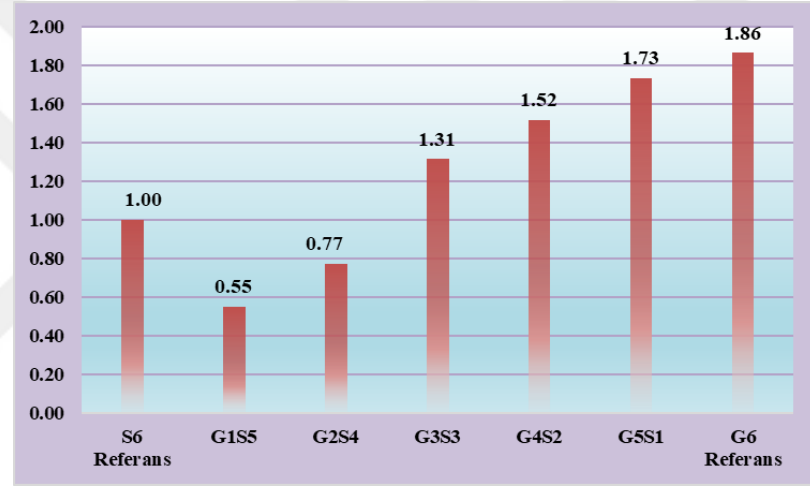
Kiriş	E_{tot} (kJ)	$E_{s-(L/180)}$ (kJ)	VG	VG/VG _{S6 Referans}
S6 Referans	4.92	1.49	3.30	1.00
G1S5	2.46	1.36	1.80	0.55
G2S4	3.09	1.21	2.54	0.77
G3S3	4.69	1.08	4.34	1.31
G4S2	4.56	0.91	5.01	1.52
G5S1	4.34	0.76	5.72	1.73
G6 Referans	3.62	0.59	6.15	1.86

Çizelge 6.15. Üçüncü grup kirişlerin Vijay-GangaRao [45] tanımına göre süneklikleri

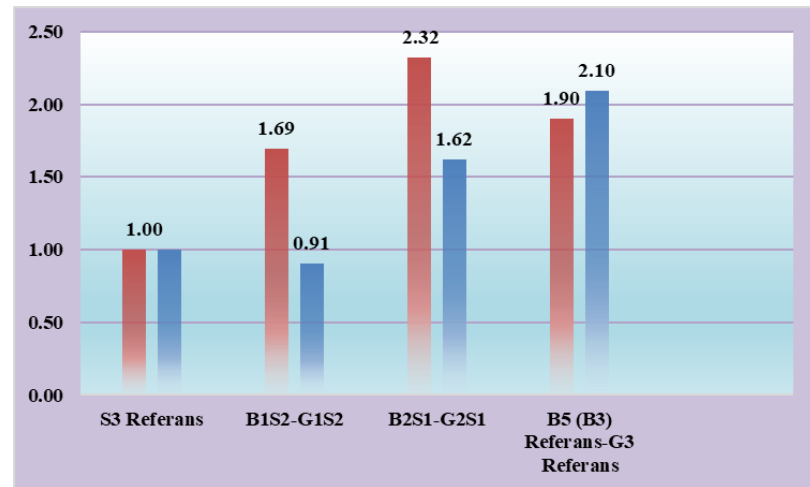
Kiriş	E_{tot} (kJ)	$E_{s-(L/180)}$ (kJ)	VG	VG/VG _{S3 Referans}
S3 Referans	3.47	0.93	3.74	1.00
B1S2	4.41	0.69	6.34	1.69
B2S1	4.25	0.49	8.68	2.32
B5 (B3) Referans	2.17	0.30	7.12	1.90
G1S2	2.43	0.72	3.39	0.91
G2S1	3.41	0.56	6.06	1.62
G3 Referans	3.33	0.42	7.85	2.10



Şekil 6.14. Birinci grup kirişlerin S5 Referans kirişine göre Vijay-GangaRao [45] süneklik oranları



Şekil 6.15. İkinci grup kirişlerin S6 Referans kirişine göre Vijay-GangaRao [45] süneklik oranları



Şekil 6.16. Üçüncü grup kirişlerin S3 Referans kirişine göre Vijay-GangaRao [45] süneklik oranları

Birinci deney grubunda yer alan kirişler içinde salt çelik donatılı S5 referans kirişinin süneklik değeri en düşük olup, FRP donatı oranı arttıkça kiriş süneklikleri bu tanıma göre artış göstermektedir. İkinci deney grubunda ise birinci gruptakine benzer bir değişim vardır, ancak G1S5 ve G2S4 kirişlerin süneklik değerleri S6 Referans kirişinden daha düşüktür. Bu iki kirişe ait deney videoları ve yük-sehim eğrileri incelendiğinde, kirişler maksimum yüke ulaştığı anda betonda ani olmayan bir ezilmenin başladığı ve kirişin düşük deformasyon değerlerinde kapasiteye ulaşmış olup, bu noktadan sonra yükte düşüş ortaya çıktığı gözlemlenmiştir. Ancak kirişler, beton tam anlamıyla ezilene dek deformasyon yapmaya devam etmiştir. Teorik olarak toplam tüketilen enerji için maksimum yük seviyesi sınırı kullanıldığından bu iki kirişin toplam tükettikleri enerji diğer kirişlere göre oldukça azdır. Bahsedilen sebeplerle bu iki kirişin süneklik değerleri S6 Referans kirişinden daha düşük olarak hesaplanmaktadır. Üçüncü deney grubunda da genel olarak FRP donatı oranı arttıkça kiriş süneklik değerleri artış gösterme eğilimindedir. Netice olarak, bu süneklik tanımının da hibrit donatılı betonarme kirişler için uygun olmadığı görülmüştür.

6.5. Zou [46] Süneklik Tanımı

Zou [46] çelik ya da FRP tendonlu kirişler için geliştirdiği yeni bir ifade ile kirişlerin sünekliklerini ve şekil değiştirme kapasitelerini (deformabilite) değerlendirmiştir. Beton dayanımının da süneklik değerini etkilediği bu yeni ifade Denklem 6.6'te verilmiştir:

$$Z = \left(\frac{\Delta_u}{\Delta_{cr}} \right) \left(\frac{M_u}{M_{cr}} \right) \quad (6.6)$$

Z süneklik değerini, Δ_{cr} ilk çatlama deformasyonunu ve M_{cr} ilk çatlama momentini ifade etmektedir. Δ_u ve M_u ise nihai deformasyon ve nihai momentini ifade etmektedir. Zou [46] süneklik tanımına göre, tüm kirişlerin mutlak süneklik değerleri ile bu kirişlerin kendi deney grubunda yer alan referans salt çelik donatılı kirişe göre süneklik oranları Çizelge 6.16-6.18 ve Şekil 6.17-6.19'da sunulmuştur.

Çizelge 6.16. Birinci grup kirişlerin Zou [46] tanımına göre süneklik değerleri

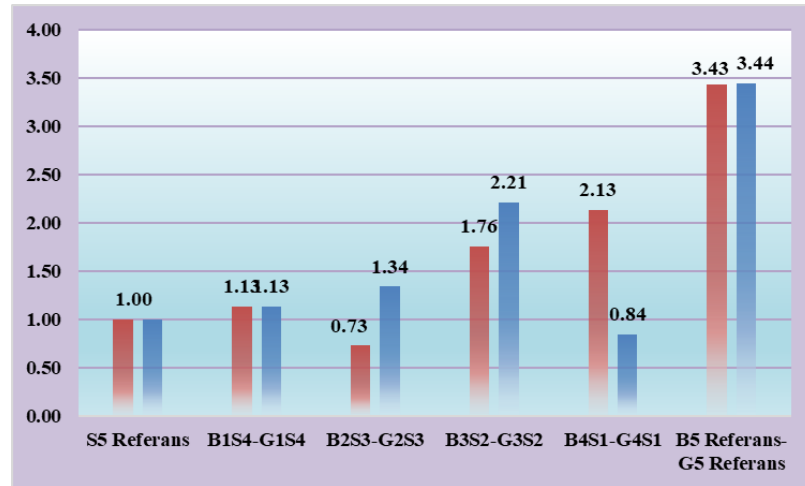
Kiriş	M_{cr} (kNm)	M_u (kNm)	Δ_{cr} (mm)	Δ_u (mm)	Z	Z/Z_{S5} Referans
S5 Referans	14.78	71.89	1.22	55.40	220.10	1.00
B1S4	14.02	70.30	1.37	67.73	248.54	1.13
B2S3	13.23	67.07	2.11	66.72	160.29	0.73
B3S2	11.55	67.04	1.24	82.57	387.35	1.76
B4S1	10.36	71.05	1.19	81.48	469.44	2.13
B5 Referans	8.35	69.43	0.88	80.25	755.32	3.43
G1S4	13.16	74.59	1.24	54.58	249.37	1.13
G2S3	11.50	75.27	1.22	55.12	294.69	1.34
G3S2	10.13	74.88	0.95	62.76	485.93	2.21
G4S1	10.53	73.71	2.26	59.89	185.48	0.84
G5 Referans	6.37	81.14	1.09	64.89	757.75	3.44

Çizelge 6.17. İkinci grup kirişlerin Zou [46] tanımına göre süneklik değerleri

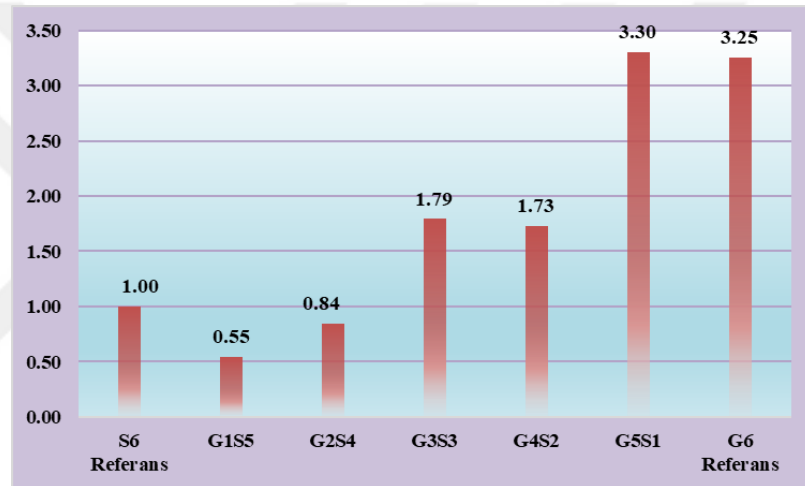
Kiriş	M_{cr} (kNm)	M_u (kNm)	Δ_{cr} (mm)	Δ_u (mm)	Z	Z/Z_{S6} Referans
S6 Referans	15.95	84.10	1.08	39.57	192.73	1.00
G1S5	13.28	78.19	1.33	23.84	105.39	0.55
G2S4	12.66	81.10	1.17	29.52	162.07	0.84
G3S3	10.84	88.30	1.00	42.17	345.40	1.79
G4S2	11.01	89.10	1.07	43.77	332.75	1.73
G5S1	8.15	86.13	0.75	45.10	635.93	3.30
G6 Referans	7.16	84.85	0.80	42.20	626.76	3.25

Çizelge 6.18. Üçüncü grup kirişlerin Zou [46] tanımına göre süneklik değerleri

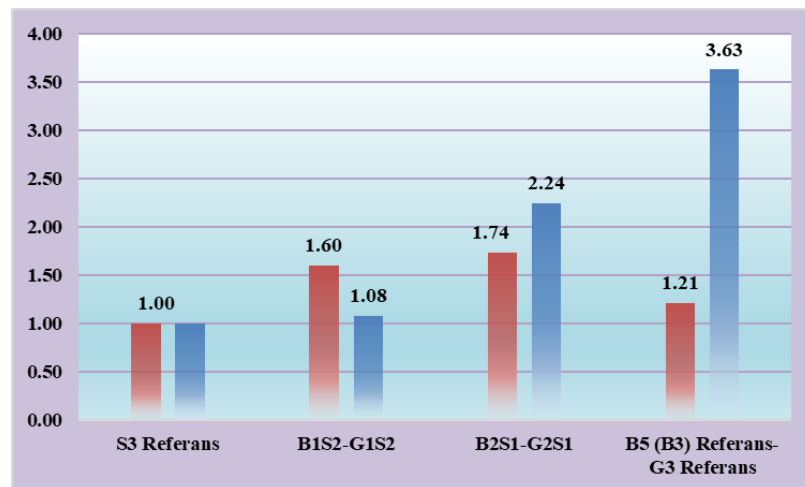
Kiriş	M_{cr} (kNm)	M_u (kNm)	Δ_{cr} (mm)	Δ_u (mm)	Z	Z/Z_{S3} Referans
S3 Referans	13.30	48.39	1.14	46.66	148.65	1.00
B1S2	11.82	48.19	1.13	65.92	237.51	1.60
B2S1	10.83	45.50	1.21	74.62	258.26	1.74
B5 (B3) Referans	9.03	36.64	1.16	51.53	180.05	1.21
G1S2	11.40	49.06	1.03	38.43	159.93	1.08
G2S1	9.96	58.22	0.90	51.32	333.65	2.24
G3 Referans	9.16	66.10	0.77	57.36	539.62	3.63



Şekil 6.17. Birinci grup kirişlerin S5 Referans kirişine göre Zou [46] tanımına göre süneklilik oranları



Şekil 6.18. İkinci grup kirişlerin S6 Referans kirişine göre Zou [46] tanımına göre süneklilik oranları



Şekil 6.19. Üçüncü grup kirişlerin S3 Referans kirişine göre Zou [46] tanımına göre süneklilik oranları

Çalışmada yer alan kirişlerin Zou [46] tanımına göre süneklik değerleri ile FRP donatı oranı arasında doğrudan bir ilişki kurulamadığından bu tanımın da hibrit FRP-çelik donatılı kirişler için uygun olmadığı düşünülmektedir. Bu tanıma göre de, toplam donatı alanı içerisindeki çelik donatı oranı arttıkça, hibrit donatılı kirişin sünekliği artacağı yerde genellikle azalmış, yani fiziksel durumun tersi yönde bir eğilim oluşmuştur.

6.6. Naaman ve Jeong [40] Süneklik Tanımı

Çelik donatıların akmasına bağlı olarak tanımlanan klasik süneklik tanımları FRP donatılı veya tendonlu kirişlerin sünekliklerini doğru bir şekilde belirtmediğinden, bu kirişler için Naaman ve Jeong [40] enerji ile ifade edilen yeni bir tanım geliştirmiştir. Araştırmacılar tarafından yapılan çalışmalarda geliştirilen tanım kullanılarak çelik donatılı ya da tendonlu kirişlerin FRP donatılı ya da tendonlu kirişlerden daha sünek olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

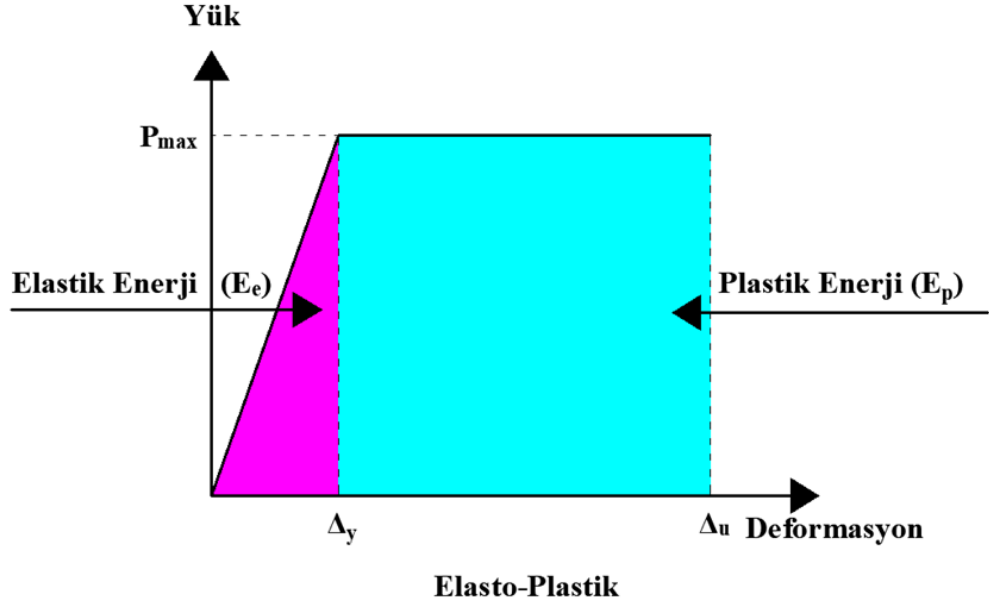
Geliştirilen bu tanımda süneklik, kirişlerin tükettiği toplam enerjinin elastik enerjiye oranı cinsinden ifade edilmektedir. Bu kapsamda, öncelikle elasto-plastik davranışa sahip çelik donatılı kirişler için toplam ve elastik enerji ifadeleri Şekil 6.20'den yararlanarak Denklem 6.7 ve Denklem 6.8 aracılığı ile belirlenmiştir. Daha sonra toplam tüketilen enerjinin elastik enerjiye oranı alınarak (Denklem 6.9) süneklikler elde edilmiştir. Klasik süneklik tanımındaki $\mu = \Delta_u / \Delta_y$ eşitliği Denklem 6.9'da yerine konularak, yeni süneklik ifadesine (Denklem 6.10) ulaşılmıştır.

$$E_{tot} = P_{max} \Delta_u - \frac{P_{max} \Delta_y}{2} \quad (6.7)$$

$$E_e = \frac{P_{max} \Delta_y}{2} \quad (6.8)$$

$$\frac{E_{tot}}{E_e} = \frac{2\Delta_u}{\Delta_y} - 1 \quad (6.9)$$

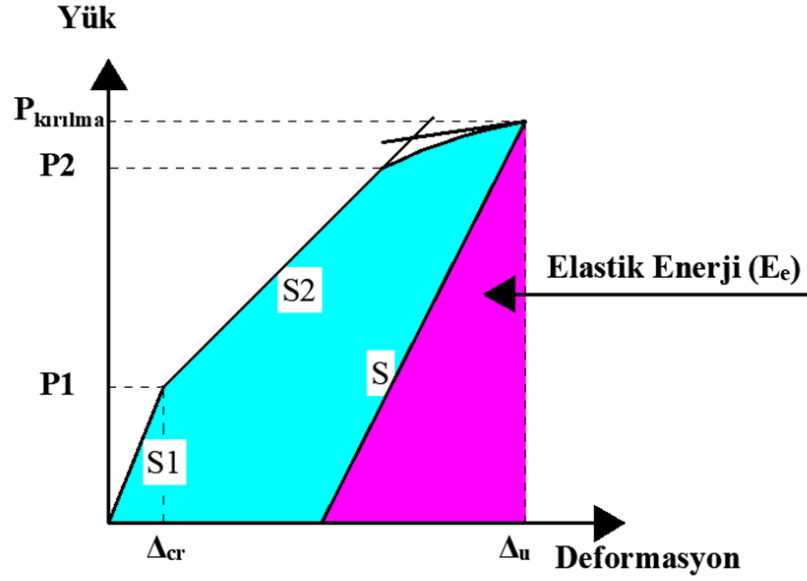
$$\mu_{NJ} = \frac{1}{2} \left(\frac{E_{tot}}{E_e} + 1 \right) \quad (6.10)$$



Şekil 6.20. Elasto-plastik kirişlerde tüketilen elastik ve elastik olmayan enerji alanları

Denklem 6.10 kullanılarak hem çelik donatılı hem de FRP donatılı kirişlerin süneklikleri enerji değişkenine bağlı olarak ifade edilebilmektedir. E_{tot} toplam enerjiyi göstermekte ve maksimum yük seviyesine kadar yük-sehim grafiğinin altında kalan alanların toplanmasıyla hesaplanmaktadır. E_e ise elastik enerjiyi simgelemektedir. E_e , çelik donatılı kirişlerde yük-deplasman eğrisinin akma noktasına kadar olan toplam alanıdır. Ancak FRP donatılı kirişlerde kiriş taşıma gücüne ulaşınca kadar FRP donatılar elastik davranış gösterdiğinden bu kirişin tükettiği toplam enerjinin ne kadarının elastik olduğu doğrudan belli değildir. FRP donatılı kirişlerde E_e 'nin belirlenmesi için, Şekil 6.21'de gösterilen yük-sehim eğrisi modeli kullanılmıştır. Bu modelde, yükleme başlangıcından ilk çatlamanın meydana geldiği noktaya kadar $S1$ eğimi kullanılmakta ve ilk çatlama anında kirişteki yük seviyesi $P1$, çatlama sehimini ise Δ_{cr} ile gösterilmektedir. Modelde ilk çatlama noktası ($P1$; Δ_{cr}) ile betonun elastikliğini kaybettiği nokta ($P2$ yüküne karşılık gelen nokta) arasında kirişin sahip olduğu eğim $S2$ ile ifade edilmektedir. Daha sonra $S1$ ve $S2$ eğimlerinin ağırlıklı ortalaması Denklem 6.11 aracılığı ile hesaplanarak yük boşaltma eğimi S hesaplanmaktadır. Son olarak, E_e maksimum yüke karşılık gelen ve S eğimi ile gösterilen üçgenin alanının hesaplanması ile elde edilmektedir.

$$S = \frac{P1 \cdot S1 + (P2 - P1) \cdot S2}{P2} \quad (6.11)$$



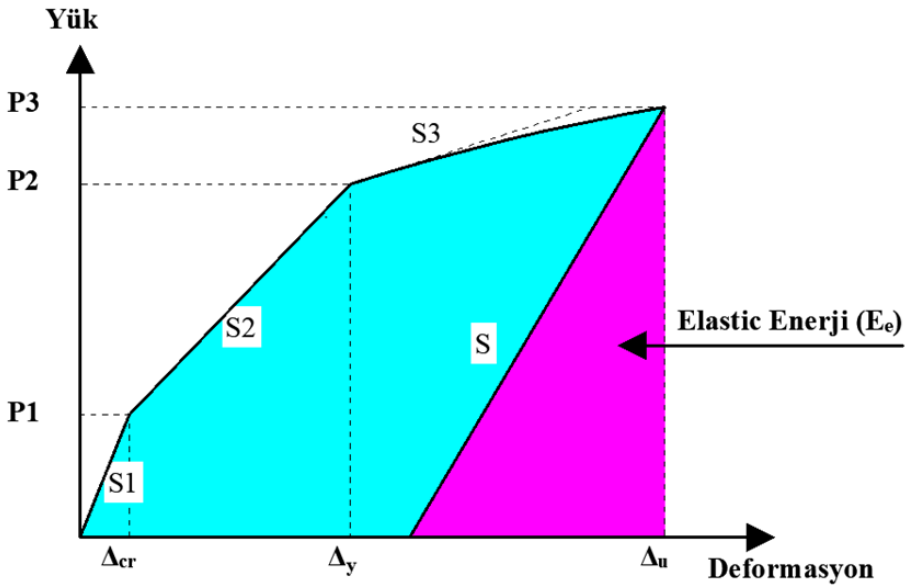
Şekil 6.21. FRP donatılı kirişlerde tüketilen elastik ve elastik olmayan enerji alanları

Grace ve diğ. [47] de GFRP, CFRP ve çelik donatılı kirişler ile gerçekleştirdiği çalışmada Naaman ve Jeong [40]'un süneklik tanımını kullanmıştır. Ancak elastik ile elastik olmayan enerjinin belirlenmesinde kullanılan S 'nin hesaplanması için betonun elastikliğini kaybettiği bölgenin eğimini de dâhil ederek üç eğimin ağırlıklı ortalamasının alınmasını önermiştir.

Naaman ve Jeong [40]'un geliştirdiği süneklik tanımı, çalışmamızda yer alan kirişlerden yalnızca salt çelik ve FRP donatılı kirişlere uygulanabilir durumdadır. Hibrit donatılı kirişlerde bu tanım kullanıldığında yani başlangıçtan itibaren ilk iki eğim hesaba katılarak elastik enerji hesaplandığında, akmadan sonra FRP donatının elastik enerji tüketimine katkısı ihmal edilmektedir. Bir başka ifade ile, FRP donatısı kiriş taşıma gücüne ulaşıncaya kadar elastik davranış gösterdiğinden çelik donatılar aktıktan sonra tüketilen enerjinin tamamı plastik değildir. Özellikle de FRP donatı oranı yüksek olan kirişlerde akma, düşük yük seviyesinde meydana gelmekte ve akmadan sonraki tüm enerjinin plastik kabul edilmesi durumunda enerjinin çok büyük

kısımının plastik olduğu yanılıgısına düşölerek oldukça büyük süneklik değlereri elde edilmektedir. Bu sebeplere ek olarak, hibrit FRP-çelik donatılı kirişlerin yük-sehim eğrileri üç eğimlidir. Şekil 6.22’de gösterilen hibrit bir kirişin yük-deplasman modelinde yer alan üç eğim dikkate alınarak, Denklem 6.12’de verilen yeni boşaltma eğimi ifadesi elde edilmiştir. Elastik enerji ve süneklik değlereri, bu yeni ifade yardımıyla hesaplanmıştır. Hibrit donatılı kirişlerde, *S1* yükleme başlangıcından ilk çatlama anına kadar, *S2* ilk çatlama noktasından çelik donatıların akma noktasına kadar ve *S3* ise akma noktasından kırılma noktasına kadar olan eğimleri simgelemektedir. *P1*, *P2* ve *P3* ise sırasıyla ilk çatlama, akma ve nihai yük değlerlerini göstermektedir.

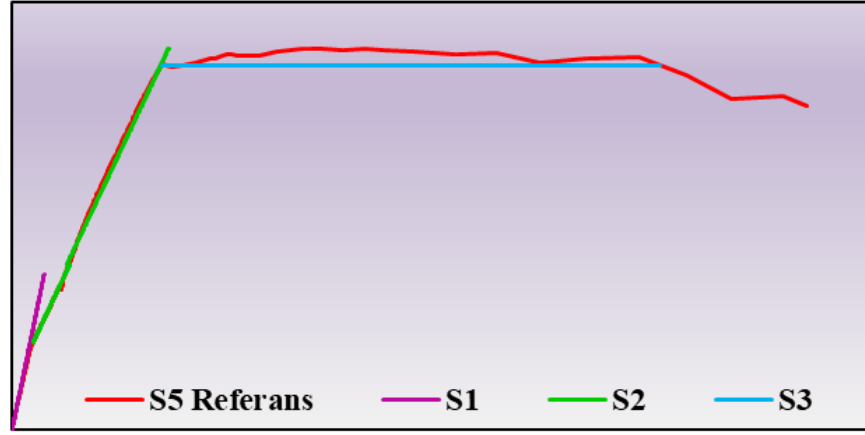
$$S = \frac{P1 \cdot S1 + (P2 - P1) \cdot S2 + (P3 - P2) \cdot S3}{P3} \quad (6.12)$$



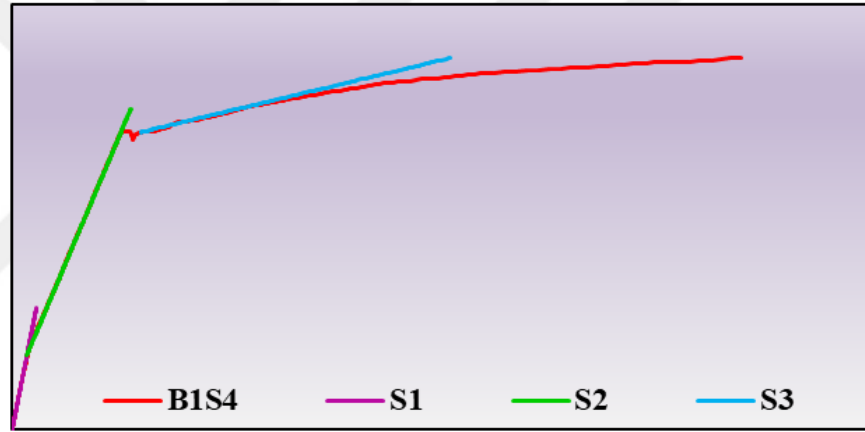
Şekil 6.22. Hibrit FRP-çelik donatılı kirişlerde tüketilen elastik ve elastik olmayan enerji alanları

Bu tanıma göre süneklik hesaplarının yapılması için gerekli olan üç doğrusal bölge, Şekil 6.23-6.47’de kirişlerin yük-deplasman eğrileri üzerinde gösterilmiştir. Bu eğimlerin ağırlıklı ortalamaları belirlenerek tüm kirişlerin süneklikleri hesaplanmıştır. Salt çelik donatılı kirişlerde elasto-plastik malzeme kabulü yapılarak *S3* eğimi sıfır

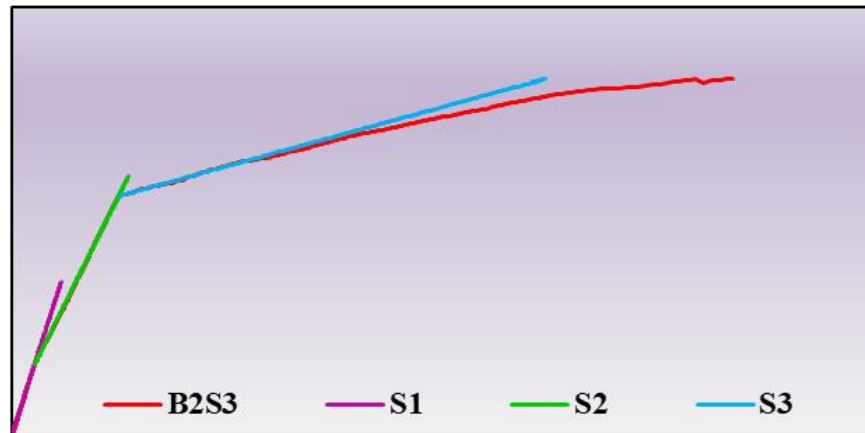
kabul edilmiş ve toplam enerjiler de buna göre hesaplanmıştır. Salt FRP donatılı kirişlerde ise akma gerçekleşmediğinden S2 eğimi sıfır olarak kabul edilmiştir.



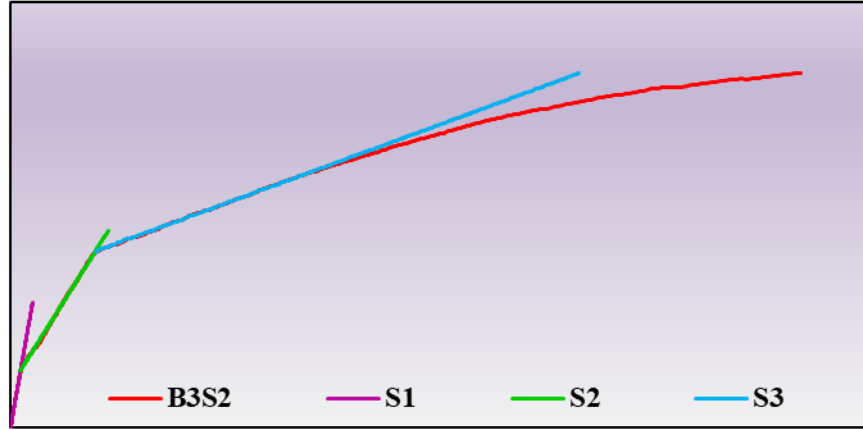
Şekil 6.23. S5 Referans kirişi yük-sehim eğrisi üzerinde doğrusal bölgelerin gösterimi



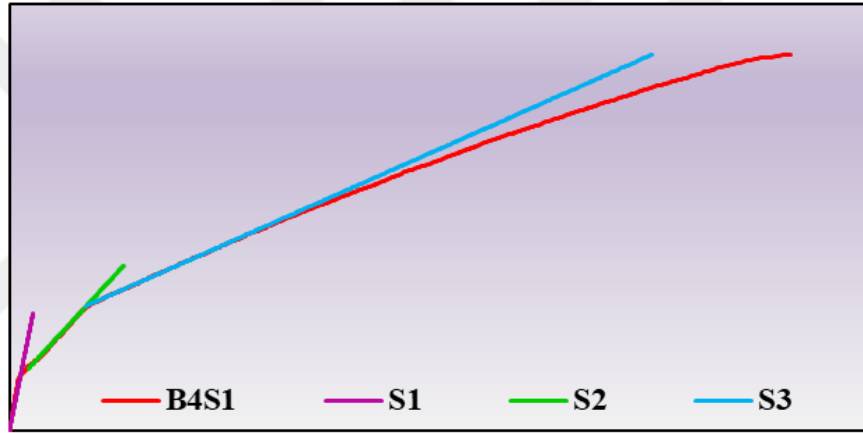
Şekil 6.24. B1S4 kirişi yük-sehim eğrisi üzerinde doğrusal bölgelerin gösterimi



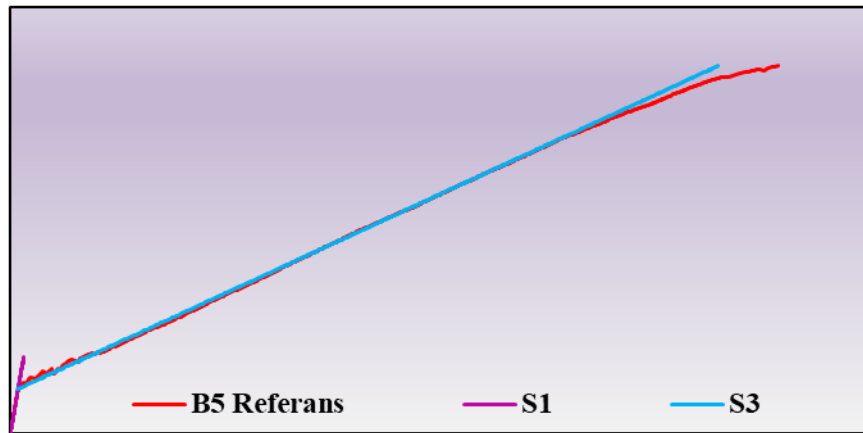
Şekil 6.25. B2S3 kirişi yük-sehim eğrisi üzerinde doğrusal bölgelerin gösterimi



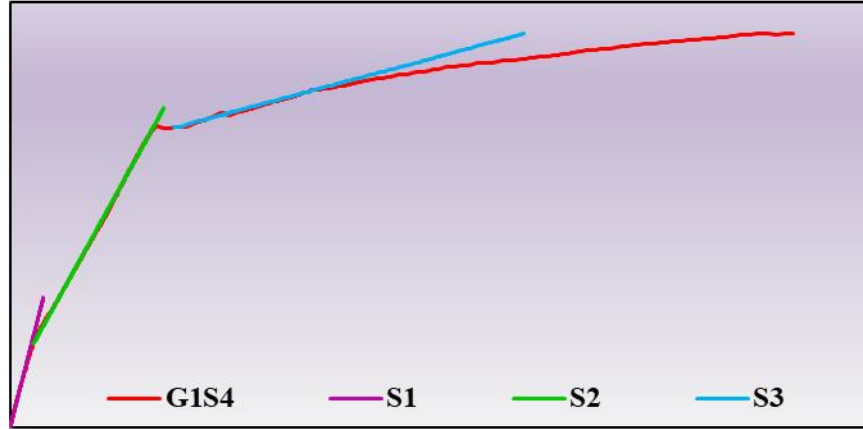
Şekil 6.26. B3S2 kirişi yük-sehim eğrisi üzerinde doğrusal bölgelerin gösterimi



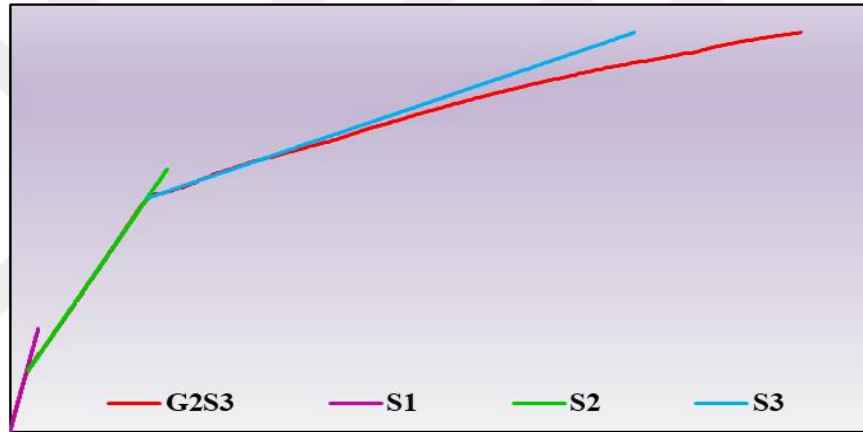
Şekil 6.27. B4S1 kirişi yük-sehim eğrisi üzerinde doğrusal bölgelerin gösterimi



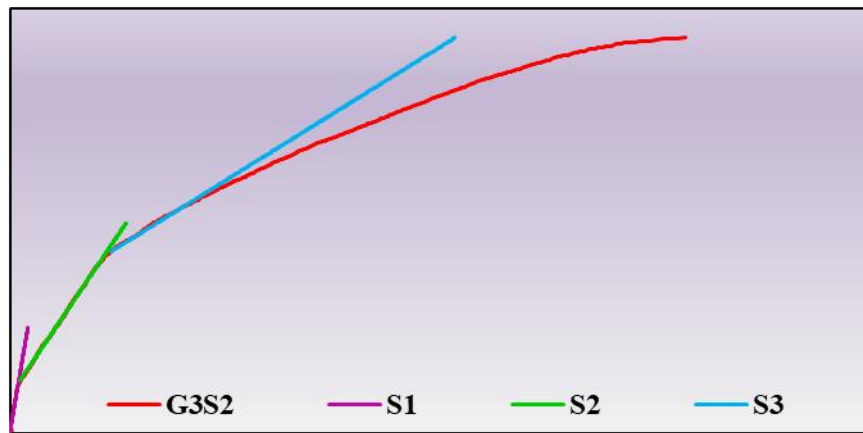
Şekil 6.28. B5 Referans kirişi yük-sehim eğrisi üzerinde doğrusal bölgelerin gösterimi



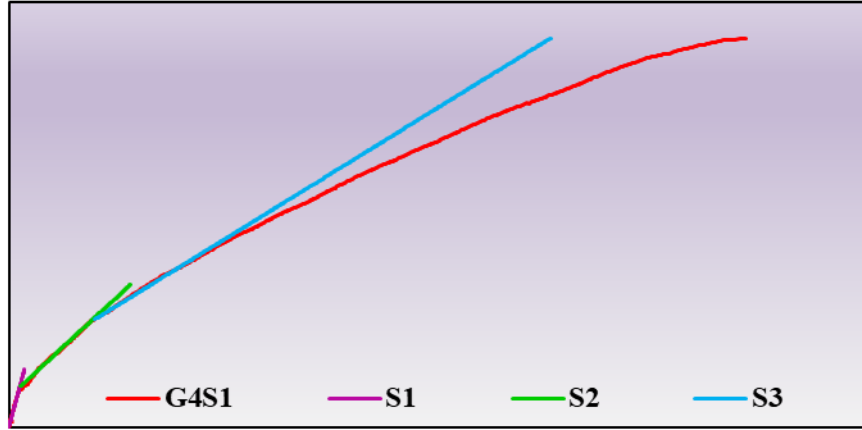
Şekil 6.29. G1S4 kirişi yük-sehim eğrisi üzerinde doğrusal bölgelerin gösterimi



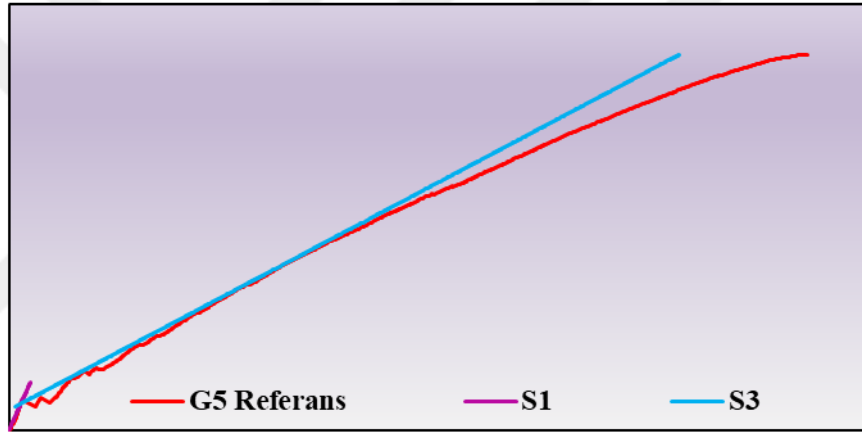
Şekil 6.30. G2S3 kirişi yük-sehim eğrisi üzerinde doğrusal bölgelerin gösterimi



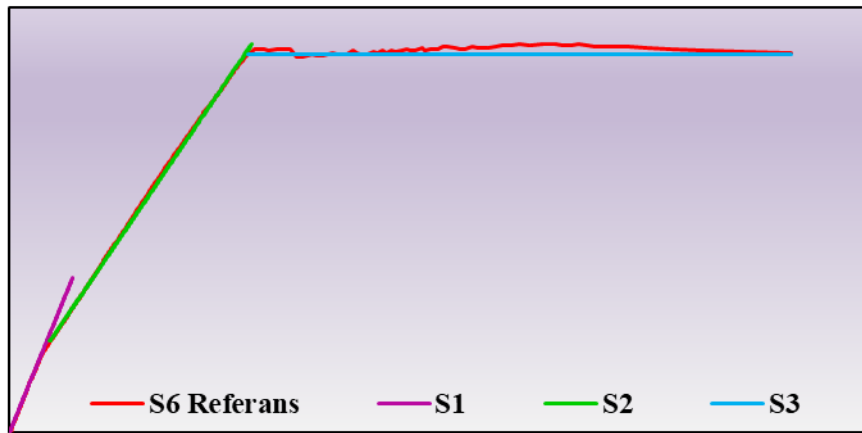
Şekil 6.31. G3S2 kirişi yük-sehim eğrisi üzerinde doğrusal bölgelerin gösterimi



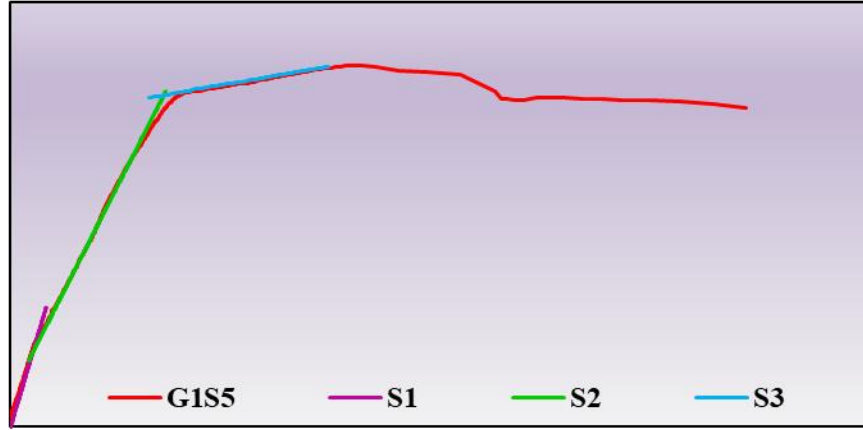
Şekil 6.32. G4S1 kirişi yük-sehim eğrisi üzerinde doğrusal bölgelerin gösterimi



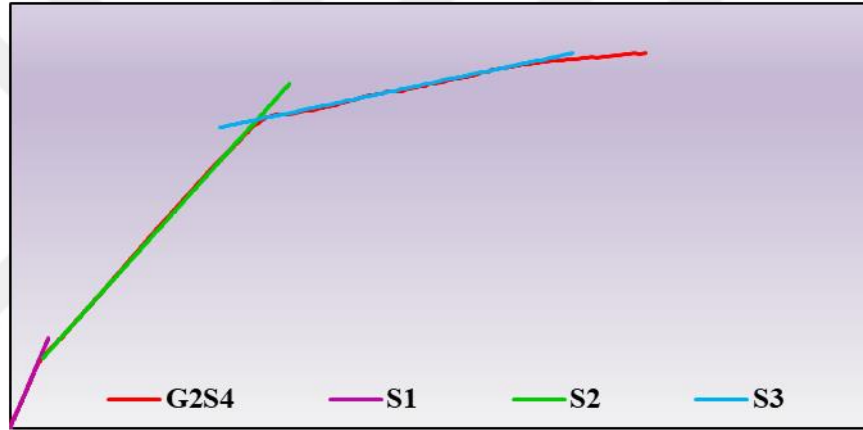
Şekil 6.33. G5 Referans kirişi yük-sehim eğrisi üzerinde doğrusal bölgelerin gösterimi



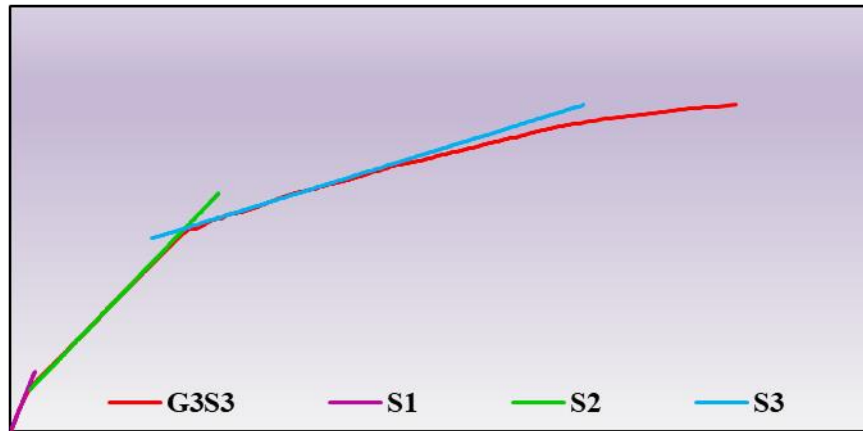
Şekil 6.34. S6 Referans kirişi yük-sehim eğrisi üzerinde doğrusal bölgelerin gösterimi



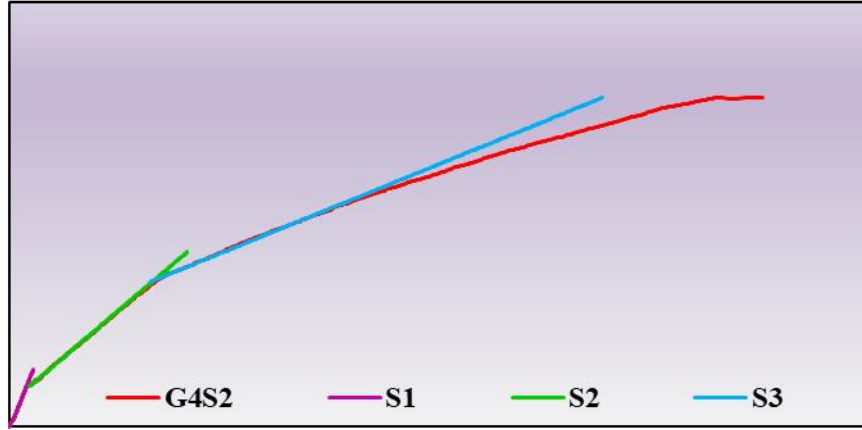
Şekil 6.35. G1S5 kirişi yük-sehim eğrisi üzerinde doğrusal bölgelerin gösterimi



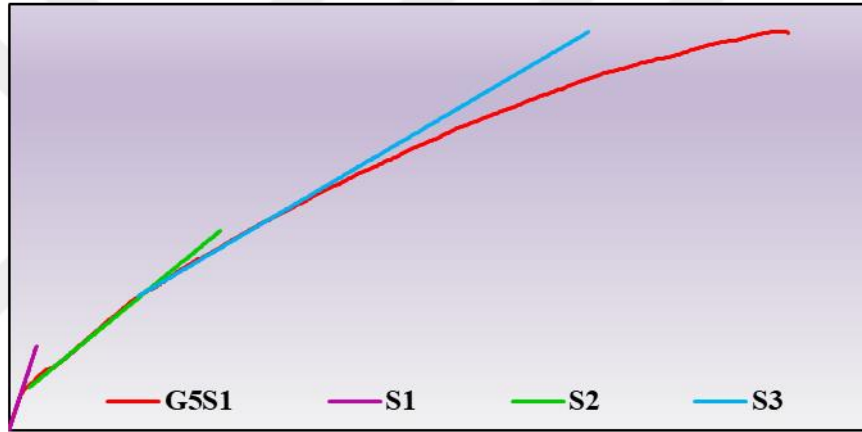
Şekil 6.36. G2S4 kirişi yük-sehim eğrisi üzerinde doğrusal bölgelerin gösterimi



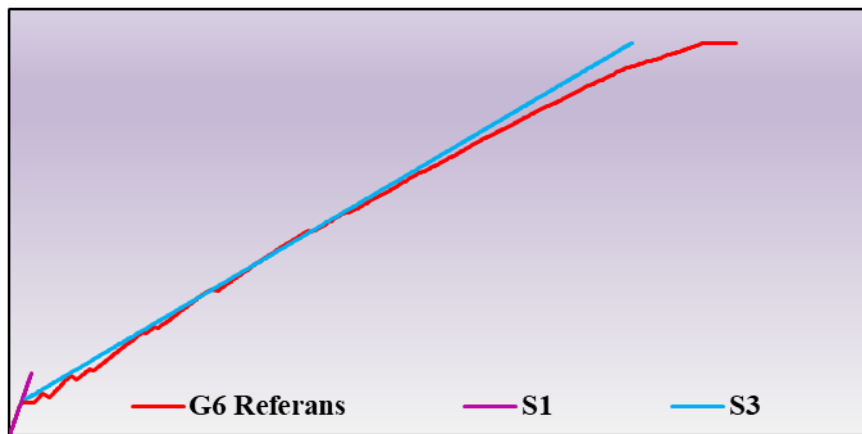
Şekil 6.37. G3S3 kirişi yük-sehim eğrisi üzerinde doğrusal bölgelerin gösterimi



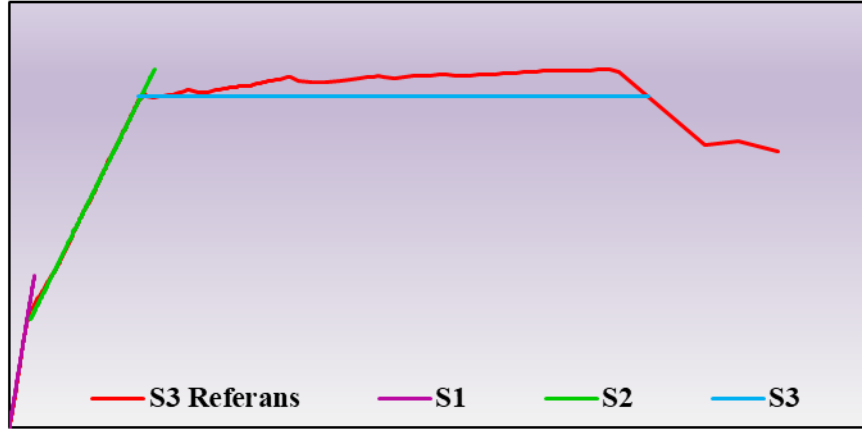
Şekil 6.38. G4S2 kirişi yük-sehim eğrisi üzerinde doğrusal bölgelerin gösterimi



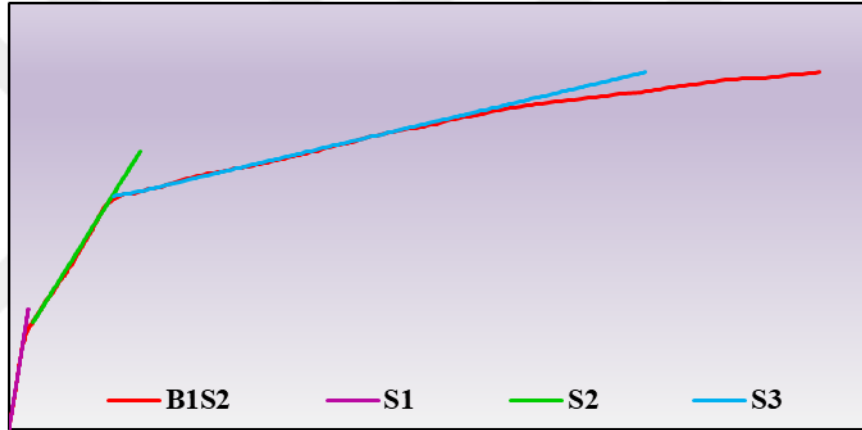
Şekil 6.39. G5S1 kirişi yük-sehim eğrisi üzerinde doğrusal bölgelerin gösterimi



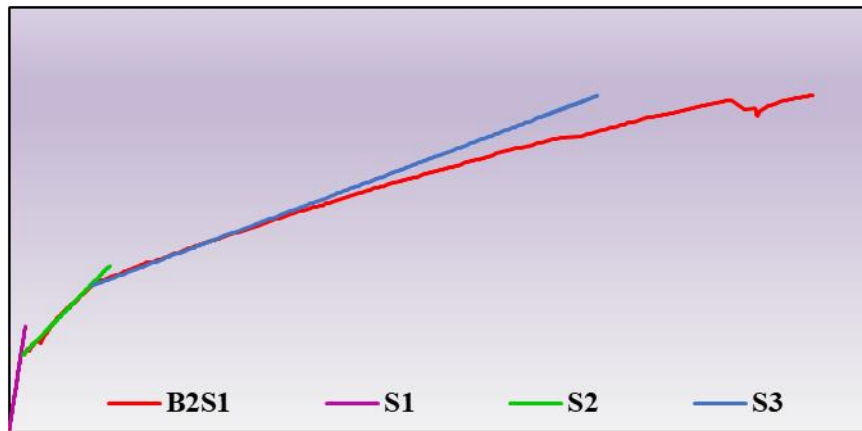
Şekil 6.40. G6 Referans kirişi yük-sehim eğrisi üzerinde doğrusal bölgelerin gösterimi



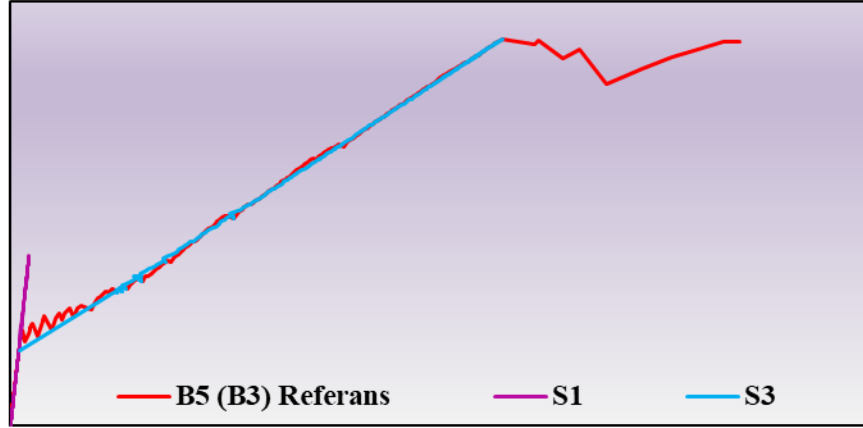
Şekil 6.41. S3 Referans kirişi yük-sehim eğrisi üzerinde doğrusal bölgelerin gösterimi



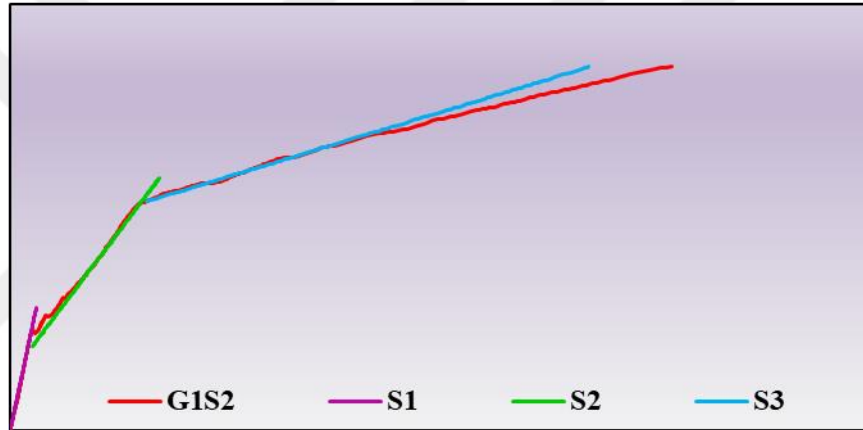
Şekil 6.42. B1S2 kirişi yük-sehim eğrisi üzerinde doğrusal bölgelerin gösterimi



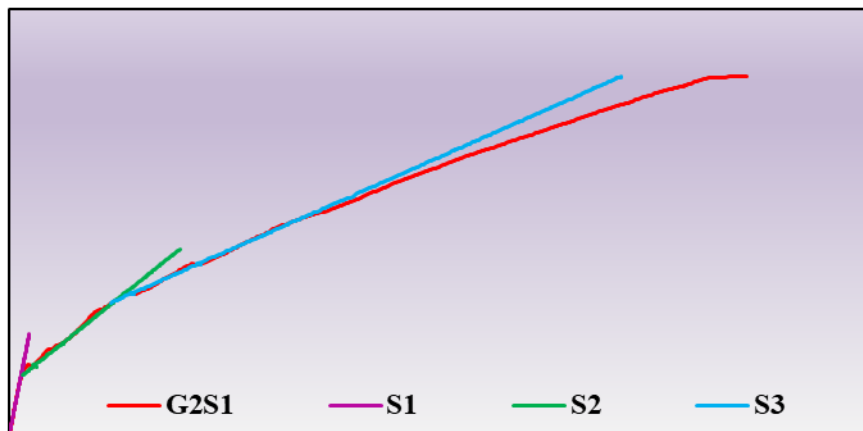
Şekil 6.43. B2S1 kirişi yük-sehim eğrisi üzerinde doğrusal bölgelerin gösterimi



Şekil 6.44. B5 (B3) Referans kirişi yük-sehim eğrisi üzerinde doğrusal bölgelerin gösterimi



Şekil 6.45. G1S2 kirişi yük-sehim eğrisi üzerinde doğrusal bölgelerin gösterimi

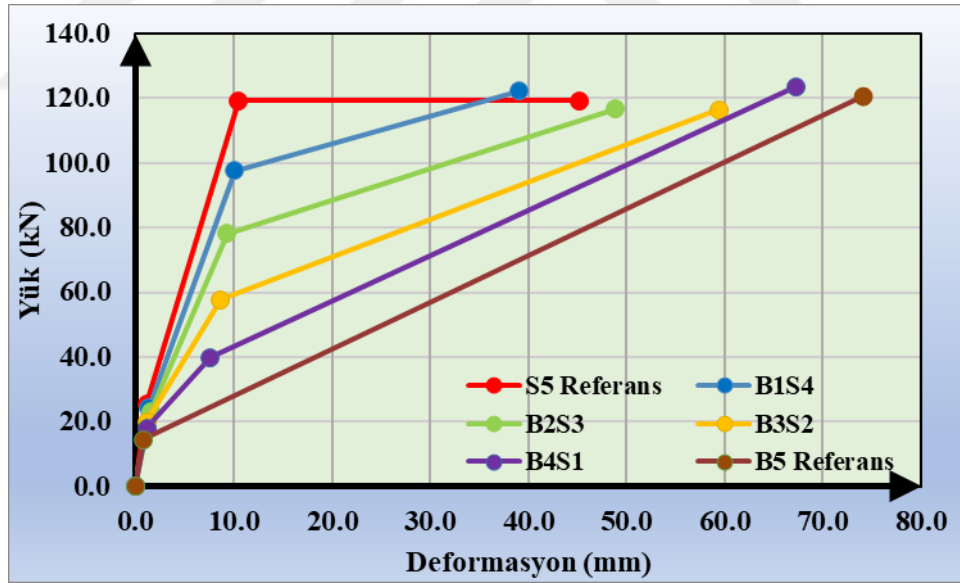


Şekil 6.46. G2S1 kirişi yük-sehim eğrisi üzerinde doğrusal bölgelerin gösterimi

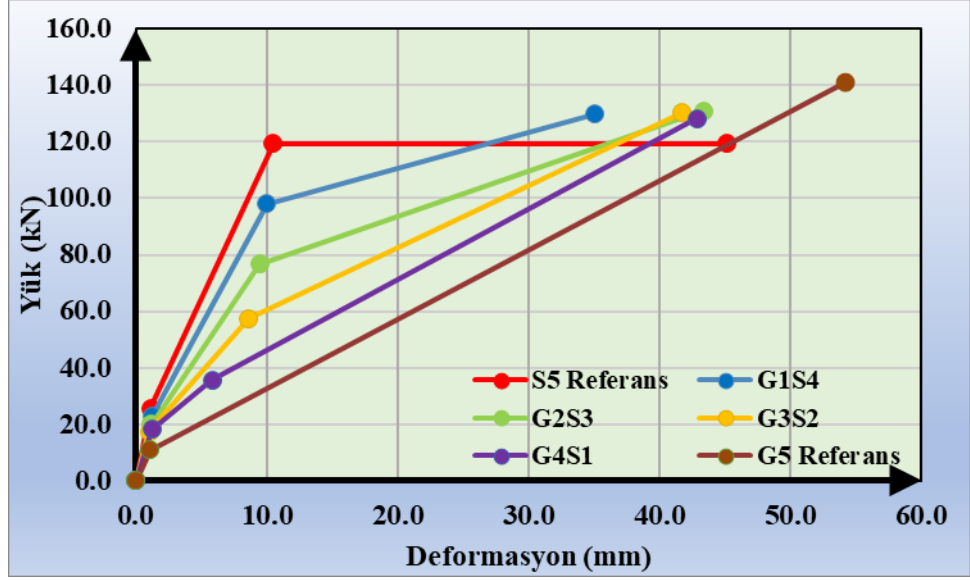


Şekil 6.47. G3 Referans kirişi yük-sehim eğrisi üzerinde doğrusal bölgelerin gösterimi

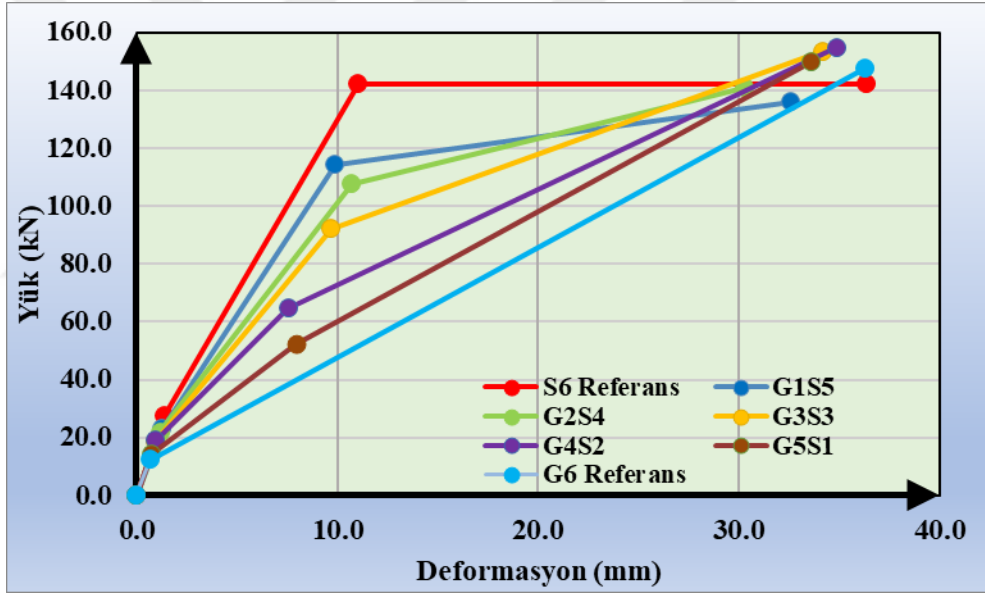
Tüm kirişlerde bu eğimler belirlendikten sonra her deney grubunun kendi içerisinde idealize edilmiş grafikler hazırlanmıştır. (Şekil 6.48-6.52) Kirişlerin toplam tükettikleri enerji bu grafiklerin altında kalan alanlardan hesaplanmıştır.



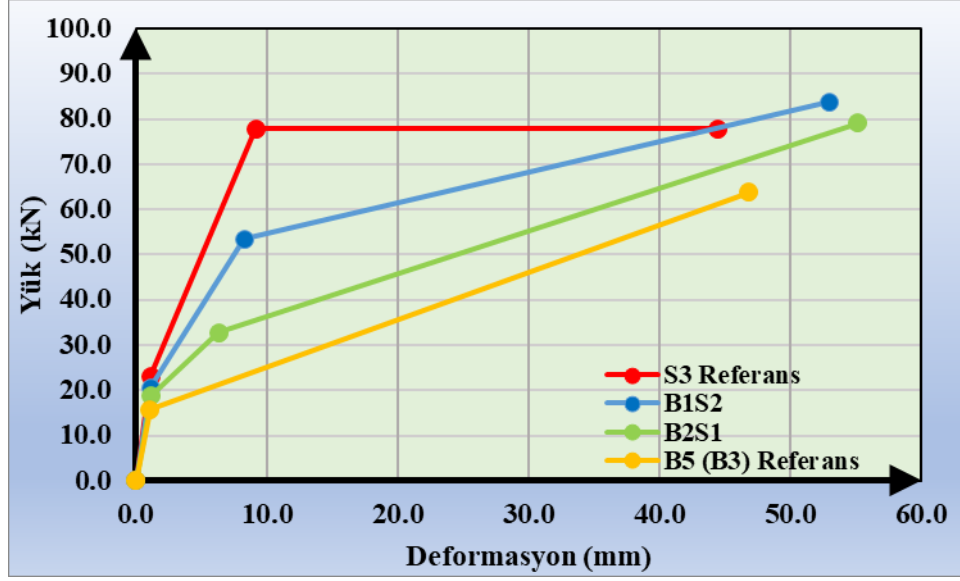
Şekil 6.48. Birinci grup kirişlere (BFRP) ait yük-sehim grafikleri



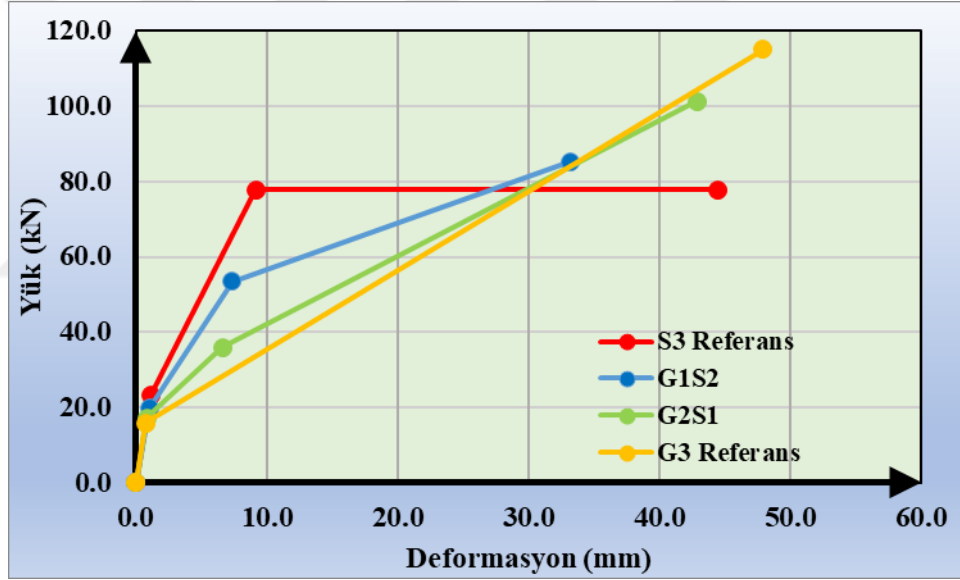
Şekil 6.49. Birinci grup kirişlere (GFRP) ait yük-sehim grafikleri



Şekil 6.50. İkinci grup kirişlere (GFRP) ait yük-sehim grafikleri



Şekil 6.51. Üçüncü grup kirişlere (BFRP) ait yük-sehim grafikleri



Şekil 6.52. Üçüncü grup kirişlere (GFRP) ait yük-sehim grafikleri

Çizelge 6.19-21’de tüm deney gruplarında yer alan kirişlere ait Naaman ve Jeong [40] tanımına göre süneklik değerleri ile bu değerlerin ilgili referans çelik donatılı kirişin süneklik değerine oranlarına yer verilmiştir. Bu oranlar Şekil 6.53-6.55’te de sunulmuştur.

Çizelge 6.19. İlk grup kirişlerine ait eğimler, sınır yük değerleri ve Naaman ve Jeong [40] süneklik değerleri

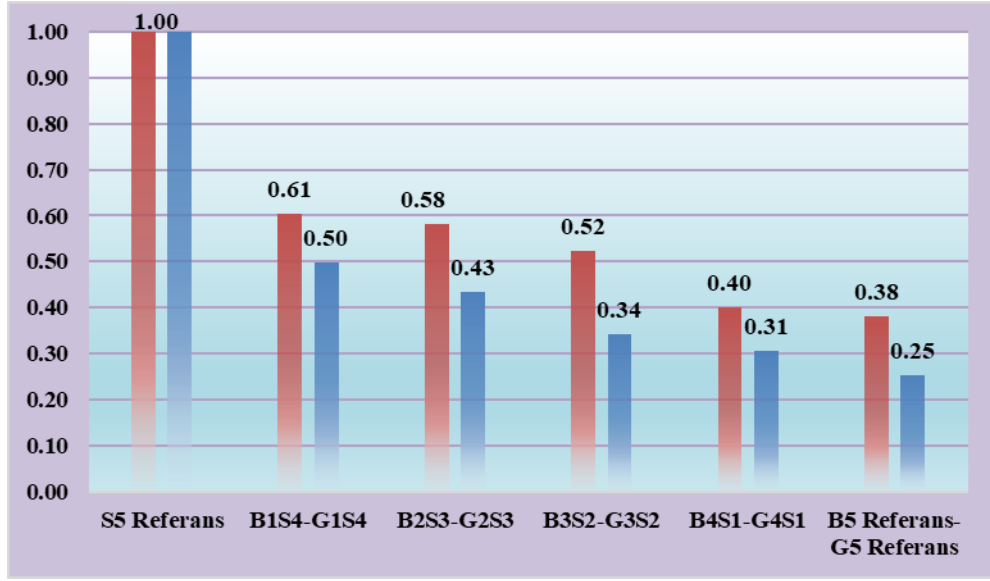
Eleman	P1 (kN)	P2 (kN)	P3 (kN)	S1(kN/m)	S2 (kN/m)	S3 (kN/m)	S (kN/m)	E _{tot} (kJ)	E _{elastik} (kJ)	μ_{NJ}	$\mu_{NJ}/\mu_{NJ-S5 Referans}$
S5 Referans	25.70	119.35	125.02	22750	10000	-	12745.50	4.83	0.61	4.44	1.00
B1S4	24.39	97.70	122.26	17850	8400	850	8768.09	3.73	0.85	2.69	0.61
B2S3	23.00	78.30	116.64	15000	7100	970	6643.27	4.27	1.02	2.58	0.58
B3S2	20.09	57.78	116.59	17700	5000	1160	5251.48	4.73	1.29	2.33	0.52
B4S1	18.02	40.01	123.56	15725	3400	1400	3845.18	5.08	1.99	1.78	0.40
B5 Referans	14.53	-	120.75	18600	-	1450	3513.46	4.96	2.08	1.70	0.38
G1S4	22.89	97.96	129.72	18450	8550	1270	8514.56	3.39	0.99	2.22	0.50
G2S3	20.00	76.74	130.90	17100	6820	1600	6231.07	3.93	1.38	1.93	0.43
G3S2	17.62	57.46	130.22	16700	5250	2200	5095.05	3.40	1.66	1.52	0.34
G4S1	18.32	35.68	128.20	15100	3750	2500	4469.44	3.17	1.84	1.36	0.31
G5 Referans	11.08	-	141.11	10230	-	2450	3060.65	4.04	3.25	1.12	0.25

Çizelge 6.20. İkinci grup kirişlerine ait eğimler, sınır yük değerleri ve Naaman ve Jeong [40] süneklik değerleri

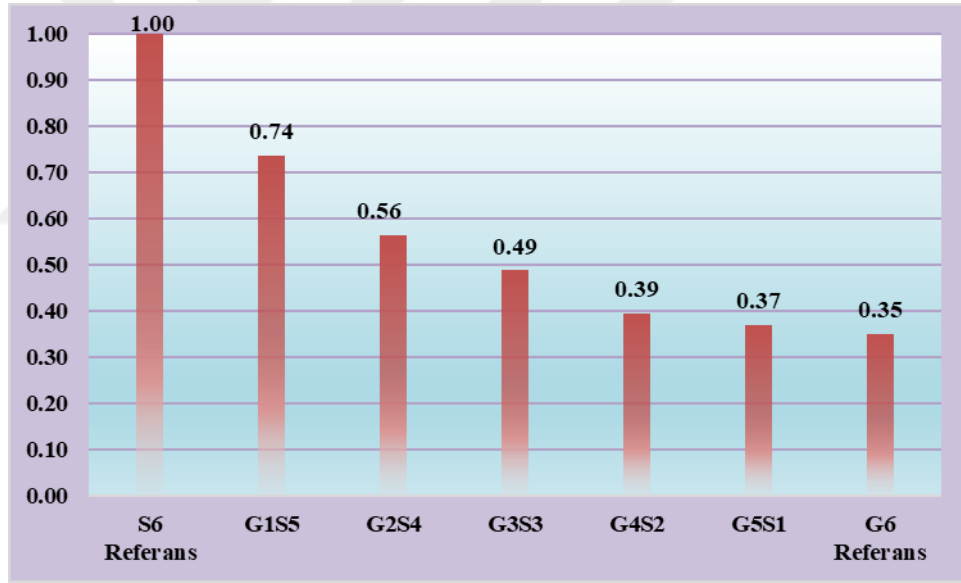
Eleman	P1 (kN)	P2 (kN)	P3 (kN)	S1(kN/m)	S2 (kN/m)	S3 (kN/m)	S (kN/m)	E _{tot} (kJ)	E _{elastik} (kJ)	μ_{NJ}	$\mu_{NJ} / \mu_{NJ-S6 Referans}$
S6 Referans	27.74	136.98	146.26	19800	11900	-	13499.87	4.44	0.79	3.30	1.00
G1S5	23.09	114.41	135.98	18200	10600	950	10360.17	3.45	0.89	2.43	0.74
G2S4	22.01	107.80	141.04	19000	9000	1700	8840.55	3.06	1.13	1.86	0.56
G3S3	18.85	92.24	153.51	19900	8400	2500	7457.13	3.51	1.58	1.61	0.49
G4S2	19.14	64.64	154.85	20400	6900	3300	5825.53	3.29	2.06	1.30	0.39
G5S1	14.17	52.39	149.80	19750	5300	3800	5658.50	2.84	1.98	1.22	0.37
G6 Referans	12.45	-	147.56	18200	-	3800	5014.84	2.85	2.17	1.16	0.35

Çizelge 6.21. Üçüncü grup kirişlerine ait eğimler, sınır yük değerleri ve Naaman ve Jeong [40] süneklik değerleri

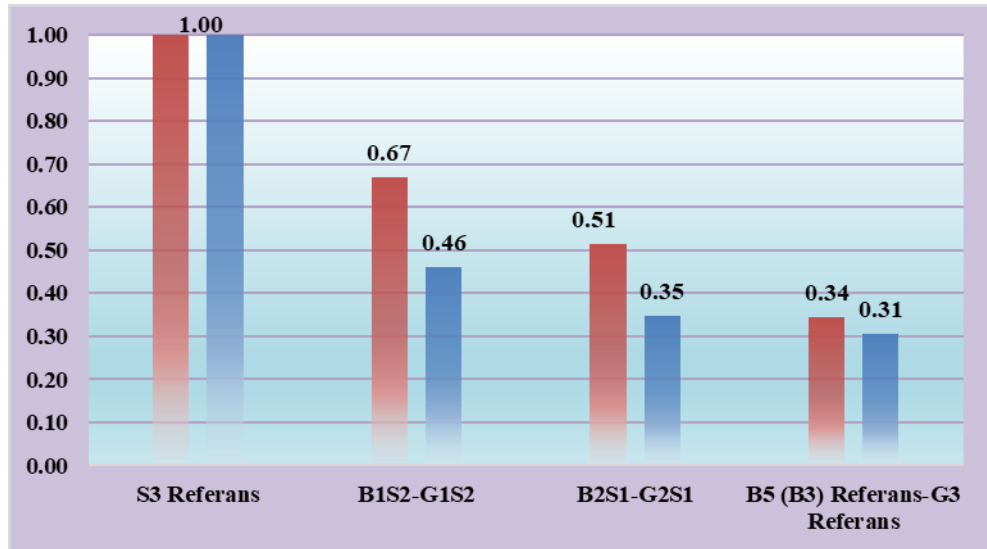
Eleman	P1 (kN)	P2 (kN)	P3 (kN)	S1(kN/m)	S2 (kN/m)	S3 (kN/m)	S (kN/m)	E _{tot} (kJ)	E _{elastik} (kJ)	μ_{NJ}	$\mu_{NJ} / \mu_{NJ-S3 Referans}$
S3 Referans	23.13	77.77	84.16	20500	6800	-	10874.75	3.17	0.33	5.36	1.00
B1S2	20.55	53.41	83.82	18150	4600	680	6500.19	3.34	0.54	3.59	0.67
B2S1	18.84	32.73	79.14	16300	2700	950	4910.58	2.88	0.64	2.76	0.51
B5 (B3) Referans	15.70	-	63.73	14500	-	1050	4362.81	1.25	0.47	1.84	0.34
G1S2	19.83	53.50	85.32	19200	5350	1230	7032.15	2.04	0.52	2.47	0.46
G2S1	17.32	36.01	101.25	20400	3250	1800	5250.23	2.65	0.98	1.86	0.35
G3 Referans	15.93	-	114.96	21700	-	2100	4816.14	3.09	1.36	1.64	0.31



Şekil 6.53. İlk grup kirişlerinin referans çelik donatılı kirişe (S5 Referans) göre Naaman ve Jeong [40] süneklik oranları



Şekil 6.54. İkinci grup kirişlerinin referans çelik donatılı kirişe (S6 Referans) göre Naaman ve Jeong [40] süneklik oranları



Şekil 6.55. Üçüncü grup kirişlerinin referans çelik donatılı kirişe (S3 Referans) göre Naaman ve Jeong [40] süneklik oranları

Toplam tüketilen enerji içerisindeki elastik enerjiye bağlı olarak ifade edilen bu süneklik tanımında tüm gruplarda yer alan kirişlerde sünekliği en yüksek elemanın salt çelik donatılı kiriş, sünekliği en düşük olan elemanın ise salt FRP donatılı kiriş olduğu sonucu ortaya çıkmıştır. Toplam donatı oranı içerisindeki FRP donatı oranı arttıkça sünekliğin kademeli olarak azaldığı da görülmektedir. Birinci ve üçüncü grupta yer alan kirişlerin çekme bölgesinde aynı sayıda BFRP veya GFRP donatı bulunduran kirişlerin süneklikleri kıyaslandığında, BFRP donatılı kirişlerin GFRP donatılılara göre daha sünek olduğu sonucuna da ulaşılır.

Tüm süneklik tanımları değerlendirilirken aşağıda belirtilen kriterler göz önünde bulundurulmuştur. Farklı süneklik tanımlarına göre, gevrek bir malzeme olan FRP donatıların oranca fazla olduğu hibrit donatılı kirişlerin sünekliklerinin daha yüksek olması, bu kirişlerin gerçekten daha sünek bir davranış göstermelerinden değil, FRP donatının elastisite modülünün çeliğe göre düşüklüğü sebebiyle kiriş sehimlerinin artmasından kaynaklanmaktadır. Bu nedenle bu tür sonuçlar veren tanımların birer deformabilite (şekil değiştirme kapasitesi) tanımı olduğu düşünülmektedir. Bir diğer husus da, tamamı çelik donatılı kirişlerin kendi deney gruplarında maksimum süneklik değerine sahip olma gerekliliğidir. Çünkü çelik sünek, FRP ise betonun ezilmesinden dahi daha gevrek davranış göstermektedir. Bu kriterler gereğince tüm süneklik

tanımları içerisinde Naaman ve Jeong [40] tarafından geliştirilen tanımın hibrit FRP-çelik donatılı kirişlerin süneklikleri için en uygun olduğu sonucu ortaya çıkmaktadır. Bu tanım, hem çelik donatı oranının artmasıyla sünekliğin arttığını doğru bir şekilde tahmin edebilmekte hem de en sünek davranış gösteren kirişin salt çelik donatılı kiriş, en gevrek davranış gösteren kirişin de salt FRP donatılı kiriş olduğunu gösterebilmektedir.



7. GEREKLİ TASARIM DAYANIMI VE DAYANIM AZALTMA KATSAYISI

Birçok uluslararası betonarme tasarım ve hesap yönetmeliği, betonarme yapıların ve yapı elemanlarının tasarımında Yük ve Dayanım Katsayıları Tasarımı (YDKT) felsefesini kullanmaktadır. Bu tasarım felsefesi, yüklerin istatistiksel çalışmalar neticesinde belirlenmiş katsayılar ile arttırılması, karakteristik dayanımların ise güvenilirlik analizleri neticesinde belirlenmiş katsayılar ile azaltılması esasına dayalıdır. Yapısal elemanlar, en azından farklı yük kombinasyonlarına göre hesaplanan yükleri taşıyabilecek dayanıma sahip olacak şekilde tasarlanmalıdır (Denklem 7.1). Bu bağlamda, elemanda ihtiyaç duyulan bu minimum dayanıma gerekli dayanım (Q), elemanın anma (karakteristik) dayanım değerinin (R) belirli bir azaltma katsayısı (ϕ) ile çarpılması sonucu elde edilen mevcut dayanıma da tasarım dayanımı (ϕR) adı verilir. YDKT felsefesi aşağıdaki formüle dayanır:

$$\left. \begin{array}{l} \text{Tasarım Dayanımı} \geq \text{Gerekli Dayanım} \\ \phi \cdot \text{Karakteristik Dayanım} \\ \phi R \geq Q \end{array} \right\} \quad (7.1)$$

Tezin bu bölümünde öncelikle ACI 318M-11 [35] ve ACI 440.1R-15 [1] yönetmelikleri tarafından salt çelik ve salt FRP donatılı kirişlerde ϕ katsayısının belirlenmesi için kullanılan yönteminden bahsedilmiştir. Ardından her iki yönetmelikte ϕ katsayısının hangi değişkenlere bağlı olarak ifade edildiği gösterilmiştir. Son olarak da, hibrit FRP-çelik donatılı betonarme kirişler için ϕ katsayısının değeri ve bu değer farklı değişkenlere göre nasıl değiştiği belirtilmiştir.

7.1. ACI 318M-11 [35] Yönetmeliğinin Kaynak Kabul Ettiği Çalışmalar

Salt çelik donatılı betonarme elemanların tasarım esaslarının yer aldığı ACI 318M-11 [35] yönetmeliği, ϕ katsayısı için Andrzej S. Nowak and Maria M. Szerszen [48-49] tarafından hazırlanan iki raporu temel almaktadır. Bu çalışmalarda, milyonlarca kirişin test edilmesi imkânsız olduğundan, güvenilirlik analizinin gerçekleştirilmesinde Monte Carlo simülasyonu kullanılarak kiriş sayısı artırılmıştır. İlk çalışmada [48], salt çelik donatılı elemanlarda dayanıma etki eden beton ve çelik donatılara ait istatistikî veriler (dağılım, değişim katsayısı, hata faktörü (λ)), bu malzemelerin dayanımlarına göre ayrı ayrı belirlenmiştir. Bunun için sektörden ve farklı saygın enstitülerden elde edilen önemli miktarda veri kullanılmıştır. Hata faktörü (λ), ortalama dayanımın karakteristik dayanıma oranı olarak alınmakta ve her malzemenin farklı dayanım ve özellikleri için değişim göstermektedir (Denklem 7.2).

$$\lambda = \frac{\text{Ortalama Day.}}{\text{Karakteristik Day.}} \quad (7.2)$$

İkinci çalışma [49], literatürde yer alan yük modelleri kullanılarak gerçekleştirilen güvenilirlik analizi ve dayanım azaltma katsayısının belirlenmesi üzerinedir. Aşağıda belirtilen maddelerde yer alan hususlara dikkat edilerek ϕ katsayısı belirlenmiştir:

- Öncelikle ACI 318M-11 [35]'in kapsadığı malzeme (beton ve çelik donatı) ve taşıyıcı eleman (kiriş veya kolon) seçimi gerçekleştirilmiştir. Bu seçimde, elemanın boyutu ve donatı oranlarının gerçek yapısal elemanları temsil etmesi gerekmektedir.
- İkinci adım yüklere ait istatistikî modellerin seçimidir. Yük modellerine ait ortalama ve değişim katsayısı (COV) değerleri de bu çalışmada yer almaktadır.
- Bir sonraki adım, hedef güvenilirlik indisi (β_T) kullanılarak güvenliğin değerlendirilmesidir.
- Son adım ise seçilen yük kombinasyonu ve ilgili sınır durumu için dayanım azaltma katsayısının belirlenmesidir. Bu katsayı, güvenilirlik indisinin (β) hedef güvenilirlik indisine (β_T) eşit ya da ondan daha büyük olmasını sağlayan ve 0.05'in katı olan bir katsayıdır. ($\beta \geq \beta_T$)

7.1.1. Yük Modelleri

ACI 318M-11 [35] yönetmeliğinin atıf yaptığı raporlarda, yalnızca ölü (D) ve hareketli yük (L) bileşenlerini dikkate alan yük birleşimi kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir. Yük bileşenleri ile ilgili istatistiki veriler, literatürde mevcuttur (Ellingwood ve diğ. [50], Ellingwood ve Rosowsky [51], Nowak [52]). Bu çalışmalarda yükler için iki farklı model kullanılmaktadır. Bu modellerden ilki, ortalama yük değerinin, yani rastgele bir zamandaki yükün, kullanımını esas almaktadır. İkinci model ise, yükün ulaşabileceği en yüksek değer kullanımına dayanmaktadır. Bu çalışma kapsamında, Turkstra kuralına (Turkstra [53], Turkstra ve Madsen [54], Nowak ve Collins [55]) uygun olarak yük birleşimleri belirlenmiştir. Bu kural, bir yük bileşeninin en yüksek değeri alındığında diğer bileşenlerin en yüksek olma ihtimalini ihmal etmektedir. Yani tüm yük bileşenlerinden yalnızca biri maksimum olduğunda, diğerlerinin ortalama değerleri göz önüne alınmalıdır. Bu nedenle, analizler sırasında her iki yük bileşenin de istatistiksel verilerine ihtiyaç duyulmaktadır. Çizelge 7.1’de iki yük modeline ait istatistiki verilere yer verilmiştir.

Çizelge 7.1. Yük modelleri

Yük Tipi	Ortalama Yük Değeri (Rastgele bir zamandaki yük değeri)		Ekstrem Yük Değeri (50 Yıl)	
	λ	COV	λ	COV
Ölü Yük	1.05	0.10	1.05	0.10
Hareketli Yük	0.24	0.65	1.00	0.18

Çizelge 7.1’de de ifade edildiği üzere ölü yük zamana bağlı olarak değişmemektedir. Yani her koşulda ölü yük için en yüksek yük değeri alınmaktadır. Bu durumda Turkstra [53-54] kuralı gereğince, hareketli yük için ortalama yük modelinin kullanılması gerekmektedir.

7.1.2. Güvenilirlik Analizi ve Hedef Güvenilirlik İndisi

Yük ve dayanım parametreleri rastgele değişken olduklarından yapı performansının güvenilirlik indisi (β) ile değerlendirilmesi uygun bir yöntemdir. Yapı güvenliğinin belirlenmesinde kullanılan sınır durum fonksiyonunun (g) genel formatı Denklem 7.3'te verilmiştir:

$$g = R - Q \leq 0 \quad \left\{ \begin{array}{ll} R - Q < 0 \rightarrow \text{güvenli olmayan durum} \\ R - Q = 0 \rightarrow \text{sınır durum} \\ R - Q > 0 \rightarrow \text{güvenli durum} \end{array} \right. \quad (7.3)$$

Burada R dayanımı, Q yük etkisini simgelemektedir. Q yük kombinasyonundan elde edilmektedir. Yapısal bir eleman dayanımının, bu eleman üzerine etkiyen yüklerden daha düşük olması durumunda ($R - Q < 0$) göçeceği düşünülmektedir. Bu durumda elemanın göçme olasılığı $P_f = P(R - Q < 0)$ denklemi ile bulunur. Güvenilirlik indisi (β), göçme olasılığının bir fonksiyonu olarak tanımlanmaktadır (Denklem 7.4-7.5). Φ^{-1} standart normal dağılım fonksiyonunun tersidir. μ_R ve μ_Q dayanım ve toplam yükün ortalama değerleri olup, σ_R ve σ_Q ise dayanım ve toplam yüklerin standart sapma değerleridir.

$$\beta = -\Phi^{-1}(P_f) \quad (7.4)$$

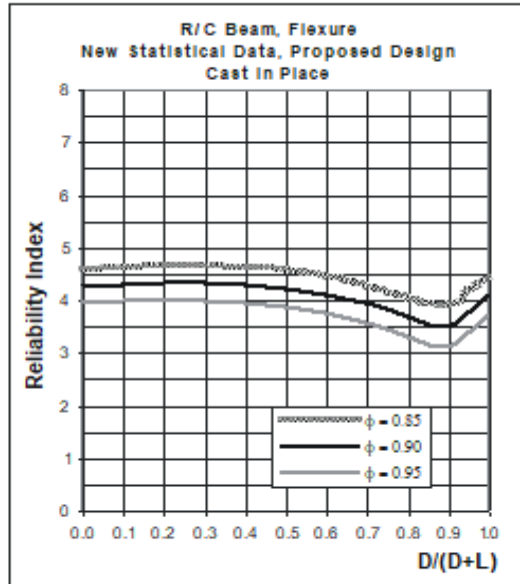
$$\beta = \frac{\mu_R - \mu_Q}{(\sigma_R^2 + \sigma_Q^2)^{\frac{1}{2}}} \quad (7.5)$$

ϕ katsayısının belirlenmesinde hedef güvenilirlik indisi (β_T) kullanılmaktadır. Yani $\beta \geq \beta_T$ koşulunu sağlayan değer, dayanım azaltma katsayısı olarak seçilmektedir. β_T ise iki farklı değişkene göre belirlenmektedir: i) yapısal eleman çeşiti ve göçme türü ii) emniyet payına (marjına) göre maliyetin artışı/azalışı (Nowak ve Collins [55], Madsen ve diğ. [56], Melchers [57]). Bu çalışmada, betonarme kirişlerin eğilme sınır durumu için kullanılan $\beta_T = 3.5$ değeri, literatürdeki çalışmalardan [48-49] alınmıştır.

Nowak ve Szerszen [49], güvenilirlik analizlerini Denklem 7.6’da belirtilen yük birleşimini kullanarak ve toplam yük içerisindeki ölü yük oranının farklı değerleri (ölü/toplam yük oranı sıfır ile bir arasında) için gerçekleştirmiştir. Bu analizlerden elde edilen grafik Şekil 7.1’dir.

$$Q = D + L \quad (7.6)$$

Bu analizlerde, ölü yük, toplam yükün %90’ı olduğunda güvenilirlik indisinin en düşük değere ulaştığı yani en kritik değere sahip olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca çelik donatılı betonarme kirişlerde, tüm ölü/toplam yük oranları için $\beta \geq \beta_T$ şartını sağlayan ϕ katsayısının 0.90 olduğu tespit edilmiştir.

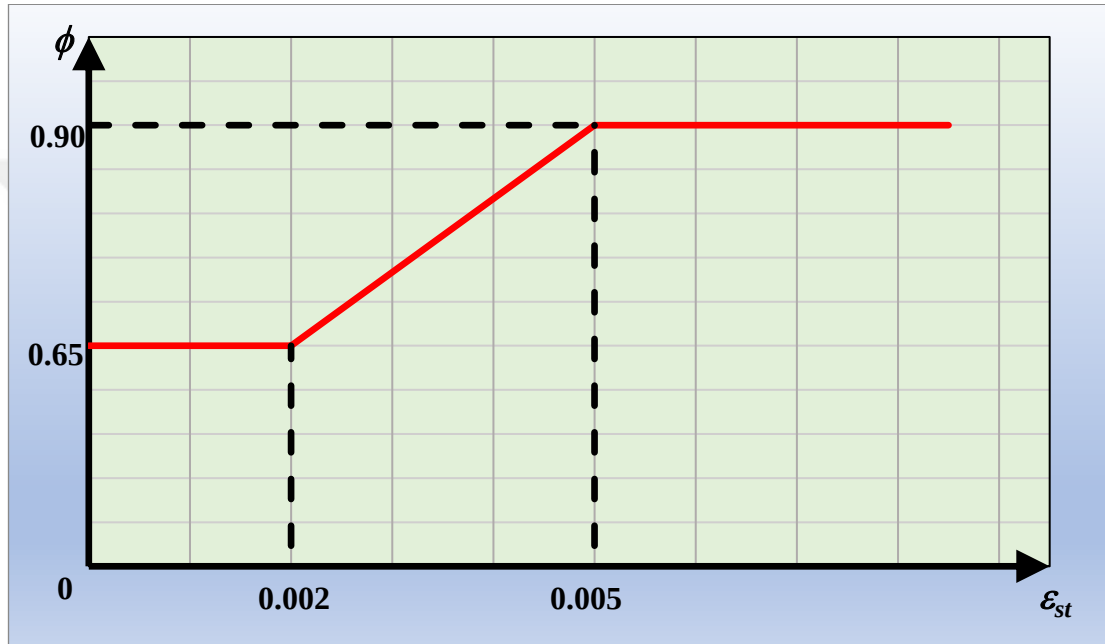


Şekil 7.1. Salt çelik donatılı kirişlerde farklı D/(D+L) oranlarına karşılık güvenilirlik indisi değerleri [49]

7.2. ACI 318M-11 [35] ‘de Dayanım Azaltma Katsayısı (ϕ)

Yönetmelikte, salt çelik donatılı (S420 sınıfı) betonarme kirişlerde ϕ katsayısının kirişlerin kırılma türüne göre değişkenlik gösterdiği ifade edilmektedir (Şekil 7.2).

Şekil 7.2’de yer alan grafikte yatay eksen taşıma gücü anında çelik donatıdaki birim deformasyonu (ϵ_{st}), dikey eksen ise ϕ katsayısını göstermektedir. Bu katsayı, yeterli sünekliğe sahip ($\epsilon_{st} > 0.005$) davranış göstererek kırılan denge altı donatılı betonarme kirişler için 0.90 iken, gevrek davranışa sahip olan denge üstü donatılı kirişlerde ($\epsilon_{st} < 0.002$) ise 0.65’tir. Taşıma gücü altında donatılar 0.002 ile 0.005 arasında bir birim deformasyon değerine sahip oluyorsa, ϕ katsayısı 0.65 ile 0.90 arasında doğrusal bir ilişki kurularak hesaplanmaktadır.



Şekil 7.2. Salt çelik donatılı kirişlerde ACI 318M-11 [35]’in önerdiği dayanım azaltma katsayısı değişimi

7.3. ACI 440.1R-15 [1] Yönetmeliğinin Referans Kabul Ettiği Çalışmalar

ACI 440.1R-15 [1] yönetmeliğinde yer alan dayanım azaltma katsayısı (ϕ) değerleri, Shield’in [58] çalışmasına dayanmaktadır. Shield [58] ise FRP donatılı kirişlerde güvenilirlik analizi için ACI 318M-11 [35]’den yararlanmıştır. Yük modelleri ve beton için aynı istatistiki veriler kullanılmıştır. FRP donatısı için ise literatürde yer alan [59] istatistiki verilerden faydalanılmıştır.

FRP donatısının düşük elastisite modülüne sahip olması nedeniyle, ACI 440.1R-15 [1] yorulma ve sünme problemlerine karşı ortalama FRP çekme dayanımının, çevresel dayanım azaltma faktörü (C_E) ile çarpılarak azaltılmasını önermektedir (Denklemler 7.7). Yönetmelikte bu katsayının lif tipi ve donatının maruz kaldığı koşullara göre nasıl değişkenlik gösterdiği Çizelge 7.2’de ifade edilmektedir.

$$f_{fu} = C_E f_{fu}^* \quad (7.7)$$

Bu ifadede yer alan f_{fu} tasarım çekme dayanımını, f_{fu}^* ise üretici tarafından garanti edilen dayanımı göstermektedir. Shield [58], GFRP donatılar için $C_E=0.80$ kabulü yaparak ve $Q=1.2D+1.6L$ yük kombinasyonu kullanarak güvenilirlik analizini gerçekleştirmiştir.

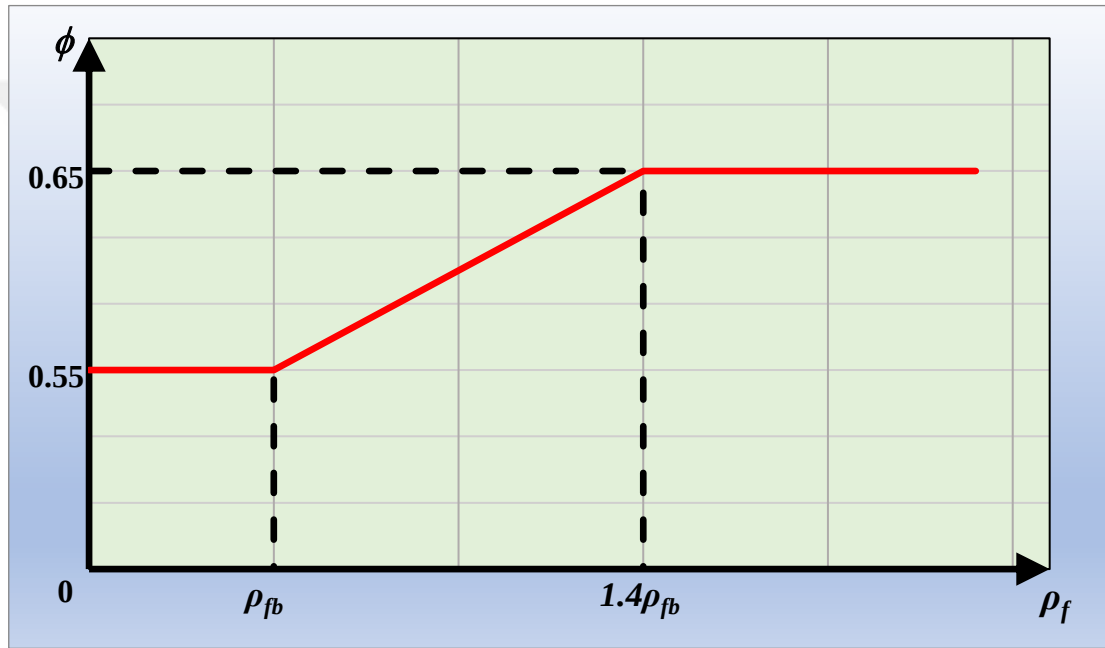
Çizelge 7.2. FRP tiplerine göre çevresel dayanım azaltma katsayısı

Maruz Kalınan Koşul	Lif Tipi	Çevresel Dayanım Azaltma Katsayısı (C_E)
Betonun toprak ya da havaya maruz kalmaması durumu	Karbon	1.0
	Cam	0.8
	Aramit	0.9
Betonun toprak ya da havaya maruz kalma durumu	Karbon	0.9
	Cam	0.7
	Aramit	0.8

7.4. ACI 440-1.R-15 [1]’da Dayanım Azaltma Katsayısı (ϕ)

Yönetmelikte, salt FRP donatılı kirişler için ϕ katsayısı kırılma türüne bağlı olacak şekilde ifade edilmektedir. Yatay ekseninde FRP donatı oranı, düşey ekseninde ise ϕ katsayısının bulunduğu (Şekil 7.3’te) grafik, bu ilişkiyi göstermektedir. Denge altı donatı oranına sahip salt FRP donatılı kirişlerde ϕ katsayısının 0.55 olduğu ifade edilmekte iken denge üstü donatı oranına sahip salt FRP donatılı kirişlerde bu katsayının daha büyük değerler aldığı gösterilmektedir. ACI 440.1R-15 [1] yönetmeliğinde, teorik olarak denge üstü donatı oranına sahip olarak tasarlanan birçok kirişin beklenen kırılma türünden farklı olarak donatıların kopması neticesinde taşıma

gücüne ulaştığı yani denge altı donatılı olarak kırıldığı ifade edilmektedir. Bu durumun, betonda ya da FRP donatılarda meydana gelebilecek mekanik özelliklerin kendi içindeki değişiminden kaynaklandığı belirtilmektedir. Ayrıca bu beklenmeyen kırılma durumları, genel olarak dengeli donatı oranı (ρ_{fb}) ile bu oranın 1.4 katına ($1.4\rho_{fb}$) sahip olan kirişlerde yoğunlaştığından, bu iki donatı oranı arası geçiş bölgesi tanımlanmıştır. Bu bölgede ϕ katsayısı, 0.55 ile 0.65 arasında doğrusal olarak değişmektedir. Dengeli donatı oranının 1.4 katına eşit ve bu orandan daha büyük donatı oranına sahip kirişlerde ise ($1.4\rho_{fb} \leq \rho_f$) bu katsayı 0.65'e eşittir.



Şekil 7.3. Salt FRP donatılı kirişlerde ACI 440-1.R-15 [1] önerdiği dayanım azaltma katsayısı değişimi

7.5. Hibrit FRP-Çelik Donatılı Kirişlerde Dayanım Azaltma Katsayısının (ϕ) Belirlenmesi

Şu ana değin, salt çelik ve salt FRP donatılı betonarme kirişlerin dayanım azaltma katsayılarının nasıl belirlendiği, ilgili yönetmeliklerde bu katsayının değişimi ve dayanım ve yük değişkenlerinden bahsedilmiştir. Bu bölümde, bahsi geçen tüm

çalışmalar ve yönetmelikler referans alınarak hibrit FRP-çelik donatılı kirişlerin dayanım azaltma katsayısı (ϕ) için formüller geliştirilecektir.

7.5.1. Dayanım Değişkenleri ve Kapasitesinin Belirlenmesi

Hibrit FRP-çelik donatılı kirişlerin dayanımını belirleyen bileşenler, beton, çelik ve FRP donatılardır. Literatürde bu malzemelere ait istatistiki veriler mevcut olup dayanım belirlenirken bu çalışmalardan alınan değerler kullanılmıştır.

Çalışmada tüm kirişlerde normal dayanımlı C30 sınıfı beton, S420 sınıfı çelik donatılar kullanılması kararlaştırılmıştır. Ayrıca deneysel çalışmamızda yer alan farklı mekanik özelliklere sahip iki tip cam elyaf donatı ile literatürde yer alan ve bu çalışmada kullanılmış donatılardan farklı mekanik özelliklere sahip olan GFRP donatı türü tercih edilmiştir. Çizelge 7.3-7.5'te bu üç dayanım değişkenine ait, Nowak ve Szerszen [48] ile Shield'in [58] çalışmalarından alınan istatistiki verilere dayalı olan karakteristik ve ortalama dayanımlara yer verilmiştir. Analizlerde kiriş net açıklığı 2.8 m, kiriş kesit ölçüleri 200x300 mm, donatıların elastisite modülleri ve kesit alanları ise sabit olarak alınmıştır.

Çizelge 7.3. Beton için istatistiki veriler

f_c (MPa) (Karakteristik)	f_c (MPa) (Ortalama)	λ	COV	Dağılım
30	34.2	1.14	0.10	Normal

Çizelge 7.4. Çelik donatı için istatistiki veriler

f_y (MPa) (Karakteristik)	f_y (MPa) (Ortalama)	λ	COV	Dağılım
420	480.9	1.145	0.065	Normal

Çizelge 7.5. FRP donatısı için istatistiki veriler

f_{fu} (MPa) (Karakteristik)	f_{fu}^* (MPa)	f_{fu} (MPa) (Ortalama)	E_f (GPa)	Çap (mm)	λ	COV	Dağılım
491.53	580	464.00	46	12.23	1.18	0.12	Normal
380.51	449	359.20	35	12.86			
639.83	755	604.00	41	15.9			

Güvenilirlik analizinde her kirişte için beton basınç dayanımı, çelik donatı akma dayanımı ve GFRP donatılarının çekme dayanımları kendi istatistiki dağılım ve değişkenleri kullanılarak, 5000'er adet olacak şekilde çoğaltılmıştır. Böylece her kirişten 5000'er yeni kiriş üretilerek eleman sayısı arttırılmıştır. Hibrit FRP-çelik donatılı kirişlerin dayanımları belirlenirken Bölüm 4'te yer alan denklemler ve malzeme modelleri kullanılarak geliştirilen bir Phyton yazılımı kullanılmıştır.

7.5.2. Analiz Edilecek Kirişlerin Seçilmesi

Dayanımına etki eden malzemelerin istatistiki değişim oranları ile hata faktörlerine bakılarak, en değişken özelliklere sahip malzemenin FRP donatısı, daha sonra beton ve en az değişkenliğe sahip olan malzemenin ise çelik donatılar olduğu görülebilir. Salt çelik donatılı kirişlerde ϕ katsayısının yüksek oluşu (0.90) çelik donatıların değişkenliğinin az olması ile açıklanırken, salt FRP donatılı kirişlerde bu katsayısının oldukça düşük olması (0.55-0.65) hem FRP donatısının değişkenliğinin fazla olması hem de çevresel dayanım azaltma faktörünün etkisi ile açıklanabilmektedir. Farklı iki tipte donatının yer aldığı hibrit FRP-çelik donatılı kirişlerin dayanım azaltma katsayısının (ϕ) ise salt çelik donatılı ve salt FRP donatılı kirişlerin dayanım azaltma katsayılarının arasında bir değere sahip olabileceği varsayımı yapılmıştır. Hatta toplam donatı alanı içerisinde bulunan çelik donatı miktarının bir etken olabileceği düşünülerek, bu değişkenin farklı değerleri için kirişler rastgele seçilmiştir.

Analiz edilecek kirişlerin seçimi için 200 adet in üzerinde bir kiriş havuzu oluşturulmuştur. Kiriş havuzu, çekme bölgesinde bulunan donatı çubuğu sayısı (3, 5 ve 6), çelik donatı çapı (8, 10, 12, 14, 16 mm), GFRP donatı çubuğu sayısı ve GFRP mekanik özellikleri değişkenlerinin farklı kombinasyonlarına göre teşkil edilmiştir. Bu kirişlerin tamamının kapasitelerinin Phyton programı ile doğru bir biçimde tahmin edildiği başka yazılımlar yardımıyla kontrol edilmiştir. Kiriş havuzundan toplam donatı alanı içerisindeki çelik donatı oranının farklı değerleri için rastgele 20 adet kiriş seçilerek güvenilirlik analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu kirişlere ait donatı detayları, donatı alanı ve oranları ile karakteristik kapasite değerleri Çizelge 7.6'da yer almaktadır

Çizelge 7.6. Güvenilirlik analizi gerçekleştirilen kirişlere ait kesit detayları ve kapasiteler

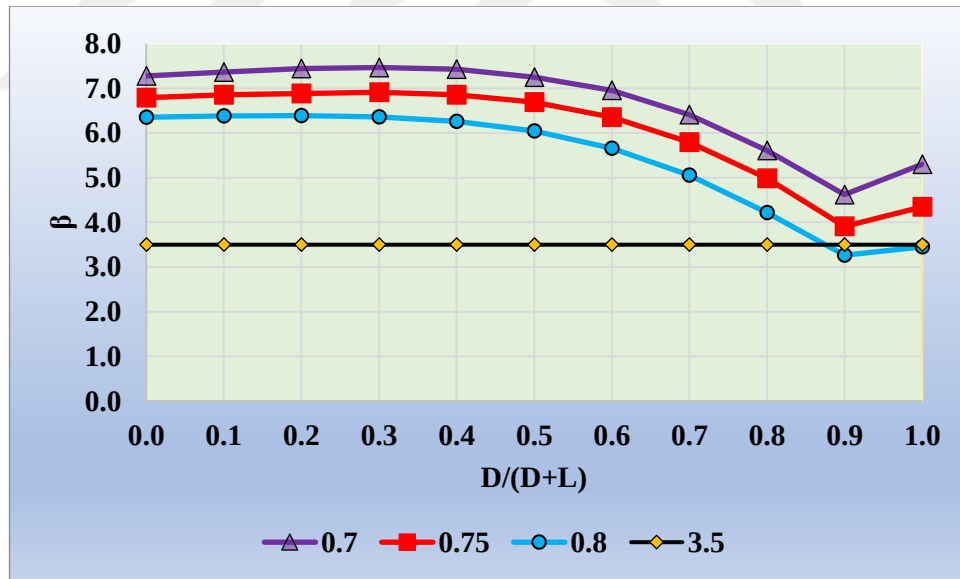
Kiriş Donatı Detayı	A_{st} (mm ²)	A_{frp} (mm ²)	A_{st}/A_{tot}	M_n (kN.m)
1φ8 Steel + 2φ15.9 GFRP	50.27	397.11	0.11	63.03
1φ8 Steel + 2φ12.86 GFRP	50.27	259.78	0.16	31.52
1φ8 Steel + 2φ12.23 GFRP	50.27	234.95	0.18	35.69
1φ12 Steel + 4φ12.23 GFRP	113.10	469.90	0.19	69.12
3φ8 Steel + 3φ15.9 GFRP	150.80	595.67	0.20	77.40
2φ8 Steel + 3φ12.86 GFRP	100.53	389.67	0.21	48.99
1φ12 Steel + 2φ15.9 GFRP	113.10	397.11	0.22	65.85
1φ16 Steel + 4φ12.23 GFRP	201.06	469.90	0.30	76.58
1φ14 Steel + 2φ12.23 GFRP	153.94	234.95	0.40	46.59
3φ12 Steel + 2φ15.9 GFRP	339.29	397.11	0.46	76.92
3φ12 Steel + 3φ12.23 GFRP	339.29	352.42	0.49	76.83
2φ16 Steel + 3φ12.86 GFRP	402.12	389.67	0.51	76.77
4φ8 Steel + 1φ12.86 GFRP	201.06	129.89	0.61	35.32
4φ10 Steel + 1φ15.9 GFRP	314.16	198.56	0.61	62.80
5φ12 Steel + 1φ15.9 GFRP	565.49	198.56	0.74	78.57
2φ16 Steel + 1φ12.23 GFRP	402.12	117.47	0.77	58.04
4φ12 Steel + 1φ12.86 GFRP	452.39	129.89	0.78	61.08
4φ12 Steel + 1φ12.23 GFRP	452.39	117.47	0.79	62.94
5φ12 Steel + 1φ12.86 GFRP	565.49	129.89	0.81	71.69
4φ14 Steel + 1φ12.86 GFRP	615.75	129.89	0.83	76.00

7.5.3. Yük modelleri ve Yük seçimi

Güvenilirlik analizi için $Q=1.2D+1.6L$ yük kombinasyonu kullanılmıştır. Analizler $D/(D+L)$ oranının 0 ile 1 arasında farklı değerleri için gerçekleştirilmiştir. Turkstra [53-54] kuralı gereğince ölü yükün her zaman en yüksek (ekstrem) değer alması nedeni ile hareketli yük için ortalama değer modeli kullanılmıştır. Ayrıca sabit yüklerin normal dağılıma ve hareketli yüklerin ortalama değer modelinin gama dağılımına sahip olduğu literatürde yer alan çalışmalar [50,60] tarafından ifade edilmektedir.

7.5.4. Güvenilirlik Analizi ve Sonuçları

Güvenilirlik analizleri neticesinde hedef güvenilirlik indisi olan 3.5'tan daha büyük güvenilirlik indisini sağlayan katsayı değeri, dayanım azaltma katsayısı olarak seçilmektedir. Bu kapsamda herhangi bir ϕ katsayısı için ϕM_n tasarım momenti hesaplanmıştır. Bu moment değerinin gerekli dayanıma eşit olabilmesi için $D/(D+L)$ oranının farklı değerleri de dikkate alınarak ölü ve hareketli yük değerleri belirlenmiş ve analizler bu yük değerleri için gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda her kirişte $D/(D+L)$ oranının farklı değerleri ve denenen her farklı ϕ katsayısı için analizler tekrarlanmıştır. Salt çelik ve salt FRP donatılı kirişlerdekine benzer olarak, hibrit FRP-çelik donatılı kirişlerde de en düşük güvenilirlik indisi değerleri $D/(D+L)=0.9$ olduğu durumda elde edilmiştir (Şekil 7.4). En kritik sonuçların bu yük oranında elde edilmesi nedeni ile analizlerin büyük kısmında sadece bu yük oranı kullanılarak ϕ katsayıları belirlenmiştir. Çizelge 7.7'de $D/(D+L)=0.9$ değeri için β 'nın 3.5'tan daha büyük olması koşulunu sağlayan ϕ katsayılarına yer verilmiştir.



Şekil 7.4. Hibrit donatılı bir kirişe (2 ϕ 16 Steel + 3 ϕ 12.86 GFRP) ait analiz sonucu

Çizelge 7.7. Güvenilirlik analizleri gerçekleştirilen kirişlere ait güvenilirlik indisleri ve dayanım azaltma katsayıları

Kiriş Donatı Detayı	Karakteristik Kırılma Modu	A_{st} (mm ²)	A_{frp} (mm ²)	A_{st}/A_{tot}	ϕ	β
1 ϕ 8 Steel + 2 ϕ 15.9 GFRP	Denge üstü	50.27	397.11	0.11	0.70	3.55
1 ϕ 8 Steel + 2 ϕ 12.86 GFRP	Denge altı	50.27	259.78	0.16	0.60	3.83
1 ϕ 8 Steel + 2 ϕ 12.23 GFRP	Denge altı	50.27	234.95	0.18	0.60	3.73
1 ϕ 12 Steel + 4 ϕ 12.23 GFRP	Denge altı	113.10	469.90	0.19	0.65	3.59
3 ϕ 8 Steel + 3 ϕ 15.9 GFRP	Denge üstü	150.80	595.67	0.20	0.75	4.01
2 ϕ 8 Steel + 3 ϕ 12.86 GFRP	Denge altı	100.53	389.67	0.21	0.65	3.60
1 ϕ 12 Steel + 2 ϕ 15.9 GFRP	Denge üstü	113.10	397.11	0.22	0.75	3.64
1 ϕ 16 Steel + 4 ϕ 12.23 GFRP	Denge altı	201.06	469.90	0.30	0.70	3.61
1 ϕ 14 Steel + 2 ϕ 12.23 GFRP	Denge altı	153.94	234.95	0.40	0.70	3.56
3 ϕ 12 Steel + 2 ϕ 15.9 GFRP	Denge üstü	339.29	397.11	0.46	0.80	3.66
3 ϕ 12 Steel + 3 ϕ 12.23 GFRP	Denge üstü	339.29	352.42	0.49	0.75	3.62
2 ϕ 16 Steel + 3 ϕ 12.86 GFRP	Denge üstü	402.12	389.67	0.51	0.75	3.91
4 ϕ 8 Steel + 1 ϕ 12.86 GFRP	Denge altı	201.06	129.89	0.61	0.75	3.82
4 ϕ 10 Steel + 1 ϕ 15.9 GFRP	Denge üstü	314.16	198.56	0.61	0.80	3.50
5 ϕ 12 Steel + 1 ϕ 15.9 GFRP	Denge üstü	565.49	198.56	0.74	0.80	3.91
2 ϕ 16 Steel + 1 ϕ 12.23 GFRP	Denge altı	402.12	117.47	0.77	0.80	3.52
4 ϕ 12 Steel + 1 ϕ 12.86 GFRP	Denge altı	452.39	129.89	0.78	0.80	3.59
4 ϕ 12 Steel + 1 ϕ 12.23 GFRP	Denge altı	452.39	117.47	0.79	0.80	3.53
5 ϕ 12 Steel + 1 ϕ 12.86 GFRP	Denge altı	565.49	129.89	0.81	0.80	3.71
4 ϕ 14 Steel + 1 ϕ 12.86 GFRP	Denge altı	615.75	129.89	0.83	0.80	3.74

Çizelge 7.7’de güvenilirlik analizi gerçekleştirilen kirişlere ait hedef güvenilirlik indisi değerini sağlayan dayanım azaltma katsayıları ile karakteristik kırılma modlarına yer verilmiştir. Çizelge dikkatli bir biçimde incelendiğinde, genel olarak toplam donatı oranı içerisindeki çelik donatı oranı ile ϕ katsayısı arasında doğrudan bir ilişki kurulamayacağı görülmektedir. Ancak, salt FRP ve çelik donatılı kirişlerde ϕ katsayısının kirişlerin kırılma moduna bağlı olarak ifade edildiği hatırlanacak olursa, hibrit donatılı kirişlerde de kırılma modu farklılığı göz önüne alınabilir ve toplam donatı içerisindeki çelik donatı oranı ile ϕ katsayısı arasında kırılma moduna göre genel bir ilişki kurulabilir. Denklem 7.8-7.9 sırası ile denge altı ve denge üstü kırılma moduna sahip kirişlerin dayanım azaltma katsayılarını vermektedir. Çizelge 7.8-7.9’da

sırası ile denge altı ve denge üstü donatılı hibrit kirişlere ait ϕ , β , ϕ_{Tahmin} değerlerine yer verilmiştir.

$$\phi_{Tahmin} = 0.55 + \frac{A_{st}}{A_{tot}} \cdot 0.30 \quad (7.8)$$

$$\phi_{Tahmin} = 0.65 + \frac{A_{st}}{A_{tot}} \cdot 0.20 \quad (7.9)$$

Çizelge 7.8. Denge altı hibrit donatılı kirişlerde güvenilirlik analizleri ve tahmin edilen dayanım azaltma katsayıları

Kirişler	A_{st}/A_{tot}	ϕ	β	ϕ_{Tahmin}	$\phi - \phi_{Tahmin}$
1 ϕ 8 Steel + 2 ϕ 12.86 GFRP	0.16	0.60	3.83	0.60	0.00
1 ϕ 8 Steel + 2 ϕ 12.23 GFRP	0.18	0.60	3.73	0.60	0.00
1 ϕ 12 Steel + 4 ϕ 12.23 GFRP	0.19	0.65	3.59	0.61	0.04
2 ϕ 8 Steel + 3 ϕ 12.86 GFRP	0.21	0.65	3.60	0.61	0.04
1 ϕ 16 Steel + 4 ϕ 12.23 GFRP	0.30	0.70	3.61	0.64	0.06
1 ϕ 14 Steel + 2 ϕ 12.23 GFRP	0.40	0.70	3.56	0.67	0.03
4 ϕ 8 Steel + 1 ϕ 12.86 GFRP	0.61	0.75	3.82	0.73	0.02
2 ϕ 16 Steel + 1 ϕ 12.23 GFRP	0.77	0.80	3.52	0.78	0.02
4 ϕ 12 Steel + 1 ϕ 12.86 GFRP	0.78	0.80	3.59	0.78	0.02
4 ϕ 12 Steel + 1 ϕ 12.23 GFRP	0.79	0.80	3.53	0.79	0.01
5 ϕ 12 Steel + 1 ϕ 12.86 GFRP	0.81	0.80	3.71	0.79	0.01
4 ϕ 14 Steel + 1 ϕ 12.86 GFRP	0.83	0.80	3.74	0.80	0.00

$\phi_{Tahmin} \rightarrow$ Denklem 7.8 kullanılarak

Çizelge 7.9. Denge üstü hibrit donatılı kirişlerde güvenilirlik analizleri ve tahmin edilen dayanım azaltma katsayıları

Kirişler	A_{st}/A_{tot}	ϕ	β	ϕ_{Tahmin}	$\phi - \phi_{Tahmin}$
1 ϕ 8 Steel + 2 ϕ 15.9 GFRP	0.16	0.60	3.83	0.60	0.00
3 ϕ 8 Steel + 3 ϕ 15.9 GFRP	0.18	0.60	3.73	0.60	0.00
1 ϕ 12 Steel + 2 ϕ 15.9 GFRP	0.19	0.65	3.59	0.61	0.04
3 ϕ 12 Steel + 2 ϕ 15.9 GFRP	0.21	0.65	3.60	0.61	0.04
3 ϕ 12 Steel + 3 ϕ 12.23 GFRP	0.30	0.70	3.61	0.64	0.06
2 ϕ 16 Steel + 3 ϕ 12.86 GFRP	0.40	0.70	3.56	0.67	0.03
4 ϕ 10 Steel + 1 ϕ 15.9 GFRP	0.81	0.80	3.71	0.79	0.01
5 ϕ 12 Steel + 1 ϕ 15.9 GFRP	0.83	0.80	3.74	0.80	0.00

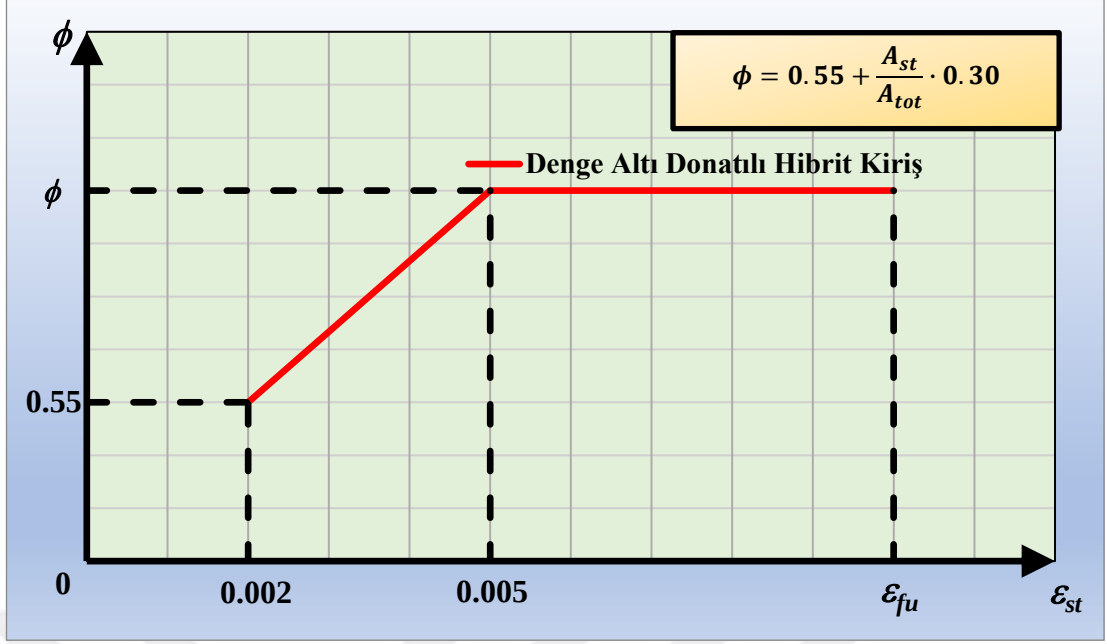
$\phi_{Tahmin} \rightarrow$ Denklem 7.9 kullanılarak

7.5.5. Hibrit Donatılı Kirişlerde Dayanım Azaltma Katsayısı (ϕ)

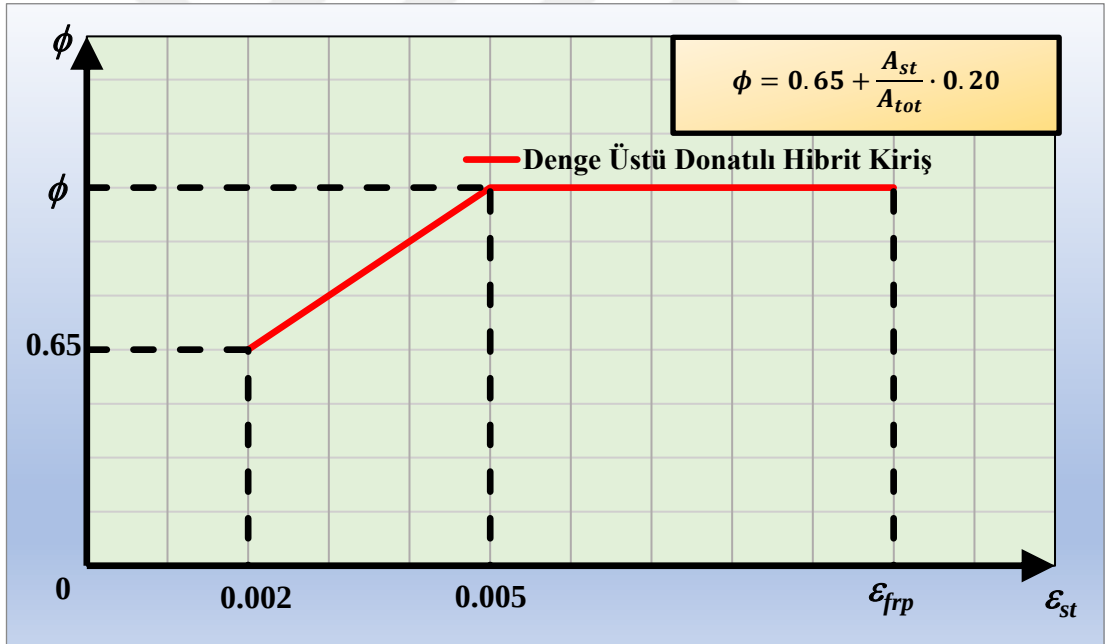
Hibrit donatılı kirişlerde ϕ katsayısı için çelik donatılı kirişlerde önerilen formata yakın bir ilişki kullanılmıştır. Yani düşey ekseninde dayanım azaltma katsayısı, yatay ekseninde ise çekme donatılarının taşıma gücü anındaki birim deformasyon değeri yer almaktadır (Şekil 7.5-7.6) Kırılma türünden bağımsız olmak üzere sünek kırılmanın garanti edilebilmesi adına, ϕ katsayısının en yüksek değeri, çelik ve FRP donatıların birim deformasyon değerinin 0.005 değerinin üzerine çıkması durumunda kullanılabilir. Taşıma gücüne ulaşıldığında çekme donatılarının birim deformasyon değerinin 0.005'ten daha küçük olduğu durumlarda ise geçiş bölgesinde verilen ifadeler kullanılarak ϕ katsayısı hesaplanacaktır. Bu durumda denge altı ve denge üstü donatılı kirişlerde ϕ katsayısı sırasıyla Denklem 7.10-7.11'deki ifadeler aracılığı ile hesaplanmaktadır.

$$\phi = \begin{cases} 0.55 + \frac{A_{st}}{A_{tot}} \cdot 0.30 \rightarrow 0.005 < \varepsilon_{st} \\ 0.55 + \frac{A_{st}}{A_{tot}} \cdot (\varepsilon_{st} - 0.002) \cdot 100 \rightarrow 0.002 < \varepsilon_{st} < 0.005 \end{cases} \quad (7.10)$$

$$\phi = \begin{cases} 0.65 + \frac{A_{st}}{A_{tot}} \cdot 0.20 \rightarrow 0.005 < \varepsilon_{st} \\ 0.65 + \frac{A_{st}}{A_{tot}} \cdot (\varepsilon_{st} - 0.002) \cdot \frac{200}{3} \rightarrow 0.002 < \varepsilon_{st} < 0.005 \end{cases} \quad (7.11)$$



Şekil 7.5. Denge altı hibrit donatılı kirişler için dayanım azaltma katsayısı ilişkisi



Şekil 7.6. Denge üstü hibrit donatılı kirişler için dayanım azaltma katsayısı ilişkisi

8. SONUÇLAR

Hibrit FRP-çelik donatılı kirişlerin eğilme davranışlarının anlaşılabilmesi amacıyla gerçekleştirilen bu çalışmada 3 farklı deney grubunda yer alan toplam 25 adet basit mesnetli kirişin dört noktalı eğilme deneyi gerçekleştirilmiştir. FRP donatı bakımından denge altı donatılı, dengeli donatılı ve denge üstü donatılı olacak şekilde tasarlanmış ve GFRP ile BFRP olmak üzere iki farklı çeşit FRP donatı ile hazırlanmış deney kirişlerinin deneysel sonuçları kapsamlı olarak incelenmiştir. Hibrit donatılı kirişlerin taşıma gücü kapasiteleri, ilk çatlama yükleri, kırılma modları, yük-sehim davranışları, süneklikleri ve dayanım azaltma katsayısı analitik olarak da incelenerek, bu konuların her biri üstüne detaylı çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Her deney elemanı grubunda yer alan referans salt çelik ve salt FRP donatılı kirişler de, hibrit FRP-çelik donatılı betonarme kiriş davranışının daha anlaşılır bir biçimde incelenmesi ve açıklanmasına olanak sağlamıştır. Bu araştırma kapsamında gerçekleştirilen deneysel ve analitik çalışmalardan elde edilen başlıca sonuçlar aşağıda sunulmuştur:

1. Hibrit FRP-çelik donatılı kirişlerin yük-sehim eğrileri üç doğrusal bölgeye yakınsanabilir. Kirişlerin yük-deplasman eğrisi eğiminde, ilk çatlama noktası ve çelik donatının aktığı yük seviyesinde ani değişim (azalma) gözlemlenmektedir. Hibrit donatılı kirişlerde FRP donatı oranı arttıkça aynı yükler altında daha büyük deformasyonlar meydana gelmekte ve genel olarak şekil değiştirme kapasitesi (deformabilitesi) artış göstermektedir.
2. Önerilen teorik model ile hibrit donatılı kirişlerin taşıma gücü kapasiteleri ve kırılma modları deneysel verilere çok yakın bir biçimde tahmin edilmiştir. Özellikle denge üstü kırılma moduna sahip olan kirişlerde taşıma gücü kapasiteleri denge altı kırılma moduna sahip olan kirişlere göre deneysel verilere daha yakın bir biçimde tahmin edilmiştir. Bunun temel sebebi, denge üstü hibrit donatılı kirişlerin taşıma güçlerinin değişkenliği daha az olan beton tarafından kontrol edilmesi ve mekanik özellikleri yüksek değişkenlik gösteren FRP donatıların kapasitelerinin sınırlı kullanımıdır. Başka bir ifade ile, denge altı hibrit donatılı kirişlerde taşıma gücüne ulaşıldığı anda FRP donatı kapasitesinin tamamı kullanılmış olur ve dolayısıyla FRP'nin değişken malzeme özellikleri kapasiteye daha çok yansır.

3. Kirişlerin ilk çatlama yükleri tahmininde üç farklı eğilmede çekme dayanımı (deneysel, Eurocode 2 [34] ve ACI 318M-11 [35]) ve iki farklı başlangıç kesit atalet momenti ifadesi (brüt ve çatlamamış dönüştürülmüş kesit) kullanılmıştır. Salt çelik donatılı kirişlerde en yakın tahminler Eurocode 2 [34] eğilmede çekme dayanımı ile çatlamamış dönüştürülmüş kesit atalet momenti ifadeleri kullanılarak elde edilmiştir. Brüt kesit atalet momenti hesabında elastisite modülü yüksek olan çelik donatı katkısının ihmal edilmesi, salt çelik donatılı kiriş sehim tahminlerinin deneysel verilerden oldukça farklı olmalarına neden olmuştur. Salt FRP donatılı kirişlerde deneysel çatlama yüküne en yakın tahminler, prizmatik numune eğilmede çekme dayanımı ve brüt kesit atalet momenti ifadeleri kullanılarak elde edilmiştir. Özellikle GFRP donatılı kirişlerde ilk çatlama yükü analitik değerleri, deneysel değerleri önemli ölçüde aşmaktadır. Tahminlerde FRP donatısı elastisite modülünün betonun elastisite modülüne oldukça yakın olması nedeni ile her iki başlangıç atalet momenti ifadesi ile gerçekleştirilen tahminler arasında büyük farklar gözlemlenmemiştir. Analitik eğilmede çekme dayanımı ifadeleri arasında ise, ACI 318M-11 [35] eğilmede çekme dayanımı ifadesi ile brüt kesit atalet momenti ifadesinin kullanımı, salt FRP donatılı kiriş sehimlerinin yakın bir biçimde tahmin edilmesini sağlamıştır. Denge üstü hibrit donatılı kirişlerde en yakın tahminler çatlamamış dönüştürülmüş kesit atalet momenti ve prizmatik numune eğilmede çekme dayanımı kullanılarak elde edilmiştir. Yönetmelik ifadeleri arasında ise ACI 318M-11 [35] eğilmede çekme dayanımı ve çatlamamış dönüştürülmüş kesit atalet momenti ifadeleri kullanılarak deneysel verilere en yakın değerler elde edilmiştir. Denge altı hibrit donatılı kirişlerde deneysel verilere en yakın sonuçlar ACI 318M-11 [35] eğilmede çekme dayanımı ve çatlamamış dönüştürülmüş kesit atalet momenti ifadeleri kullanılarak elde edilmiştir. Denge altı donatılı kirişlerde tahminler genellikle deneysel verilerden daha düşük yani daha güvenli tarafta kalırken denge üstü hibrit donatılı kirişlerde ise tahminler deneysel verilerden daha büyük yani güvenli olmayan tarafta kalmaktadır.
4. Hibrit donatılı kirişlerin sehim tahminlerinde Bischoff etkili atalet momenti ifadesi kullanılmıştır. Deformasyon tahminleri için kesitin başlangıçta sahip olduğu iki farklı atalet momenti ifadesi (brüt ve çatlamamış dönüştürülmüş

kesit atalet momenti) göz önünde bulundurulmuştur. Ayrıca elastisite modülü için iki farklı yaklaşım (ACI 318M-11 [35] elastisite modülü ve Sekant modülü) göz önüne alınmıştır. Hibrit donatılı ve salt FRP donatılı kirişlerde sekant modülünün kullanılması neticesinde, ACI 318M-11 [35] ifadesi ile gerçekleştirilen tahminlere göre deneysel eğrilere daha yakın tahminler elde edilmiştir. Ayrıca, analitik eğrilerin deneysel eğrilerle uyumunun ilk çatlama yükünün doğruluğu ile yakından ilişkili olması sebebiyle, başlangıç atalet momenti olarak hibrit donatılı kirişlerde çatlamamış kesit atalet momenti, salt FRP donatılı kirişlerde ise brüt kesit atalet momenti ifadesinin kullanılması önerilmiştir.

5. Klasik yöntemler ile yalnızca akma noktasına kadar deformasyon tahminleri yapılabilmektedir. Yani sehim hesapları, elastik bölgedeki deformasyonların tahmini ile sınırlı kalmaktadır. Ancak, hibrit donatılı kirişlerde çelik donatılarda akma meydana gelse dahi FRP donatılar kiriş taşıma gücüne ulaşana değin elastik davranış göstermektedir. Ayrıca, FRP donatı oranı düşük hibrit donatılı kirişlerde akma düşük yük seviyelerinde meydana gelmekte ve klasik sehim hesap yöntemleriyle bu kirişlerin yük-deplasman ilişkilerinin çok küçük bir bölgesi tahmin edilebilmektedir. Tüm bu etkenler göz önünde bulundurularak, çalışmada hibrit donatılı kirişler için çelik donatıların akmasından sonraki deformasyonların tahminini içeren bir yöntem önerilmiştir. Bu yöntem ile elde edilen hibrit donatılı kirişlerin deformasyon tahminlerinin deneysel verilerle büyük uyum içinde olduğu gözlemlenmiştir. Çalışmada salt FRP donatılı kirişler için de benzer bir yöntem geliştirilmiş ve tahminlerin deneysel eğrilerle uyumu gözlemlenmiştir.
6. Hibrit donatılı kirişlerde FRP donatı oranı arttıkça akma daha düşük yük seviyelerinde meydana gelmekte ve kiriş deformasyon kapasiteleri artış eğilimi göstermektedir. Bu sebeple, klasik deformasyon tanımları kullanılarak hibrit donatılı kirişlerin süneklikleri değerlendirildiğinde FRP donatı oranı arttıkça süneklik değerlerinin arttığı sonucuna ulaşılmaktadır. Klasik süneklik tanımlarının oldukça gevrek bir malzeme olan FRP donatısının oranca fazla bulunduğu hibrit donatılı kirişlerin daha sünek olduğu sonucunu vermesi bu süneklik tanımlarının hibrit FRP/çelik donatılı kirişler için uygun olmadığını göstermektedir. Bu sebeple literatürde yer alan farklı süneklik tanımları ile

hibrit donatılı kirişlerin süneklikleri değerlendirilmiş ve en uygun tanım elde edilmiştir. Naaman ve Jeong [40] tarafından önerilen ve tüketilen toplam enerji içindeki elastik enerji oranını dikkate alan süneklik tanımı üzerinde yapılan bir düzenleme ile hibrit donatılı kirişler için un uygun süneklik tanımı elde edilmiştir. Bu tanıma göre salt çelik donatılı kirişler en sünek, salt FRP donatılı kirişler ise en gevrek eğilme davranışını göstermektedirler. Ayrıca FRP donatı oranı arttıkça süneklik değerleri kademeli olarak düşüş göstermektedir.

7. Bazı süneklik tanımlarında, hibrit donatılı kirişlerde FRP donatı oranının artmasıyla süneklik değerlerinin artması bu kirişlerin daha sünek olduğunu değil elastisite modülü düşük olan FRP malzemesinin kirişin deformasyon miktarını arttırdığını göstermektedir. Bu nedenle bu tür sonuçlar veren tanımların süneklik değil birer deformabilite tanımı olduğu düşünülmektedir.
8. Bu çalışma kapsamında, yönetmeliklerde yer alan salt çelik ve salt FRP donatılı betonarme kiriş dayanım azaltma katsayısı ifadeleri incelenmiş ve bu ifadelerin yeniden düzenlenmesi ile hibrit FRP-çelik donatılı betonarme kirişler için dayanım azaltma katsayısı formülleri geliştirilmiştir. Bu bağlamda, denge altı ve denge üstü donatılı hibrit kirişler için ayrı ifadeler önerilmiş ve dayanım azaltma katsayısı, salt çelik donatılı kirişlerde olduğu gibi taşıma gücüne karşılık gelen en dış çekme donatı katmanı birim deformasyon değerine dayalı olarak ifade edilmiştir.

Bu çalışma kapsamında önerilen bütün analitik yöntem ve formüller, mevcut deneysel veriler ışığında güncellenmiş ve kontrol edilmiştir. Gelecekte yapılacak çalışmalarla, geliştirilen bu analitik ifadelerin doğruluğu araştırılmalı ve gerekirse düzenlemeler yapılmalıdır. Ayrıca, bu araştırmanın deneysel kısmında sadece GFRP ve BFRP polimer donatı çeşitleri kullanılmıştır. Gelecekte diğer lif türüne (AFRP, CFRP, VFRP, vs) ve farklı yüzey özelliklerine (oluklu, sargılı, nervürlü, düz, kumlu ve bunları kombinasyonları) sahip hibrit donatılı kirişlerin deneyleri yardımıyla bu çalışmanın sonuçlarına ve bulgularına katkılar yapılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] ACI 440 1R-15, Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Bars. American Concrete Institute (ACI), 2015.
- [2] CSA S806-12, Design and Construction of Building Structures with Fibre-Reinforced Polymers. Canadian Standards Association (CSA), 2012.
- [3] ISIS Canada, Reinforcing Concrete Structures with Fibre-Reinforced Polymers. Intelligent Sensing for Innovative Structures (ISIS), 2007.
- [4] Aiello, M. A. and Ombres, L., Structural Performances of Concrete Beams with Hybrid (Fiber-Reinforced Polymer-Steel) Reinforcements. Journal of Composites for Construction., 6(2):133-140, 2002.
- [5] ACI 440R-96, 440R-96: Report on Fiber Reinforced Plastic Reinforcement for Concrete Structures. American Concrete Institute (ACI), 1996(b).
- [6] Faza, S.S., and GangaRao, H.V.S., Pre- and post-cracking deflection behavior of concrete beams reinforced with fiber-reinforced plastic rebars. Proc., 1st Int. Conf. on Advanced Composite Materials in Bridges and Structures, Canadian Society for Civil Engineering, Montre'al, 129–137, 1992.
- [7] Vijay, P.V., and GangaRao, H.V.S., A unified limit state approach using deformability factors in concrete beams reinforced with GFRP bars. Proc., 4th Materials Conf., Materials for the new millennium, 657–665, 1996.
- [8] Leung, H.Y. and Balendran, R.V., Flexural behaviour of concrete beams internally reinforced with GFRP rods and steel rebars. Structural Survey, 21(4): 146-157, 2003.

- [9] Qu, W., Zhang, X., Huang, H., Flexural Behavior of Concrete Beams Reinforced with Hybrid (GFRP and Steel) Bars. *Journal of Composites for Construction*, 13(5): 350-359, 2009.
- [10] Bischoff, P. H., Deflection calculation of FRP reinforced concrete beams based on modifications to the existing Branson equation. *Journal of Composites for Construction*, 11(1): 4–14, 2007.
- [11] Nayal, R., and Rasheed, H. A., Tension stiffening model for concrete beams reinforced with steel and FRP bars. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 18(6), 831–841, 2006.
- [12] Lau, D., Pam, H.J. , Experimental study of hybrid FRP reinforced concrete beams. *Engineering Structures*, 32:3857–3865, 2010.
- [13] Safan, M.A., Flexural Behavior and Design of Steel-GFRP Reinforced Concrete Beams. *ACI Materials Journal*, 110(6): 677-685, 2013.
- [14] Yinghao, L., Yong, Y., Arrangement of hybrid rebars on flexural behavior of HSC beams. *Composites: Part B*, 45: 22-31, 2013.
- [15] Bischoff, P.H., Reevaluation of Deflection Prediction for Concrete Beams Reinforced with Steel and Fiber Reinforced Polymer Bars. *Journal of Structural Engineering*, 131(5): 752-767, May 1, 2005.
- [16] Yoon, Y.S. et al., Flexural strength and deflection characteristics of high strength concrete beams with hybrid FRP and steel bar reinforcement. In: 10th International symposium on fiber-reinforced polymer reinforcement for concrete structures 2011, FRPRCS-10, in conjunction with the ACI Spring 2011 Convention. Tampa (FL, United States)/38800 Country Club Drive, Farmington Hills, MI 48331, United States: American Concrete Institute; 2011.

- [17] M. Yaz, Betonarme Kirişlerde Cam Elyaf Donatıların Eğilme Davranışına Etkisi. Yüksek Lisans Tezi. Kırıkkale Üniversitesi, Kırıkkale, 2001.
- [18] Ge, W., Zhang, J. Cao, D., Tu, Y., Flexural behaviors of hybrid concrete beams reinforced with BFRP bars and steel bars. *Construction and Building Materials*, 87: 28–37, 2015.
- [19] Fortran 90-ANSI X3.198-199x American National Standards Institute, American National Standard Programming Language Fortran, 1990.
- [20] Hawileh, R.A., Finite element modeling of reinforced concrete beams with a hybrid combination of steel and aramid reinforcement. *Materials and Design*, 65:831–839, 2015.
- [21] ANSYS – Release Version 12. A Finite element computer software and user manual for nonlinear structural analysis. Canonsburg (PA): ANSYS Inc.; 2009.
- [22] Kara, I.F., Ashour, A.F., Köroğlu, M.A., Flexural behavior of hybrid FRP/steel reinforced concrete beams. *Composite Structures*, 129:111–121, 2015.
- [23] Refai, A.E., Abed, F., Al-Rahmani, A., Structural performance and serviceability of concrete beams reinforced with hybrid (GFRP and steel) bars. *Construction and Building Materials*, 96:518-539, 2015.
- [24] CSA S6-10, Canadian highway bridge design code. Canadian Standards Association (CSA), 2010.
- [25] Pang, L., Qu, W., Zhu, P., Xu, J., Design Propositions for Hybrid FRP-Steel Reinforced Concrete Beams. *J. Compos. Constr.*, 20(4): 1-9, 2015.
- [26] ACI 318M-05, Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary. American Concrete Institute (ACI), 2005.

- [27] Bencardino, F., Condello, A., Ombres, L., Numerical and analytical modeling of concrete beams with steel, FRP and hybrid FRP-steel reinforcements. *Composite Structures*, 140: 53-65, 2016.
- [28] CNR DT 203/2006, Guide for design and construction of concrete structures reinforced with fiber-reinforced polymer bars. Rome, Italy: Italian National Research Council, 2006.
- [29] ABAQUS Finite Element Code. Hibbitt. RI: Karlsson and Sorenden Inc: 2011.
- [30] Bischoff, P.H., Paixao, R., Tension stiffening and cracking of concrete reinforced with glass fiber reinforced polymer (GFRP) bars. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 31: 579-588, 2004.
- [31] Qin, R., Zhou, A., Lau, D., Effect of reinforcement ratio on the flexural performance of hybrid FRP reinforced concrete beams. *Composites Part B*, 108:200-209, 2017.
- [32] Todeschini, C.E., Bianchini, A.C., Kesler, C.E., Behaviour of concrete columns reinforced with high strength steels. *ACI J.*, 61(6), 701-716, 1964.
- [33] ASTM C78 / C78M-18, Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading). ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018.
- [34] Comité Européen de Normalisation (CEN), prEN 1992-1-1:2004 (Eurocode 2): Design of Concrete Structures - Part 1-1 : General Rules and Rules for Buildings. European Committee for Standardization (CEN), Brussels, Belgium, 2004.
- [35] ACI Committee 318M, Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318M-11) and Commentary. American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, U.S.A., 2011.

- [36] Branson, D. E., Instantaneous and Time-Dependent Deflections of Simple and Continuous Reinforced Concrete Beams. HPR Report No. 7, Part 1, pp. 1-78, Alabama Highway Department, Bureau of Public Roads, Alabama, 1965.
- [37] TS500, Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2000.
- [38] Hognestad, E., A study of combined bending and axial load in R.C. members. Univ. Illinois Eng. Exp. Stat. Bull. 399(2): 36-57, 1951.
- [39] European Committee for Standardization, CEN, prEN 1998-1:2003 (Eurocode 8): Design of Structures for Earthquake Resistance - Part 1: General Rules, Seismic Actions and Rules for Buildings. European Committee for Standardization (CEN), Brussels, Belgium, 2003.
- [40] Naaman, A.E. and Jeong, S.M., Structural ductibility of concrete beams prestressed with FRP tendons. Non-metallic (FRP) reinforcement for concrete structures, L. Taerwe, ed., E&FN Spon, London, 379–386, 1995.
- [41] Abdelrahman, A.A., Tadros, G. and Rizkalla S. H., Test Model for the First Canadian Smart Highway Bridge. ACI Structural Journal, 92(4): Title no. 92-843, 1995.
- [42] Spadea, G., Swamy, R.N., Fellow, ASCE, Bencardino, F., Strength And Ductility of RC Beams Repaired With Bonded CFRP Laminates. Journal of Bridge Engineering, 6(5): 349-355, 2001.
- [43] Tomlinson, D., Fam, a., ASCE, M., Performance of Concrete Beams Reinforced with Basalt FRP for Flexure and Shear. Journal of Composites for Construction, ASCE, ISSN 1090-0268/04014036(10), 2014.

- [44] Jaeger, L.G., Mufti, A.A., Tadros, G., Balanced section, ductility and deformability in concrete with FRP reinforcement. Technical Univ. of Nova Scotia, Halifax, NS, Canada, 1995.
- [45] Vijay, P., GangaRao, V., Bending behavior and deformability of glass fiber reinforced polymer reinforced concrete members. ACI Structural Journal, 98(6): 834-842, 2001.
- [46] Zou, P.X.W., Flexural Behavior and Deformability of Fiber Reinforced Polymer Prestressed Concrete Beams. Journal of composites for Construction, 7:275-284, 2003.
- [47] Grace, N.F., Soliman, A.K., Abdel-Sayed, G., Saleh, K.R., Behavior and Ductility of Simple and Continuous FRP Reinforced Beams. Journal of composites for Construction, 2:186-194, 1998.
- [48] Nowak, A.S. and Szerszen, M.M., Calibration of design code for buildings (ACI 318): Part 1-Statistical models for resistance. ACI Structural Journal, 100(3): 377-382, 2003.
- [49] Szerszen, M.M. and Nowak, A.S., and Calibration of design code for buildings (ACI 318): Part 2-Reliability analysis and resistance factors. ACI Structural Journal, 100(3):383-391, 2003.
- [50] Ellingwood, B., Galambos, T.V., MacGregor, J.G. and Cornell, C.A., Development of a Probability Based Load Criterion for American National Standard A58. NBS Special Report 577, U.S. Department of Commerce, National Bureau of Standards, 1980.
- [51] Ellingwood, B. and Rosowsky, D., Combining Snow and Earthquake Loads for Limit States Design. ASCE Journal of Structural Engineering, 122(11): 1364-1368, 1996.

- [52] Nowak, A.S., Calibration of LRFD Bridge Design Code. NCHRP Report 368, Transportation Research Board, Washington, D.C., 1999.
- [53] Turkstra, C.J., Theory of Structural Design Decisions. Solid Mechanics Study No. 2, University of Waterloo, Waterloo, Canada, 1970.
- [54] Turkstra, C.J. and Madsen, H.O., Load Combinations in Codified Structural Design. Proceedings of ASCE, Journal of Structural Division, 106(12): 2527-2543, 1980.
- [55] Nowak, A.S. and Collins, K.R., Reliability of Structures. McGraw-Hill New York, 2000.
- [56] Madsen, H.O., Krenk, S. and Lind, N.C., Methods of structural safety. Prentice-Hall, New Jersey, 1986.
- [57] Melchers, R.E., Structural reliability analysis and prediction. Ellis Horwood Limited, 1987.
- [58] Shield, C., On the reliability of FRP reinforced concrete. Proceedings of US-Japan Workshop on Life Cycle Assessment of Sustainable Infrastructure Materials Sapporo, October 21-22, Japan, 2009.
- [59] P. Gulbrandsen, Reliability Analysis of the Flexural Capacity of Fiber Reinforced Polymer Bars in Concrete Beams, Masters of Science Thesis, University of Minnesota, Minnesota, 2005.
- [60] Corotis, R.B. and Doshi V.A., Probability models for live load survey results. Journal of the Structural Division (ASCE), 103(6): 1257-1274, 1977.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : SARUHAN KARTAL
Doğum Tarihi : 07.02.1989
Yabancı Dil : İNGİLİZCE

Eğitim Durumu

Lisans : KIRIKKALE ÜNİVERSİTESİ (İnşaat Mühendisliği)
Yüksek Lisans : KIRIKKALE ÜNİVERSİTESİ (İnşaat Müh. Anabilim Dalı)

Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl/Yıllar

Kutay Bir Yapı Denetim (2012/2013)
Kare Yapı Denetim (2013/2014)
Kırıkkale Üniversitesi/Mühendislik Fakültesi (2014/-)

Yayınları (Alan indeksli)

- Kalkan, İ., Kartal, S., Torsional Rigidities of Reinforced of Concrete Beams Subjected to Elastic Lateral Torsional Buckling. International Journal of Civil, Environmental Engineering Vol: 11, No: 7,2017.
- Sevim, Ö., Filazi, A., Toprak, B., Kartal, S., Investigating of Mechanical Properties of Mortars Based on Fly Ash and Blast Furnace Slag Activated with Alkali. International Journal of Advanced Engineering Research and Science, Vol.4, No. 2, pp.091-094, 2017.
- Kartal, S., Kalkan, İ., First Cracking Moments of Hybrid Fiber Reinforced Polymer-Steel Reinforced Concrete Beams. International Journal of Civil and Environmental Engineering Vol:13, No:9, 2019.
- Başaran, B., Kartal, S., Kalkan, İ., GFRP Donatı-Beton Arasındaki Aderans Gerilmesinin Sıyrılma Göçme Tipi ile Sonuçlanan Çekip Çıkarma Deneyleri ile Tespiti. Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering, Vol:24, No:2, 2019.

EKLER

EK-1

Bu ek kısmında, deneysel çalışma kapsamında yer alan kirişlerin yerinde ölçülen boyutları Çizelge Ek-1.1-Ek.1.14'te detaylı olarak gösterilmektedir. Bu çizelgelerde verilen değerlerin ortalamaları, analitik hesaplarda kullanılmıştır.

Çizelge EK-1.1. S6 Referans kirişine ait kesit ölçümleri

S6 Referans Kirişi					
Yükseklik Ölçümleri (b) (mm)			Genişlik Ölçümleri (a) (mm)		
A Bölgesi	B Bölgesi	C Bölgesi	A Bölgesi	B Bölgesi	C Bölgesi
304	305	302	200	199	199
303	305	301	200	200	199
303	303	300	201	200	200
303	304	304	201	201	199
302	301	300	200	199	198
304	303	304			
305	302	300			
303.29		Ortalama	199.80		

Çizelge EK-1.2. G1S5 kirişine ait kesit ölçümleri

G1S5 Kirişi					
Yükseklik Ölçümleri (b) (mm)			Genişlik Ölçümleri (a) (mm)		
A Bölgesi	B Bölgesi	C Bölgesi	A Bölgesi	B Bölgesi	C Bölgesi
302	301	302	200	202	200
305	303	300	200	201	200
305	304	301	202	200	199
303	304	302	201	201	205
302	299	303	201	200	198
308	302	305			
301	300	304			
301.86		Ortalama	200.80		

Çizelge EK-1.3. G2S4 kirişine ait kesit ölçümleri

G2S4 Kirişi					
Yükseklik Ölçümleri (b) (mm)			Genişlik Ölçümleri (a) (mm)		
A Bölgesi	B Bölgesi	C Bölgesi	A Bölgesi	B Bölgesi	C Bölgesi
302	301	303	200	200	201
303	303	300	202	199	201
303	302	304	200	200	201
302	301	302	199	200	200
304	300	300	199	200	200
303	301	302			
303	300	300			
301.14		Ortalama		199.80	

Çizelge EK-1.4. G3S3 kirişine ait kesit ölçümleri

G3S3 Kirişi					
Yükseklik Ölçümleri (b) (mm)			Genişlik Ölçümleri (a) (mm)		
A Bölgesi	B Bölgesi	C Bölgesi	A Bölgesi	B Bölgesi	C Bölgesi
305	306	304	199	200	199
303	301	302	199	200	199
306	307	301	200	201	200
305	306	302	200	201	201
305	304	303	200	201	201
307	303	302			
307	304	301			
304.43		Ortalama		200.6	

Çizelge EK-1.5. G4S2 kirişine ait kesit ölçümleri

G4S2 Kirişi					
Yükseklik Ölçümleri (b) (mm)			Genişlik Ölçümleri (a) (mm)		
A Bölgesi	B Bölgesi	C Bölgesi	A Bölgesi	B Bölgesi	C Bölgesi
303	305	305	200	199	203
303	307	303	200	199	201
303	308	302	200	198	201
304	305	300	199	198	200
305	301	300	201	199	200
307	302	303			
304	304	305			
304.57		Ortalama		198.6	

Çizelge EK-1.6. G5S1 kirişine ait kesit ölçümleri

G5S1 Kirişi					
Yükseklik Ölçümleri (b) (mm)			Genişlik Ölçümleri (a) (mm)		
A Bölgesi	B Bölgesi	C Bölgesi	A Bölgesi	B Bölgesi	C Bölgesi
310	302	302	200	200	200
308	305	305	199	200	200
300	307	307	200	200	199
301	308	305	201	202	201
305	305	305	200	201	199
303	308	304			
306	307	306			
306		Ortalama	200.6		

Çizelge EK-1.7. G6 Referans kirişine ait kesit ölçümleri

G6 Referans Kirişi					
Yükseklik Ölçümleri (b) (mm)			Genişlik Ölçümleri (a) (mm)		
A Bölgesi	B Bölgesi	C Bölgesi	A Bölgesi	B Bölgesi	C Bölgesi
302	306	303	200	199	200
303	308	303	200	200	199
302	307	303	200	200	198
306	305	304	199	201	201
299	309	305	199	200	200
305	310	306			
307	304	301			
307		Ortalama	200		

Çizelge EK-1.8. S3 Referans kirişine ait kesit ölçümleri

S3 Referans Kirişi					
Yükseklik Ölçümleri (b) (mm)			Genişlik Ölçümleri (a) (mm)		
A Bölgesi	B Bölgesi	C Bölgesi	A Bölgesi	B Bölgesi	C Bölgesi
300	304	304	200	200	199
300	304	308	200	200	199
304	305	302	201	201	201
306	307	304	201	202	200
301	303	300	201	201	199
305	304	305			
305	306	305			
304.71		Ortalama	200.8		

Çizelge EK-1.9. G1S2 kirişine ait kesit ölçümleri

G1S2 Kirişi					
Yükseklik Ölçümleri (b) (mm)			Genişlik Ölçümleri (a) (mm)		
A Bölgesi	B Bölgesi	C Bölgesi	A Bölgesi	B Bölgesi	C Bölgesi
299	305	301	198	199	199
300	306	305	200	198	200
303	305	304	196	200	199
302	303	304	197	198	199
306	305	305	199	198	198
303	305	301			
303	305	307			
304.86		Ortalama	198.6		

Çizelge EK-1.10. G2S1 kirişine ait kesit ölçümleri

G2S1 Kirişi					
Yükseklik Ölçümleri (b) (mm)			Genişlik Ölçümleri (a) (mm)		
A Bölgesi	B Bölgesi	C Bölgesi	A Bölgesi	B Bölgesi	C Bölgesi
302	302	301	201	203	200
300	304	303	200	202	201
299	304	304	201	202	201
301	304	304	202	202	202
303	298	302	202	201	201
303	299	300			
302	300	301			
301.57		Ortalama	202		

Çizelge EK-1.11. G3 Referans kirişine ait kesit ölçümleri

G3 Referans Kirişi					
Yükseklik Ölçümleri (b) (mm)			Genişlik Ölçümleri (a) (mm)		
A Bölgesi	B Bölgesi	C Bölgesi	A Bölgesi	B Bölgesi	C Bölgesi
300	310	308	204	199	199
300	309	308	203	199	199
301	309	311	201	198	198
305	309	309	199	199	199
303	306	305	200	199	200
303	308	311			
307	310	307			
308.71		Ortalama	198.8		

Çizelge EK-1.12. B1S2 kirişine ait kesit ölçümleri

B1S2 Kirişi					
Yükseklik Ölçümleri (b) (mm)			Genişlik Ölçümleri (a) (mm)		
A Bölgesi	B Bölgesi	C Bölgesi	A Bölgesi	B Bölgesi	C Bölgesi
303	307	306	199	200	200
302	308	307	199	200	199
305	308	313	200	200	199
305	309	313	201	199	199
302	310	309	201	200	200
304	307	312			
305	307	308			
308.00			Ortalama		199.8

Çizelge EK-1.13. B2S1 kirişine ait kesit ölçümleri

B2S1 Kirişi					
Yükseklik Ölçümleri (b) (mm)			Genişlik Ölçümleri (a) (mm)		
A Bölgesi	B Bölgesi	C Bölgesi	A Bölgesi	B Bölgesi	C Bölgesi
314	301	302	199	200	199
320	300	304	200	199	199
313	300	302	199	199	201
310	302	305	200	199	200
311	304	302	199	199	201
302	302	305			
312	303	305			
301.71			Ortalama		199.2

Çizelge EK-1.14. B5 (B3) Referans kirişine ait kesit ölçümleri

B5 (B3) Referans Kirişi					
Yükseklik Ölçümleri (b) (mm)			Genişlik Ölçümleri (a) (mm)		
A Bölgesi	B Bölgesi	C Bölgesi	A Bölgesi	B Bölgesi	C Bölgesi
307	302	306	199	198	198
314	302	307	202	199	199
315	303	305	199	200	198
315	302	303	199	199	198
316	300	301	198	199	200
306	303	302			
313	302	311			
302.00			Ortalama		199

EK-2

Bu ek kısmında, deneysel çalışma kapsamında kullanılan farklı tipte FRP donatılara ait çap ölçümlerine Çizelge Ek-2.1-Ek.2.2’de yer verilmektedir. Bu çizelgelerden elde edilen değerlerin ortalamaları, analitik hesaplarda kullanılmıştır.

Çizelge EK-2.1. BFRP ve GFRPTip-1 donatı çapı ölçümleri

Ölçüm No	BFRP Donatı Çapı (mm)	GFRPTip-1 Donatı Çapı (mm)
1	8.56	13.36
2	8.55	12.80
3	8.83	13.30
4	8.86	12.65
5	8.73	12.89
6	8.83	12.77
7	8.73	12.90
8	8.92	13.00
9	8.73	12.77
10	8.73	12.93
11	8.97	13.10
12	8.75	12.86
13	8.65	13.00
14	8.78	13.00
15	8.73	12.97
16	8.91	12.90
17	8.67	12.74
18	8.77	13.04
19	8.69	12.98
20	8.60	12.80
21	8.72	12.65
22	8.83	12.70
23	8.23	12.80
24	8.90	12.74
25	8.65	12.54
26	8.54	12.43
27	8.28	12.57
28	8.36	12.81
29	8.47	12.82
30	8.56	13.10
Ortalama	8.68	12.86

Çizelge EK-2.2. GFRPTip-2 donatı çapı ölçümleri

Ölçüm No	GFRP Donatı Çapı (mm)
1	12.02
2	12.13
3	12.52
4	12.40
5	12.58
6	11.84
7	12.00
8	12.39
9	12.18
10	12.69
11	12.15
12	12.43
13	12.03
14	12.18
15	11.97
Ortalama	12.23

EK-3

Bu ek kısmında, deneysel çalışma kapsamında her beton dökümü için taze betondan alınan silindir ve prizmatik numunelere ait basınç ve eğilmede çekme dayanımları Çizelge Ek-3.1-Ek.3.4'te detaylı olarak gösterilmektedir. Bu çizelgelerde verilen değerlerin ortalamaları, analitik hesaplarda kullanılmıştır.



Çizelge EK-3.1. İlk grup kirişlerin dökümünden alınan silindirik beton numunelerinin basınç dayanımları

Test No	Numune Ebatları	Boyut Etkisi	f_c (MPa)
1. Test	150x300 mm	1	33.92
2. Test	150x300 mm	1	37.17
3. Test	150x300 mm	1	29.89
4. Test	150x300 mm	1	31.03
5. Test	150x300 mm	1	24.82
6. Test	150x300 mm	1	35.74
7. Test	150x300 mm	1	31.89
8. Test	150x300 mm	1	38.50
9. Test	150x300 mm	1	34.87
10. Test	100x200 mm	1.05	28.24
11. Test	100x200 mm	1.05	25.15
12. Test	100x200 mm	1.05	29.77
13. Test	100x200 mm	1.05	35.59
14. Test	100x200 mm	1.05	30.64
15. Test	100x200 mm	1.05	30.08
16. Test	100x200 mm	1.05	24.43
17. Test	100x200 mm	1.05	32.41
18. Test	100x200 mm	1.05	28.74
19. Test	100x200 mm	1.05	27.84
20. Test	100x200 mm	1.05	31.56
21. Test	100x200 mm	1.05	29.17
22. Test	100x200 mm	1.05	32.73
23. Test	100x200 mm	1.05	31.35
24. Test	100x200 mm	1.05	33.97
25. Test	100x200 mm	1.05	34.57
26. Test	100x200 mm	1.05	36.10
27. Test	100x200 mm	1.05	29.83
28. Test	100x200 mm	1.05	25.74
29. Test	100x200 mm	1.05	30.73
30. Test	100x200 mm	1.05	34.12
31. Test	100x200 mm	1.05	35.02
32. Test	100x200 mm	1.05	26.99
33. Test	100x200 mm	1.05	29.49
Ortalama			31.28
Standart Sapma			3.67
Değişim Katsayısı (%)			11.74

Çizelge EK-3.2. İlk grup kirişlerin dökümünden alınan kare prizma beton numunelerinin eğilmede çekme dayanımları

Test No	Numune Ebatları	Moment (kN.m)	f_{ctf} (MPa)
1. Test	150x150x600 mm	1869.43	3.32
2. Test	150x150x600 mm	2167.91	3.85
3. Test	150x150x600 mm	1819.52	3.23
4. Test	150x150x600 mm	1952.84	3.47
5. Test	150x150x600 mm	2136.97	3.80
6. Test	150x150x600 mm	2045.86	3.64
Ortalama			3.55
Standart Sapma			0.25
Değişim Katsayısı (%)			7.11

Çizelge EK-3.3. İkinci ve üçüncü grup kirişlerin dökümünden alınan silindir beton numunelerinin basınç dayanımları

Test No	Numune Ebatları	Boyut Etkisi	f_c (MPa)
1. Test	150x300 mm	1	31.15
2. Test	150x300 mm	1	29.33
3. Test	150x300 mm	1	31.76
4. Test	150x300 mm	1	34.54
5. Test	150x300 mm	1	30.68
6. Test	150x300 mm	1	30.98
7. Test	100x200 mm	1.05	36.24
8. Test	100x200 mm	1.05	29.56
9. Test	100x200 mm	1.05	32.55
10. Test	100x200 mm	1.05	28.48
11. Test	100x200 mm	1.05	28.27
12. Test	100x200 mm	1.05	26.70
13. Test	100x200 mm	1.05	28.56
14. Test	100x200 mm	1.05	28.65
15. Test	100x200 mm	1.05	29.93
Ortalama			30.49
Standart Sapma			2.52
Değişim Katsayısı (%)			8.27

Çizelge EK-3.4. İkinci ve üçüncü grup kirişlerin dökümünden alınan kare prizma beton numunelerinin eğilmede çekme dayanımları

Test No	Numune Ebatları	Moment (kN.m)	f_{ctf} (MPa)
1. Test	150x150x600 mm	1507.77	2.68
2. Test	150x150x600 mm	2178.94	3.87
3. Test	150x150x600 mm	1428.31	2.54
4. Test	150x150x600 mm	1819.86	3.24
5. Test	150x150x600 mm	1875.09	3.33
6. Test	150x150x600 mm	2147.29	3.82
Ortalama			3.247
Standart Sapma			0.56
Değişim Katsayısı (%)			17.14

EK-4

Bu ek kısmında, deneysel çalışma kapsamında yer alan kirişlere ait beton öncesi kalıp içinden ve deney sonu resimleri Çizelge Ek-4.1-Ek.4.50’de verilmektedir.



Şekil EK-4.1. Salt çelik donatılı S5 Referans elemanı beton dökümü öncesi



Şekil EK-4.2. Salt çelik donatılı S5 Referans elemanı eğilme testi sonrası



Şekil EK-4.3. B1S4 elemanı beton dökümü öncesi



Şekil EK-4.4. B1S4 elemanı eğilme testi sonrası



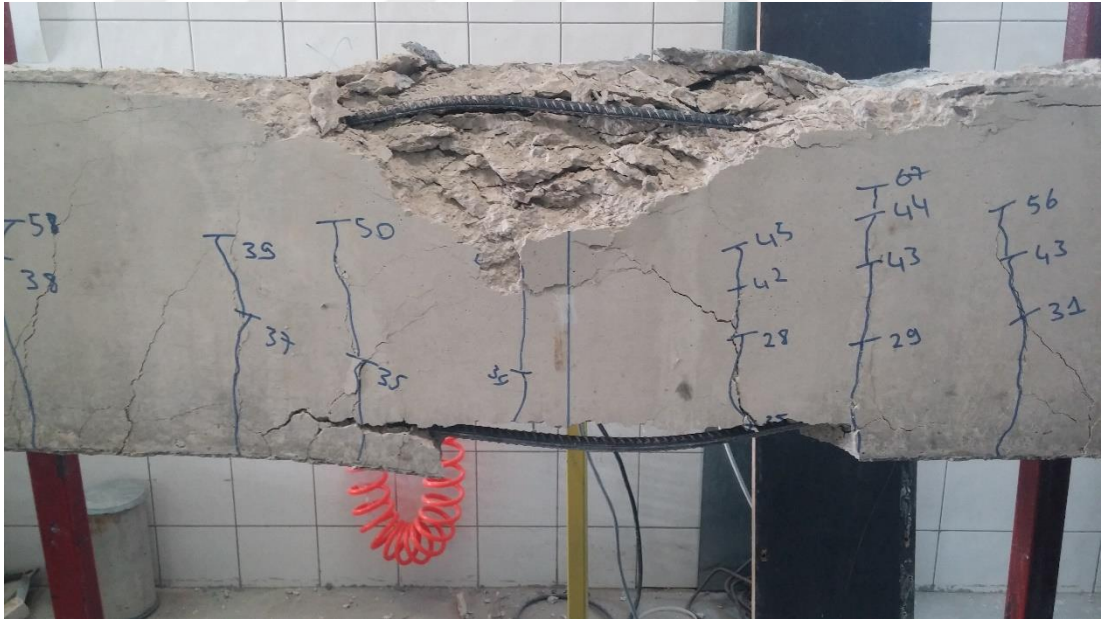
Şekil EK-4.5. B2S3 elemanı beton dökümü öncesi



Şekil EK-4.6. B2S3 elemanı eğilme testi sonrası



Şekil EK-4.7. B3S2 elemanı beton dökümü öncesi



Şekil EK-4.8. B3S2 elemanı eğilme testi sonrası



Şekil EK-4.9. B4S1 elemanı beton dökümü öncesi



Şekil EK-4.10. B4S1 elemanı eğilme testi sonrası



Şekil EK-4.11. B5 Referans elemanı beton dökümü öncesi



Şekil EK-4.12. B5 Referans elemanı eğilme testi sonrası



Şekil EK-4.13. G1S4 elemanı beton dökümü öncesi



Şekil EK-4.14. G1S4 elemanı eğilme testi sonrası



Şekil EK-4.15. G2S3 elemanı beton dökümü öncesi



Şekil EK-4.16. G2S3 elemanı eğilme testi sonrası



Şekil EK-4.17. G3S2 elemanı beton dökümü öncesi



Şekil EK-4.18. G3S2 elemanı eğilme testi sonrası



Şekil EK-4.19. G4S1 elemanı beton dökümü öncesi



Şekil EK-4.20. G4S1 elemanı eğilme testi sonrası



Şekil EK-4.21. G5 Referans elemanı beton dökümü öncesi



Şekil EK-4.22. G5 Referans elemanı eğilme testi sonrası



Şekil EK-4.23. Salt çelik donatılı S6 Referans elemanı beton dökümü öncesi



Şekil EK-4.24. Salt çelik donatılı S6 Referans elemanı eğilme testi sonrası



Şekil EK-4.25. G1S5 elemanı beton dökümü öncesi



Şekil EK-4.26. G1S5 elemanı eğilme testi sonrası



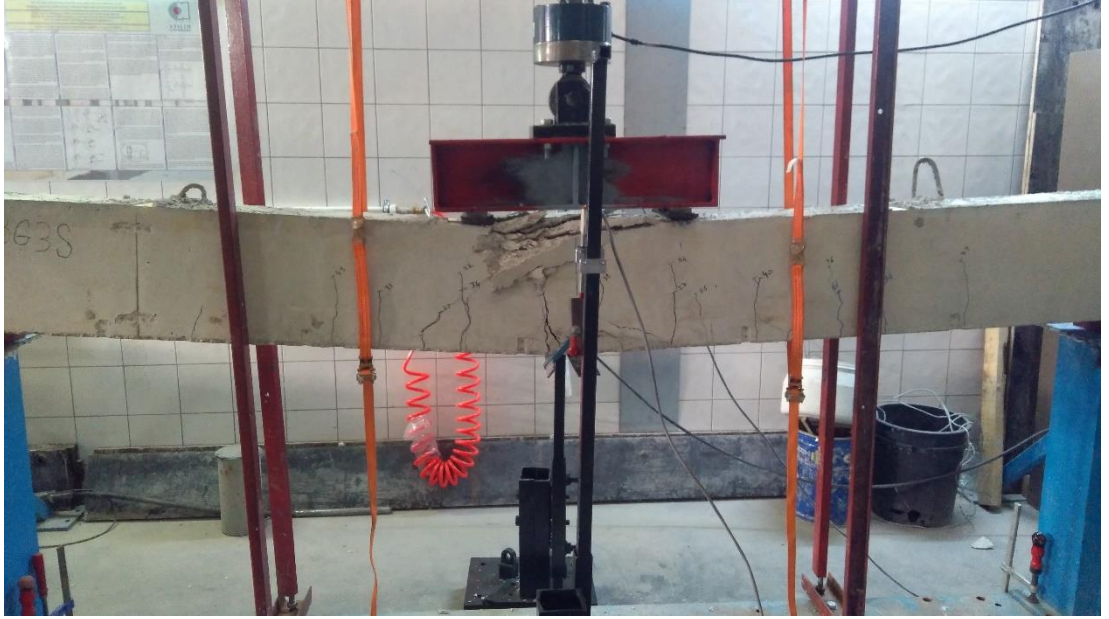
Şekil EK-4.27. G2S4 elemanı beton dökümü öncesi



Şekil EK-4.28. G2S4 elemanı eğilme testi sonrası



Şekil EK-4.29. G3S3 elemanı beton dökümü öncesi



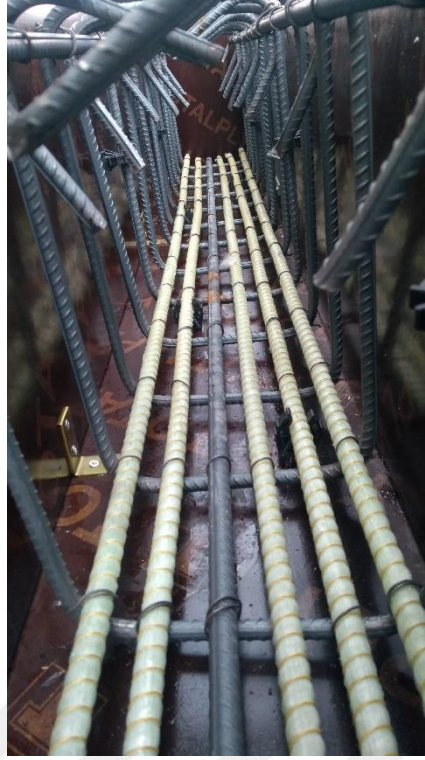
Şekil EK-4.30. G3S3 elemanı eğilme testi sonrası



Şekil EK-4.31. G4S2 elemanı beton dökümü öncesi



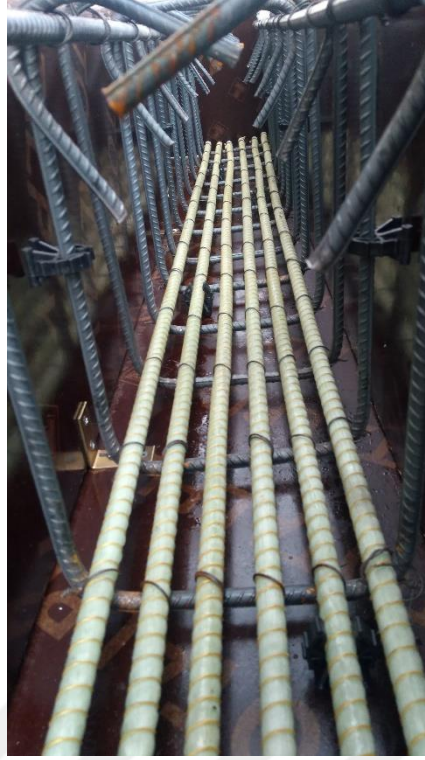
Şekil EK-4.32. G4S2 elemanı eğilme testi sonrası



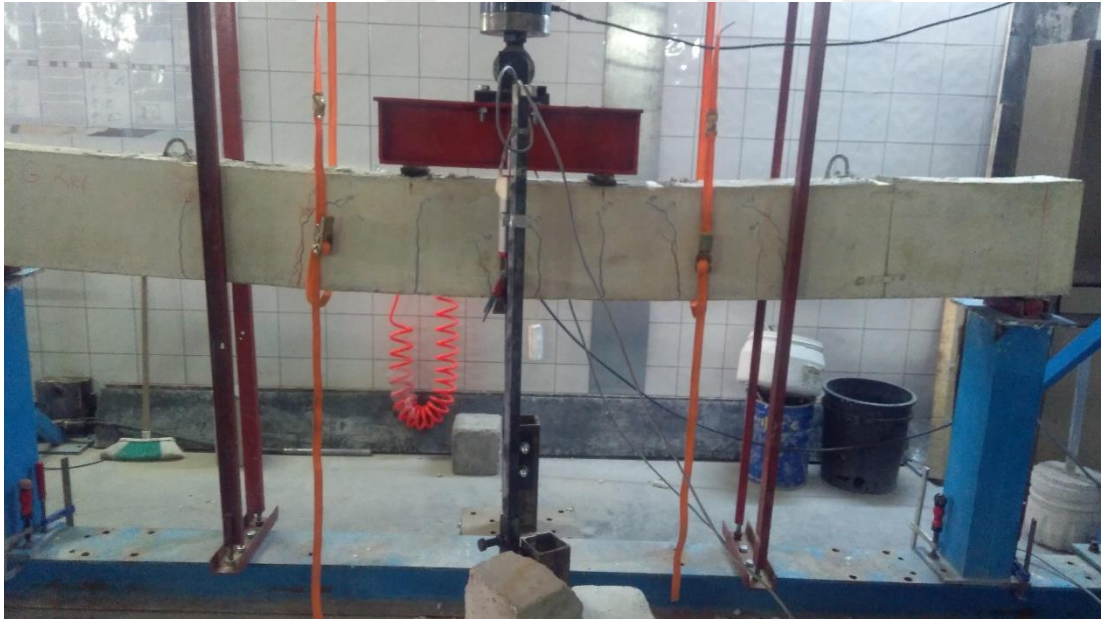
Şekil EK-4.33. G5S1 elemanı beton dökümü öncesi



Şekil EK-4.34. G5S1 elemanı eğilme testi sonrası



Şekil EK-4.35. G6 Referans elemanı beton dökümü öncesi



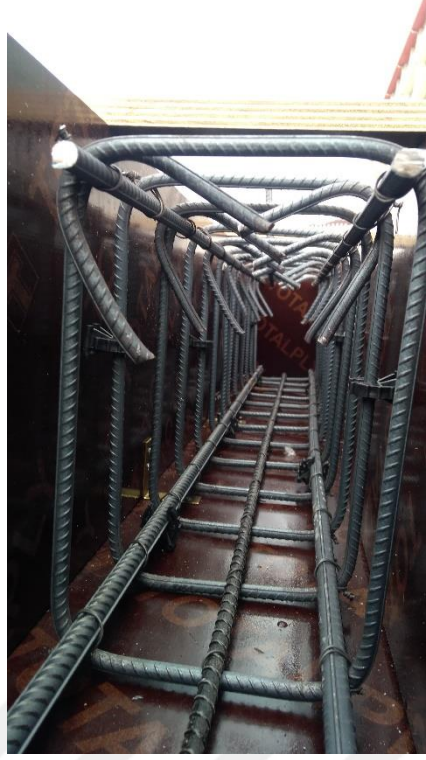
Şekil EK-4.36. G6 Referans elemanı eğilme testi sonrası



Şekil EK-4.37. Salt çelik donatılı S3 Referans elemanı beton dökümü öncesi



Şekil EK-4.38. Salt çelik donatılı S3 Referans elemanı eğilme testi sonrası



Şekil EK-4.39. B1S2 elemanı beton dökümü öncesi



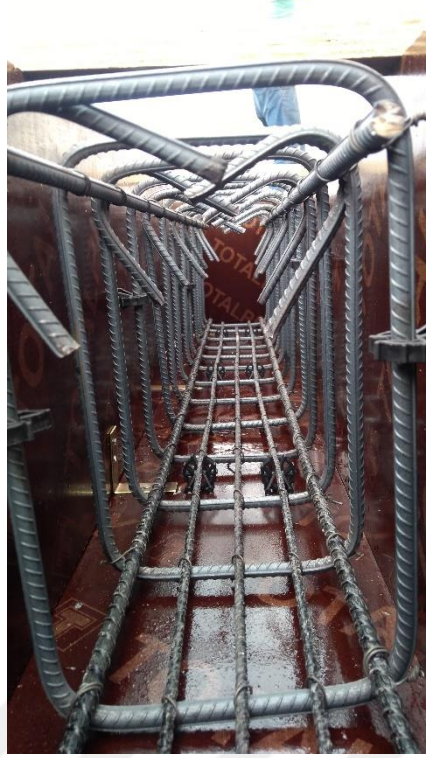
Şekil EK-4.40. B1S2 elemanı eğilme testi sonrası



Şekil EK-4.41. B2S1 elemanı beton dökümü öncesi



Şekil EK-4.42. B2S1 elemanı eğilme testi sonrası



Şekil EK-4.43. B5 (B3) Referans elemanı beton dökümü öncesi



Şekil EK-4.44. B5 (B3) Referans elemanı eğilme testi sonrası



Şekil EK-4.45. G1S2 elemanı beton dökümü öncesi



Şekil EK-4.46. G1S2 elemanı eğilme testi sonrası



Şekil EK-4.47. G2S1 elemanı beton dökümü öncesi



Şekil EK-4.48. G2S1 elemanı eğilme testi sonrası



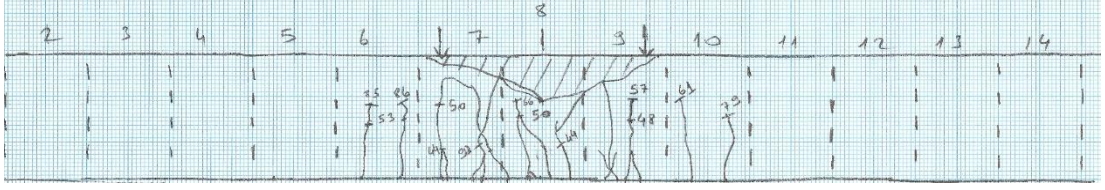
Şekil EK-4.49. G3 Referans elemanı beton dökümü öncesi



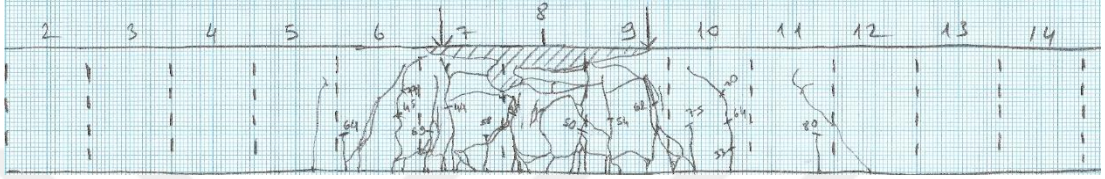
Şekil EK-4.50. G3 Referans elemanı eğilme testi sonrası

EK-5

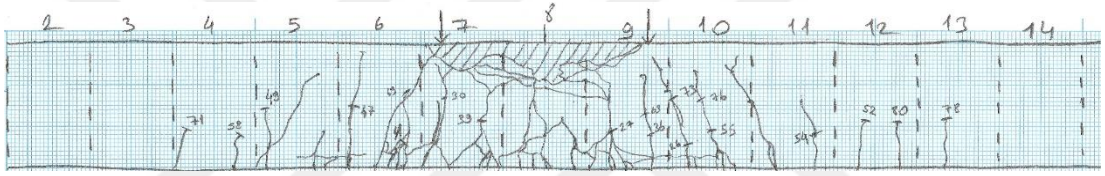
Bu ek kısmında, deneysel çalışma kapsamında yer alan kirişlere ait deney sonu çatlak haritalarına Çizelge Ek-5.1-Ek.5.25'te yer verilmektedir.



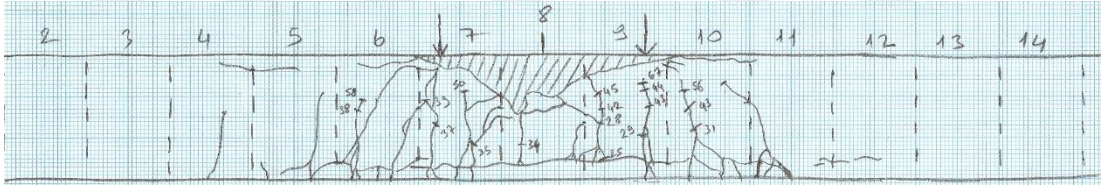
Şekil EK-5.1. S5 Referans elemanı eğilme testi sonrası çatlak haritası



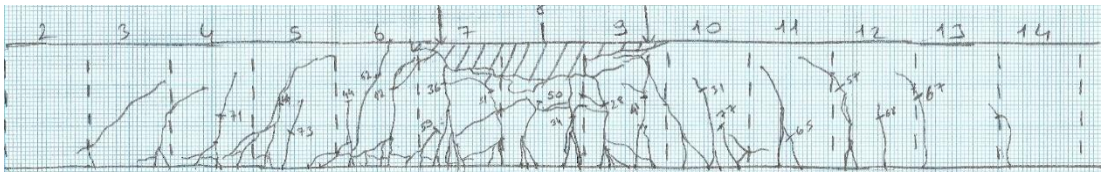
Şekil EK-5.2. B1S4 elemanı eğilme testi sonrası çatlak haritası



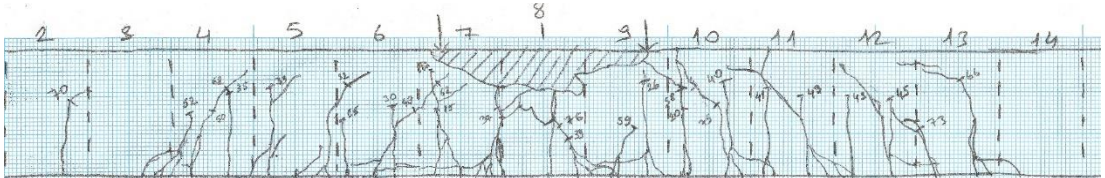
Şekil EK-5.3. B2S3 elemanı eğilme testi sonrası çatlak haritası



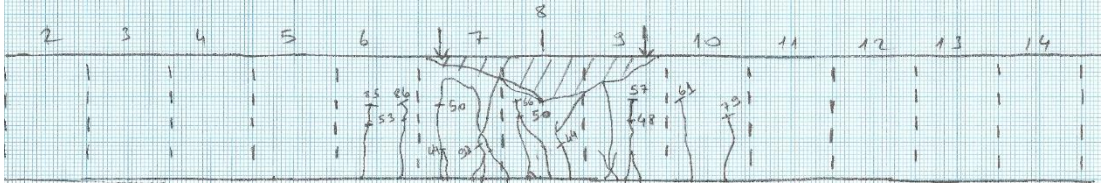
Şekil EK-5.4. B3S2 elemanı eğilme testi sonrası çatlak haritası



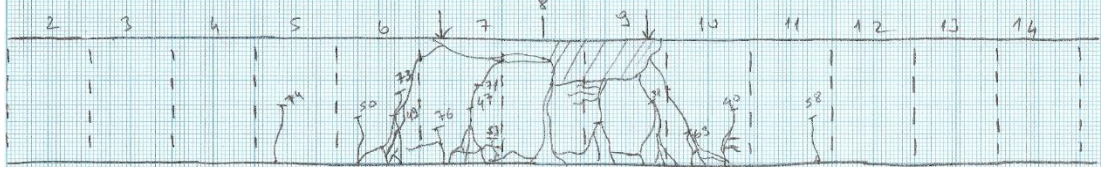
Şekil EK-5.5. B4S1 elemanı eğilme testi sonrası çatlak haritası



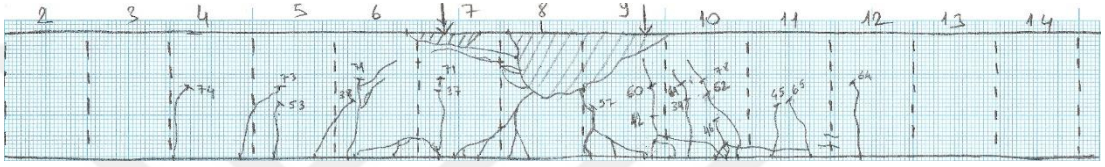
Şekil EK-5.6. B5 Referans elemanı eğilme testi sonrası çatlak haritası



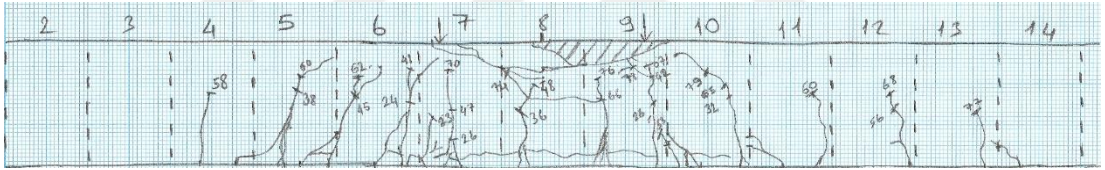
Şekil EK-5.1. S5 Referans elemanı eğilme testi sonrası çatlak haritası



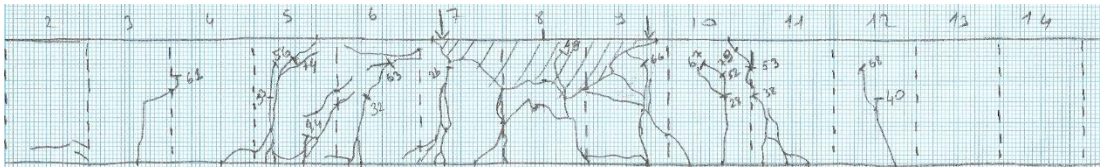
Şekil EK-5.7. G1S4 elemanı eğilme testi sonrası çatlak haritası



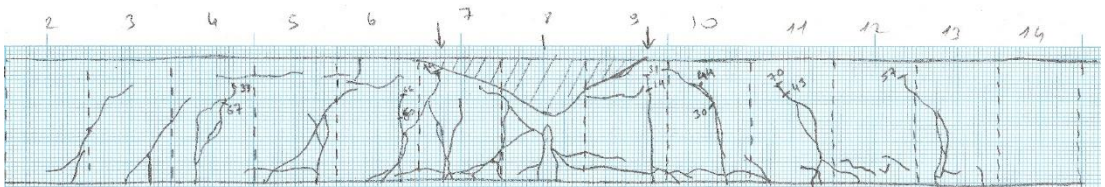
Şekil EK-5.8. G2S3 elemanı eğilme testi sonrası çatlak haritası



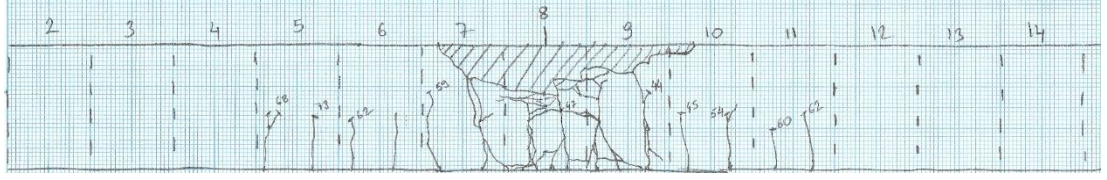
Şekil EK-5.9. G3S2 elemanı eğilme testi sonrası çatlak haritası



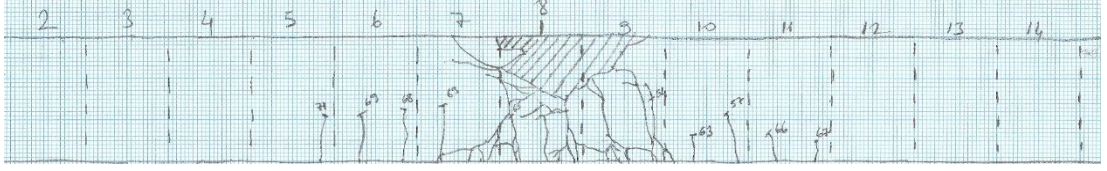
Şekil EK-5.10. G4S1 elemanı eğilme testi sonrası çatlak haritası



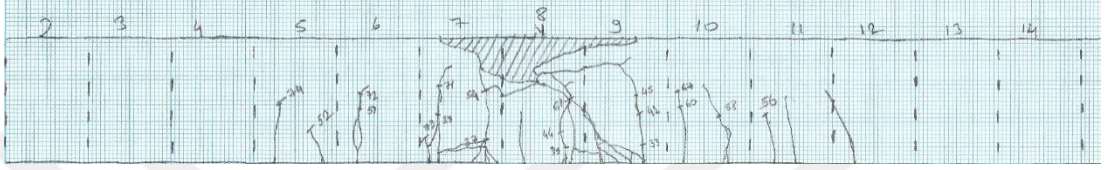
Şekil EK-5.11. G5 Referans elemanı eğilme testi sonrası çatlak haritası



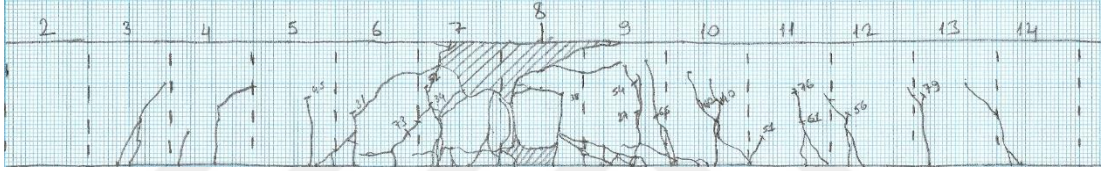
Şekil EK-5.12. S6 Referans elemanı eğilme testi sonrası çatlak haritası



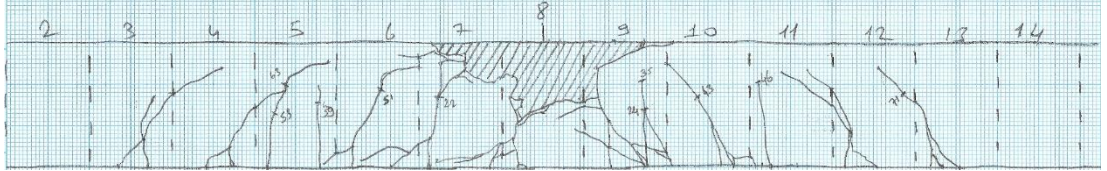
Şekil EK-5.13. G1S5 elemanı eğilme testi sonrası çatlak haritası



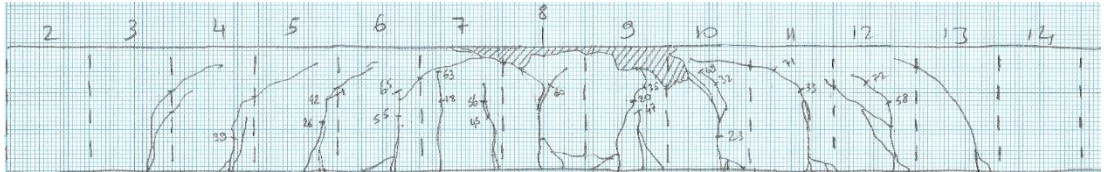
Şekil EK-5.14. G2S4 elemanı eğilme testi sonrası çatlak haritası



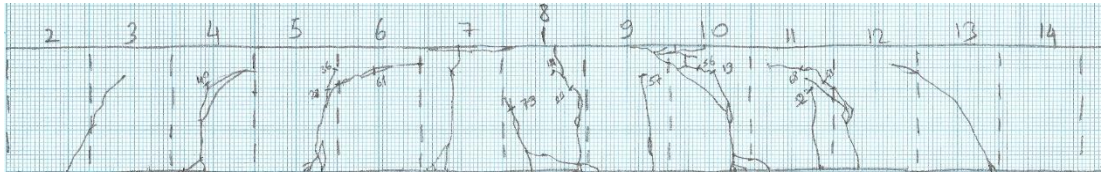
Şekil EK-5.15. G3S3 elemanı eğilme testi sonrası çatlak haritası



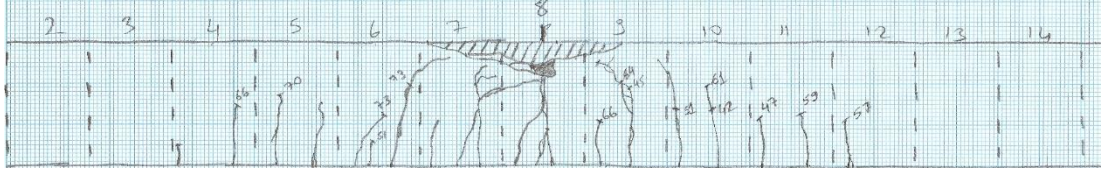
Şekil EK-5.16. G4S2 elemanı eğilme testi sonrası çatlak haritası



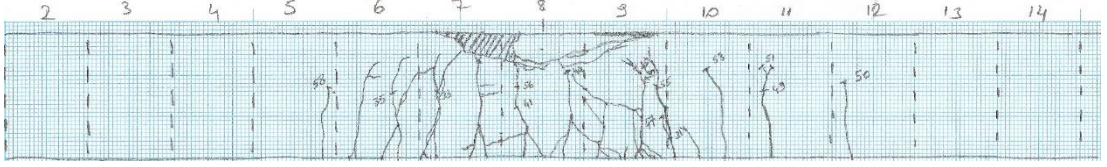
Şekil EK-5.17. G5S1 elemanı eğilme testi sonrası çatlak haritası



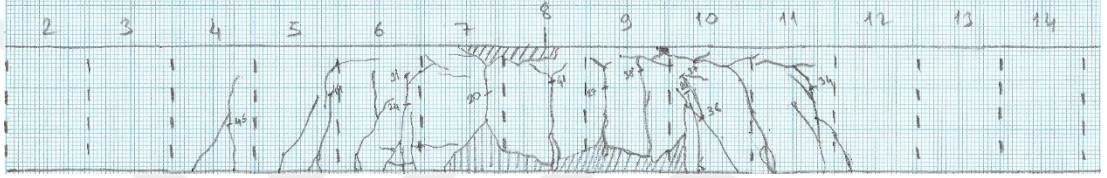
Şekil EK-5.18. G6 Referans elemanı eğilme testi sonrası çatlak haritası



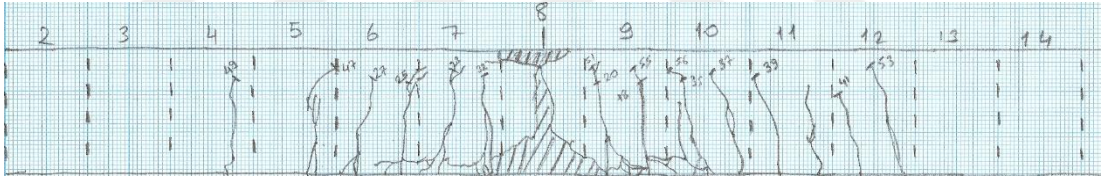
Şekil EK-5.19. S3 Referans elemanı eğilme testi sonrası çatlak haritası



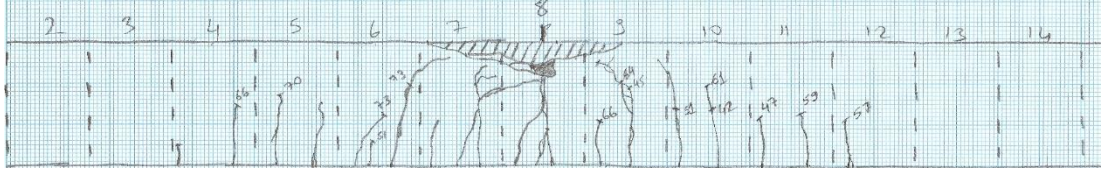
Şekil EK-5.20. B1S2 elemanı eğilme testi sonrası çatlak haritası



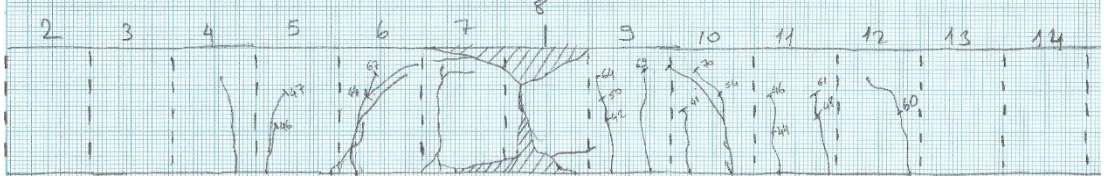
Şekil EK-5.21. B2S1 elemanı eğilme testi sonrası çatlak haritası



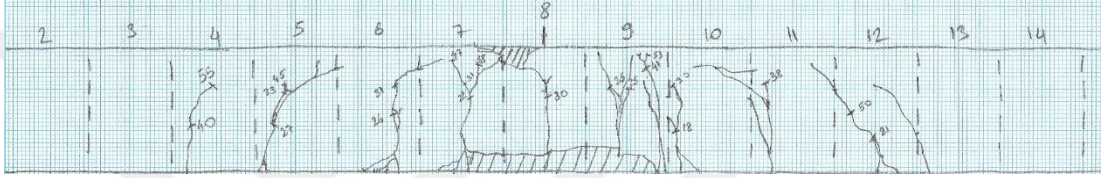
Şekil EK-5.22. B5 (B3) Referans elemanı eğilme testi sonrası çatlak haritası



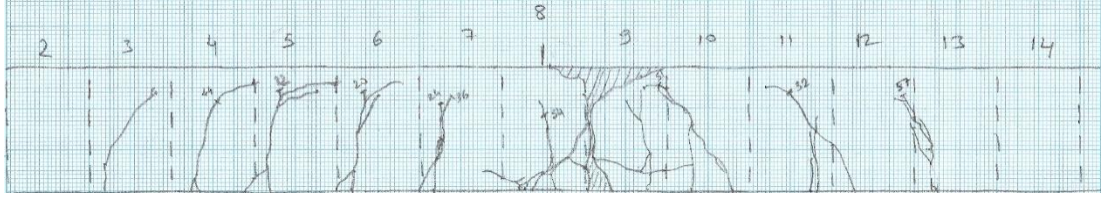
Şekil EK-5.19. S3 Referans elemanı eğilme testi sonrası çatlak haritası



Şekil EK-5.23. G1S2 elemanı eğilme testi sonrası çatlak haritası



Şekil EK-5.24. G2S1 elemanı eğilme testi sonrası çatlak haritası



Şekil EK-5.25. G3 Referans elemanı eğilme testi sonrası çatlak haritası